



UNIDAD ACADÉMICA NAVOJOA

**TRATAMIENTO DE UN EFLUENTE DE TILAPIA NEGRA (*Oreochromis niloticus*)
CON ESPINACA DE AGUA (*Ipomoea acuatica*) Y LECHUGA (*Lactuca sativa*) EN
UN SISTEMA ACUAPÓNICO**

**T E S I S QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN SISTEMAS DE PRODUCCION BIOSUSTENTABLES**

**PRESENTA:
MAURICIA NOHEMY RUIZ GARCIA**

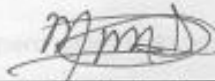
NAVOJOA, SONORA

ENERO 2020

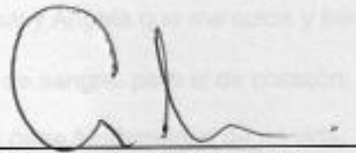
El estudio de campo se desarrolló en el laboratorio de sistemas acuapónicos de la Universidad Estatal de Sonora-Benito Juárez y los análisis de calidad del agua se llevaron a cabo en el laboratorio del posgrado “Sistemas de producción biosustentable” de la Universidad Estatal de Sonora- Unidad Navojoa. Se agradece al CONACYT por otorgar el apoyo financiero destinado a la beca de colegiatura y compra de alimento para tilapia, sin el cual, hubiera sido difícil culminar mis estudios y la investigación. De igual forma se agradece al Ing. Noé Amavizca Moroyoqui del laboratorio productor de crías de tilapia “CRILAB” por haber donado los organismos para el estudio.

CARTA DE APROBACIÓN

Los miembros del comité designado para revisar la tesis titulada **Tratamiento de un efluente de tilapia negra (*Oreochromis niloticus*) con espinaca de agua (*Ipomoea aquatica*) y lechuga (*Lactuca sativa*) en un sistema acuapónico** presentada por **Mauricia Nohemy Ruiz García**, la han encontrado satisfactoria y recomiendan que se acepte como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Sistemas de Producción Biosustentables.



Dr. Manuel Martín Mariscal Lagarda
Director de tesis



Dr. Anselmo Miranda Baeza
Revisor



Dra. Martha Elisa Rivas Vega
Revisor

**AUTORIZACIÓN PARA LA DIVULGACIÓN DE DOCUMENTOS DE TITULACIÓN.
UNIVERSIDAD ESTATAL DE SONORA.
PRESENTE.-**

Tipo de documento:

- Tesis
 Desarrollo tecnológico.
 Formulación de proyectos de investigación.
 Elaboración de material didáctico.
 Reporte de trabajo profesional.
 Otro (especificar).

Título del documento: **“TRATAMIENTO DE UN EFLUENTE DE TILAPIA NEGRA (*Oreochromis niloticus*) CON ESPINACA DE AGUA (*Ipomoea acuatica*) Y LECHUGA (*Lactuca sativa*) EN UN SISTEMA ACUAPÓNICO”.**

Autor (es): **Mauricia Nohemy Ruiz García.**

Fecha de titulación: **27 de enero del 2020.**

Título obtenido: **Maestro en Sistemas en Producción Biosustentable.**

Programa educativo: **Maestro en Sistemas en Producción Biosustentable.**

Correo electrónico: **licenciado.agronegocios_ruiz@hotmail.com**

Teléfono: **6441939496**

Autorizo a la Universidad Estatal de Sonora, para que efectúe la divulgación, publicación, comunicación pública y reproducción, así como la digitalización del mismo, con fines académicos y/o de investigación, es decir, sin fines de lucro.

Firma Mauricia Ruiz G.
Mauricia Nohemy Ruiz García

DEDICATORIA

Quiero dedicar esta tesis a mis hijos, Paula, Maite, Renata y Hugo Alberto, por prestarme las horas necesarias para el desarrollo de mis estudios, por ser los pilares que sostienen mi vida, por darme tanto amor y felicidad; por ser simplemente mi razón de ser.

A mi madre por todo el apoyo brindado a lo largo de la vida y en la realización de este sueño, por alegrarse con mis éxitos y estar a mi lado cuando más la necesito; a mi padre por ser tan cariñoso y estar a mi lado siempre para darme buenos consejos y apoyarme en cada momento.

A mi esposo por aguantar mis largas ausencias en nuestro hogar, por dejarme perseguir mis sueños y metas, pero sobre todo por siempre alentarme a ser mejor en cada cosa que realizo.

A mis hermanas Diana y Ángela †; Diana la que me ayuda y siempre está para darme su apoyo incondicional y Ángela que me cuida y bendice desde el cielo.

A mis hermanos que no son de sangre, pero si de corazón, familia y amigos que forman parte fundamental de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco sinceramente a todos los que directa e indirectamente contribuyeron para la realización de mi trabajo de tesis, pues cada uno ha sido parte fundamental para la culminación de mis estudios.

A la UES unidad académica Benito Juárez y unidad Navojoa, por brindarme la oportunidad de estudiar un posgrado y los espacios para desarrollar mi trabajo y así superarme académicamente.

Al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por proporcionarme el apoyo económico durante mi formación como becario número 633864.

A mi director de tesis, el Dr. Manuel Martín Mariscal Lagarda, por su apoyo incondicional a lo largo de mi posgrado, por enseñarme un poco de lo que él sabe, sin duda alguna sus aportes son de suma importancia en mi formación académica.

A mi comité tutorial formado por la Dra. Martha Elisa Rivas Vega y al Dr. Anselmo Miranda Baeza (UES- UAN), quienes estuvieron al pendiente en este trabajo, además de sus aportaciones en conocimiento para la culminación de este trabajo.

A mis profesores que tuve durante esta formación académica.

RESUMEN

La investigación se llevó a cabo en la Universidad Estatal de Sonora- Unidad Benito Juárez, del 10 de noviembre del 2017 al 24 de mayo del 2018, con una duración de 198 días. Se desarrolló un sistema acuapónico de tilapia (*Oreochromis niloticus*)- espinaca de agua (*Ipomoea acuática*)- lechuga (*Lactuca sativa*) para demostrar que el empleo de las plantas puede remover eficientemente la concentración de NH_3^- , NO_2^- , NO_3^- y sólidos suspendidos, además de eficientizar el consumo de agua en la producción de biomasa, en comparación con un monocultivo con tilapia.

Los resultados mostraron que el sistema acuapónico removió significativamente ($P < 0.05$) los compuestos nitrogenados (NH_3^- , NO_2^- , NO_3^-) y sólidos suspendidos (83.89% y 93.36%, respectivamente) en comparación al monocultivo de tilapia, de igual forma el sistema acuapónico mostró ser más eficiente en el uso de agua ya que se emplearon 45.96 L para producir un kg de biomasa (tilapia, espinaca de agua y lechuga), mientras que en el monocultivo de tilapia se utilizaron 680 L de agua por kg de tilapia cosechada.

Contenido

DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	vi
RESUMEN	vii
INDICE DE TABLAS	x
INDICE DE FIGURAS	xi
1. INTRODUCCIÓN	1
3. JUSTIFICACIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
4. HIPÓTESIS	11
5. OBJETIVO GENERAL	11
6. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
7. METODOLOGÍA	13
7.1. Localización del sitio de estudio.....	13
7.2. Diseño experimental.....	13
7.3. Descripción y funcionamiento del sistema.....	15
7.4. Proceso de producción.....	15
7.4.1. Cultivo de tilapia.....	15
7.4.1.1. Monitoreo de la calidad del agua.....	16
7.4.1.2. Alimentación.....	17
7.4.1.3. Crecimiento y cosecha.....	18
7.4.2. Cultivo de espinaca de agua (<i>Ipomoea acuática</i>).....	18
7.4.3. Cultivo de lechuga (<i>Lactuca sativa</i>).....	19
8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	21
8.1. Producción de tilapia.....	21
8.2 Producción de espinaca de agua.....	28
8.3 Producción de lechuga en el sistema integrado.....	29
8.4 Calidad del agua.....	32
8.4.1. Temperatura.....	32
8.4.2 pH.....	34
8.4.3. Oxígeno disuelto.....	36
8.4.4. Conductividad eléctrica.....	38

8.5 Compuestos nitrogenados	39
8.5.1 Concentración de amonio	41
8.5.2 Concentración de nitrito	44
8.5.3 Concentración de nitrato	47
8.6 Remoción de solidos suspendidos	50
9. CONCLUSIONES	54

INDICE DE TABLAS

Tabla		Página
1	Parámetros de calidad del agua monitoreados durante el ciclo de cultivo.....	16
2	Datos de producción de tilapia para M1 y M2.....	22
3	Distribución de tallas de tilapia alcanzadas en este estudio.....	24
4	Datos de consumo de agua en diferentes sistemas integrados.....	26
5	Datos de los factores de producción en el desarrollo de cultivos de tilapia con diferentes densidades de siembra y tiempo de cultivo.....	27
6	Características de producción de espinaca de agua en el sistema integrado....	28
7	Comparación de cosechas de espinaca de agua en diferentes sistemas Integrados.....	29
8	Datos de producción de la lechuga cultivada en el sistema acuapónico.....	29
9	Valores medios de producción de lechuga reportados para diferentes sistemas acuapónicos.....	31
10	% de remoción de nitratos, nitritos y amonio en diferentes sistemas acuapónicos.....	43

INDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Ubicación del sitio donde se realizó el proyecto.....	13
2	Esquema de la unidad experimental	14
3	Crecimiento de tilapia para el M1 (sistema acuapónico) y M2 (monocultivo).....	23
4	Distribución de tallas de tilapia para cada módulo de producción...	24
5	Producción de lechuga del sistema integrado (M1) en dos ciclos...	30
6	Variación de temperatura en M1 (sistema integrado) para el horario de la mañana y tarde.....	33
7	Variación de temperatura en M2 (monocultivo) para el horario de la mañana y tarde.....	34
8	Variación de pH en M2 (monocultivo) para el horario de la mañana y Tarde.....	35
9	Variación de pH en M1 (sistema integrado) para el horario de la mañana y	35
10	tarde.....	
	Variación del oxígeno disuelto en M2 (monocultivo) para el horario	37
11	de la mañana y tarde.....	
	Variación del oxígeno disuelto en M1 (sistema integrado) para el	37
12	horario de la mañana y tarde.....	
	Variación de la conductividad eléctrica en M2 (monocultivo) para	39
13	el horario de la mañana y tarde.....	
	Variación de la conductividad eléctrica en M1 (sistema integrado)	39
14	para el horario de la mañana y tarde.....	
	Variación del amonio no ionizado en el M1 (sistema integrado)	41
15	durante el ciclo de cultivo.....	
	Variación del amonio no ionizado en el M1 (sistema integrado) y	42
16	M2 (monocultivo) durante el ciclo de cultivo.....	
	Variación del nitrito en el M1 (sistema integrado) durante el ciclo	45
17	de cultivo.....	
	Variación del nitrito en el M1 (sistema integrado) y M2	47
18	(monocultivo) durante el ciclo de cultivo.....	
	Variación del nitrato en el M1 (sistema integrado) durante el ciclo	48
19	de Producción.....	
	Variación del nitrato en el M1 (sistema integrado) y M2	49
20	(monocultivo) durante el ciclo de producción.....	
	Concentración de sólidos suspendidos en el M1 (sistema	51
21	integrado)	
	Concentración de sólidos suspendidos en el M1 (sistema	52
	integrado) y M2 (monocultivo).....	

1. INTRODUCCIÓN

La comunidad mundial se enfrenta a múltiples retos relacionados entre sí, que van desde los efectos de la crisis financiera y económica actual a una mayor vulnerabilidad al cambio climático y los fenómenos meteorológicos extremos. Al mismo tiempo, se deben atender las necesidades apremiantes relacionadas con la alimentación y la nutrición de la población creciente con recursos naturales finitos. Se estima que en el mundo casi 1,000 millones de personas siguen padeciendo hambre, siendo las poblaciones pobres, especialmente en las zonas rurales, las más vulnerables a la combinación de las amenazas mencionadas anteriormente (FAO, 2012).

Durante muchos años el crecimiento acelerado de la población, ha repercutido en una mayor presión por producir alimento suficiente para abastecerse, pero a su vez, también han generado un deterioro de los recursos ambientales, disminuyendo la calidad de los productos. Para el año de 2015, la población humana alcanzó los 7,300 millones de personas y se estima que para los años 2050, la población alcanzará los 9,700, como se observa, con el pasar del tiempo, la población aumenta mientras que la calidad de las tierras de cultivo y la producción de las mismas decae constantemente (FAO, 2017).

En la conferencia de las Naciones Unidas (conocida como Río+20) celebrada en el año 2012 en Río de Janeiro, Brasil, los dos temas esenciales fueron el marco institucional para el desarrollo sostenible y el apoyo a una economía verde, definiendo que una gestión más acertada y una mayor eficiencia a lo largo de toda la cadena de

valor alimentaria puede aumentar la seguridad en la producción de alimentos con menos recursos naturales. Por lo tanto, más que nunca se requiere investigación adicional y propuestas biotecnológicas en términos de sustentabilidad alimenticia, cuidado ambiental y desarrollo que permitan producir alimentos de manera más eficiente, optimizando el uso de los recursos para incrementar el crecimiento económico (FAO, 2012).

Los sistemas acua-agrícolas (acuapónicos) han sido propuestos como una medida para optimizar el uso de los recursos disponibles: agua, suelo, espacio y capital, ya que producen plantas y animales acuáticos de manera sustentable, reduciendo el volumen de agua empleada, al mismo tiempo minimizan la contaminación ambiental y la dependencia de agroquímicos (Stevenson *et al.* 2010; Mariscal-Lagarda y Páez-Osuna, 2014). El funcionamiento de un sistema acuapónico se basa en que los desechos producidos por los organismos acuáticos (peces, crustáceos, moluscos y anfibios) generados principalmente vía alimento balanceado, excretas y orina son integrados al agua como sólidos suspendidos, disueltos y convertidos en nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, Na, Cl, Fe, Mn, Zn, Cu, Mo, entre otros) que sirven como fuente de alimento para las plantas, éstas al tomar los nutrientes, bajan su concentración en el agua y puede ser reutilizada por los organismos acuáticos en cultivo mediante el proceso de bioremediación (Busby y Lin, 2014; Mariscal-Lagarda *et al.* 2012).

Existe una gran variedad de animales acuáticos y plantas que pueden ser cultivados en estos sistemas, entre los que se encuentran peces (tilapia, bagre y peces de ornato), anfibios (rana) y crustáceos (langostino, langosta australiana y camarón

blanco). De los peces, destaca la tilapia como el organismo más utilizado, debido a su aceptación comercial, fácil manejo y amplio rango de tolerancia a diversas condiciones ambientales, en el caso de las plantas, se han ensayado especies como lechuga, hierbas aromáticas (albahaca, cilantro, yerbabuena), tomate, pepino y berenjena, representando la combinación tilapia-lechuga-hierbas aromáticas el 60% de la investigación existente en estos sistemas (Rakocy, *et al* 2006). Sin embargo, existen otro tipo de plantas que pueden ser utilizadas (junto con las hortalizas) y contribuir a un mejoramiento de la calidad del agua, entre estas destacan las macrofitas acuáticas (azolla, lirio acuático, lechuga de agua, salvinia, lenteja de agua y espinaca de agua) (Martelo y Lara-Borrero, 2012).

Aunque el desarrollo de los sistemas acua-agrícolas está avanzando todavía existen vacíos en la información en diferentes aspectos, como: (1) diseño del sistema, (2) evaluación de métodos para el cultivo vegetal, (3) evaluación de sustratos, (4) producción de diferentes cultivos vegetales al mismo tiempo, (5) balance de masas de nutrientes (N y P), (6) análisis de factibilidad económica del sistema y (7) utilización de macrofitas acuáticas.

Por lo anterior, con la presente investigación se pretende generar conocimiento acerca del tratamiento del efluente de un cultivo de tilapia empleando la macrofita acuática (*Ipomoea acuática*) en combinación con la lechuga (*Lactuca sativa*) y evaluar la calidad del agua (sólidos suspendidos, parámetros físico-químicos (pH, conductividad eléctrica, temperatura, oxígeno disuelto) y nutrientes (amonio no ionizado, nitrito y nitrato) para determinar si la contaminación ambiental generada por el cultivo de tilapia se ve disminuida.

2. ANTECEDENTES

De acuerdo a Rackocy *et al.* (1992), un sistema acua-agrícola (acuapónico) es un sistema en el que se combina la actividad acuícola con la agricultura mediante técnicas hidropónicas y en el que el agua es reutilizada permanentemente. Según Rakocy *et al.*, (1992); Flaherty *et al.* (2000); McIntosh y Fitzsimons, (2003); Mariscal-Lagarda *et al.* (2012), Somerville *et al.* (2014) y Mateus *et al.* (2019), los sistemas acua-agrícolas ofrecen las siguientes ventajas:

- (a) Optimizan el empleo del agua ya que se produce más biomasa por litro de agua empleado
- (b) El costo asociado con la generación de nutrientes vía alimento y fertilizantes es minimizado
- (c) Se disminuye la contaminación ambiental
- (d) Se aprovechan los nutrientes del agua generados por el alimento agregado, logrando una producción de vegetales orgánicos
- (e) Se generan dos fuentes de ingreso por la venta de los productos acuícolas y agrícolas, aumentando de esta forma el retorno económico por volumen de agua utilizada
- (f) Se puede producir en terrenos no aptos para la agricultura tradicional, porque para la producción vegetal se utilizan métodos de cultivo hidropónicos, los cuales, no requieren del suelo.

Dentro de las principales desventajas de los sistemas acua-agrícolas están, las siguientes (a) aumento potencial de enfermedades tanto de organismos acuáticos y plantas debido a la intensificación de los cultivos; (b) el uso de agroquímicos está restringido lo que hace difícil el tratamiento de una eventual enfermedad; (c) la operación del sistema llega a ser complicada por combinar dos actividades productivas con requerimientos nutricionales y ambientales distintos (Stevenson *et al.* 2010; Mariscal-Lagarda *et al.* 2012; Somerville *et al.* 2014; Matheus *et al.* 2019).

Uno de los primeros trabajos reportados sobre sistemas acua-agrícolas es el de Naegel (1977), en el cual, se cultivó de forma integrada tilapia mossambica y la carpa *Cyprinus carpio* con lechuga y tomate, encontrando que las plantas de lechuga crecieron mejor que los tomates, ya que el sistema no produjo los nutrientes suficientes para soportar la carga de los frutos.

García-Ulloa *et al.* (2005), evaluaron un sistema experimental acuapónico incorporando la producción de tilapia (*Oreochromis mossambicus*) y pepino (*Cucumis sativus*) durante 75 días. Los peces (90 g de peso promedio inicial) se mantuvieron en un tanque de 500 L a una densidad de 0.6 peces L⁻¹, mientras que 40 plántulas de pepino se sembraron en 2 camas de arena estéril. Las plantas se regaron con agua de desecho de las tilapias, con un sistema de recirculación de agua. En cada semana se registraron las concentraciones de amonio no ionizado, nitritos y nitratos. Al final del cultivo, los peces crecieron 25 g en promedio, y se produjeron casi 5 kg de pepino. Las curvas de compuestos nitrogenados mostraron un flujo de nutrientes hacia las plantas y aporte de agua sin niveles peligrosos de amonio y nitritos para los peces

Por otra parte, Al-Hafedh *et al.* (2008) produjeron en Arabia Saudita, tilapia (*Oreochromis niloticus*) con lechuga (*Lactuca sativa*), al final del cultivo los peces alcanzaron un peso medio 250 g con un rendimiento de 33.5 kg/m³ con un consumo total de 320 L/kg de peces más lechuga, y el rendimiento de lechuga fue de 42 cabezas por m² encontrando además que la densidad de siembra para las lechugas puede decrecer a 25-30 plantas por m² para producir lechuga de mejor calidad.

De acuerdo a Hanson *et al.* (2008) se puede producir tilapia (*Oreochromis niloticus*) con albahaca comparando el riego de las plantas usando los efluentes del cultivo de tilapia contra una solución de nutrientes para el albahaca, encontrando que al emplear el efluente proveniente del cultivo de tilapia para el riego de las plantas se pueden proporcionar adecuadamente los nutrientes al albahaca estimulando su crecimiento y utilizando menos agua.

Según Mateus (2009), los sistemas acuapónicos para producir peces y vegetales esta ganado la atención de los usuarios como un sistema para producir alimento de manera sustentable e incrementar los ingresos mientras que se utiliza los desechos generados por los peces. En estos sistemas las especies de peces que se pueden usar son varias destacando la tilapia como uno de los mejores peces para el cultivo integrado acuagrícola con vegetales como lechuga, hierbas aromáticas y verdura (espinaca, cebolla, berro, pepino, tomate y pimientos).

En Colombia, Ramírez *et al.* (2009) trabajaron con el pez de acuario goldfish (*Carrasius auratus*) y lechuga (*Lactuca sativa*) comparando el crecimiento de las plantas contra

un sistema hidropónico. Los resultados mostraron que el crecimiento de los peces fue bajo y lento pero con una elevada sobrevivencia (80%), mientras que el crecimiento de la lechuga fue superior en el sistema hidropónico concluyendo que probablemente la baja producción de lechuga en el sistema acua-agricola se debió principalmente a la carencia de calcio, potasio, hierro y a un elevado pH.

Los sistemas acua-agrícolas también pueden llevarse a cabo usando agua de pozo con baja salinidad, tal y como lo desarrollaron Mariscal-Lagarda *et al.* (2012) para producir de manera integrada camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*) con tomate hidropónico (*Lycopersicon esculentum*) bajo los siguientes escenarios de producción: (a) tomates irrigados con efluentes de camarón, (b) tomates irrigados con una solución hidropónica y (3) tomates irrigados con agua directa del pozo. Los resultados obtenidos fueron 3.9 ton de camarón/ha, 36.1, 38.7 y 27.6 ton/ha de tomate irrigado con efluentes de camarón, solución hidropónica y agua de pozo, respectivamente, sin que se encontraran diferencias significativas entre las primeras dos. En este estudio también se demostró que la descarga ambiental por N y P se redujo considerablemente con una generación de 57 kg de N/ton y 7.1 kg de P/ton de camarón y tomate. Respecto al uso de agua este estudio se destaca que cuando se consideró solo la producción de camarón, se emplearon 4.7 m³ de agua/kg de camarón, lo cual, se disminuyó a 2.1 m³ de agua/kg de camarón más tomate, resaltando los beneficios al utilizar los sistemas acua-agrícolas.

Busby y Lin (2014) trabajaron con un sistema integrado usando trucha (*Oncorhynchus mykiss*), lechuga (*Lactuca sativa*) y nasturtium (*Tropaeolum majus*) para determinar el tamaño del sistema a través de la remoción de nutrientes. Se observó que nasturtium

tuvo una alta capacidad de remoción de nitrógeno de amonio total (TAN) y de nitrato en un 80%, mientras que la lechuga removió solo el 48% del TAN y fue muy ineficiente en la remoción del nitrato. Como conclusión se dedujo que la remoción de nutrientes por las plantas redujo la descarga ambiental de nutrientes en el cultivo de trucha.

En una revisión internacional a cerca de sistemas acuapónicos, Love *et al.* (2015), encontraron que la tilapia se empleó en un 69% de las veces, mientras que el bagre y la trucha se usaron 25% y 7%, respectivamente. Lechuga y albahaca se cultivaron un 70% de las ocasiones, tomates, pepinos y pimientos un 20% y otras especies de plantas el 10%. Dentro de los sistemas hidropónicos empleados, el método de balsas flotantes predominó en 60% sobre las camas con sustrato (19%) y el sistema NFT (15%).

Enduta *et al.* (2011) realizaron un estudio acerca de un sistema acuapónico para evaluar la eficiencia de dos cultivos en la purificación de las aguas residuales de operación de la acuicultura y el efecto de cantidad de semilla en actuaciones de producción de peces y plantas, utilizando espinaca de agua (*Ipomoea aquatica*) y mostaza verde (*Brassica juncea*) en combinación con bagre africano (*Clarias gariepinus*) teniendo éste un peso inicial de 30 g; el cultivo se desarrolló exitosamente obteniendo una tasa de crecimiento máxima de 3,57 g/día para el bagre africano (*Clarias gariepinus*). Los resultados mostraron que la espinaca de agua fue capaz de reducir significativamente los niveles de N-NH₃, N-NO₂, N-NO₃ y ortofosfato en 81.9, 87.5, 83.1 y 80.1%, respectivamente, en comparación a los removidos por la mostaza verde 72.4 para N-NH₃, 76 N-NO₂, 78.6 N-NO₃ y 72.3 para el ortofosfato.

Endut *et al.* (2010) evaluaron la tasa hidráulica óptima y la relación de espinaca de agua en un sistema acuapónico de bagre. Sus resultados mostraron que el crecimiento del bagre no varió significativamente con las tasas de carga hidráulica, en contraste la producción de espinaca de agua fue mayor a una carga hidráulica más baja. La producción de peces, el crecimiento de la espinaca y la tasa de remoción de nutrientes fueron más altos en la tasa hidráulica de 1.28 m/día, mientras que la relación de peces a plantas que se calculó para balancear la generación de nutrientes de los peces con la remoción de nutrientes por las plantas fue de 15-42 g de alimento para peces/m² de área de crecimiento de plantas.

Por otra parte Liang y Chien, (2013), evaluaron el efecto de la frecuencia de alimentación y el fotoperiodo sobre la calidad del agua y producción de tilapia con espinaca de agua. En sus resultados reportaron que la calidad del agua permaneció en niveles seguros tanto para los peces como para las plantas, el peso promedio ganado para la tilapia fue de 43.9% y de 169% para la espinaca. El fotoperiodo de 24 h incrementó en un 2.4% más el crecimiento de los peces y 12% más el crecimiento de las plantas y una menor acumulación de todas las especies de N y de P en comparación a un fotoperiodo de 12 h. De igual manera el incremento en las frecuencias de alimentación favoreció la calidad del agua y permitió el crecimiento sostenido de los peces y plantas en un 4.9% y 11%, respectivamente.

3. JUSTIFICACIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Como una alternativa para diversificar la actividad acuícola del Estado de Sonora, el cultivo de la tilapia se presenta como una opción viable de desarrollo en las comunidades de la zona rural, ya sea que se realice a traspatio o a escala comercial. Como una forma de hacer más rentable el cultivo de tilapia y optimizar el empleo de los recursos agua y suelo, en muchos países se ha combinado con la actividad agrícola ofreciendo al productor una alternativa para incrementar sus ingresos y generar fuentes de empleo e ingresos adicionales, además de contribuir con el cuidado del medio ambiente ya que los desechos de un cultivo son aprovechados por el otro, haciendo de esto una actividad sustentable. Por lo anterior, es importante que se conduzcan investigaciones tendientes a desarrollar sistemas integrados acuagrícolas con agua dulce o con baja salinidad que combinen la acuicultura y la agricultura para optimizar el empleo de agua, suelo y espacio, obteniendo mayores rendimientos por unidad de área y que además sean amigables con el medio ambiente. Por lo tanto, se plantea la siguiente pregunta de investigación.

¿Qué tan posible es que empleando la macrófita acuática (*Ipomoea acuática*) y la lechuga (*Lactuca sativa*) se logre reducir la descarga de nutrientes en los efluentes de un cultivo de tilapia negra (*Oreochromis niloticus*) en comparación a los sistemas tradicionales de cultivo de flujo abierto?

4. HIPÓTESIS

El empleo de la macrófita acuática (*Ipomoea acuática*) y la lechuga (*Lactuca sativa*) logran reducir la contaminación ambiental proveniente del efluente de un cultivo de tilapia negra (*Oreochromis niloticus*) en comparación a los sistemas tradicionales de cultivo de flujo abierto.

5. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un cultivo de tilapia negra (*Oreochromis niloticus*), espinaca de agua (*Ipomoea acuática*) y lechuga (*Lactuca sativa*), mediante un sistema acuapónico para evaluar la calidad del agua del efluente de tilapia y determinar si con la integración de los cultivos vegetales se logra disminuir la contaminación ambiental generada por el sistema de producción de tilapia.

6. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Implementar un sistema de cultivo acua-agrícola que permita el desarrollo de la tilapia negra, la espinaca de agua y la lechuga
2. Evaluar la calidad físico-química del agua (pH, conductividad eléctrica, temperatura, oxígeno disuelto y sólidos suspendidos del agua utilizada para el cultivo de tilapia y sus cambios en composición química en relación con el uso de la misma en el cultivo espinaca de agua y lechuga.

3. Evaluar la generación de nutrientes (nitrógeno de amonio (N-NH_3^+), nitrógeno de nitrito (N-NO_2^-) y nitrógeno de nitrato (N-NO_3^-), del agua utilizada para el cultivo de tilapia y sus cambios en composición química en relación con el uso de la misma en el cultivo espinaca de agua y lechuga.

4. Evaluar la disminución de la contaminación ambiental (de acuerdo a los parámetros mencionados en los objetivos 2 y 3) del efluente de las tilapias cuando este pasa a través de la espinaca de agua y la lechuga.

7. METODOLOGÍA

7.1. Localización del sitio de estudio

El proyecto se desarrolló en el sistema acuapónico de la unidad académica Benito Juárez de la UES, ubicada a los 27° 07' 03" de latitud norte y a los 109° 50' 31" de longitud oeste en el municipio de Benito Juárez, Sonora (Fig. 1).



Figura 1. Ubicación del sitio donde se realizó el proyecto

7.2. Diseño experimental

Se utilizó un diseño al azar simple comparando las siguientes alternativas: 1) Efluente de tilapia pasado a través de camas con espinaca de agua y lechuga (M1, acuapónico); 2) efluente de tilapia sin pasar a través de camas con espinaca de agua y lechuga (M2, monocultivo) (Fig. 2).

Los parámetros de calidad de agua en el M1 (oxígeno, temperatura, conductividad eléctrica, pH y sólidos suspendidos, N-NH_3^- , N-NO_2^- y N-NO_3^-), se analizaron por ANOVA de una vía y para comparar la diferencia entre las medias de los tratamientos se hicieron comparaciones múltiples con la prueba de Tukey propuesta por Endut *et al.* (2010), tomando como significancia $P < 0.05$. Los datos de producción entre los módulos (crecimiento, sobrevivencia, producción, rendimiento, conversión alimenticia) fueron analizados por *t* de student no pareada con significancia de $P < 0.05$. El software estadístico GrapPad Prisma 5 y EXCEL fueron usados para desarrollar los análisis estadísticos descritos con anterioridad.

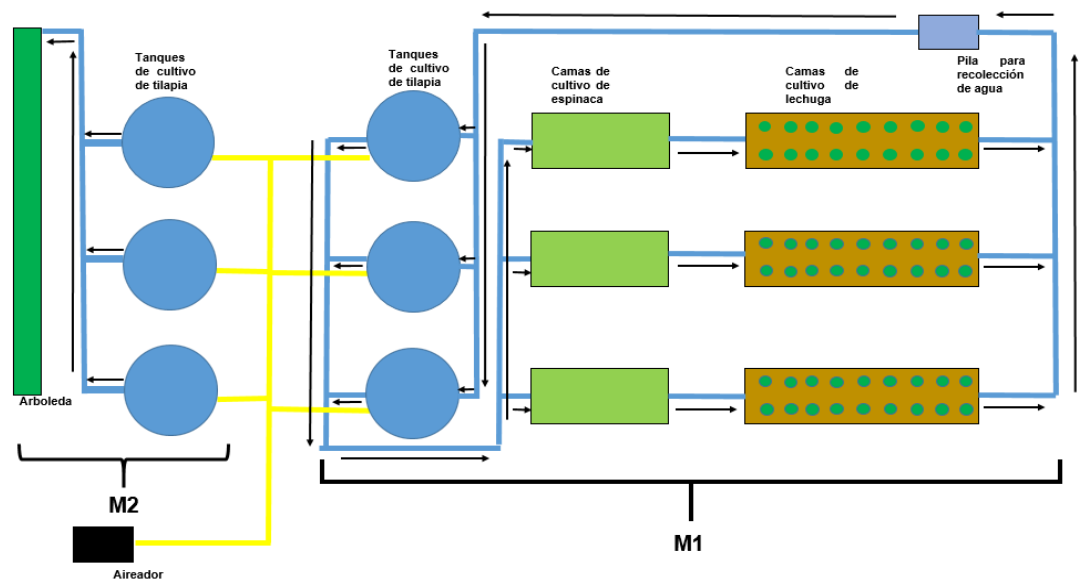


Figura 2. Esquema de la unidad experimental

7.3. Descripción y funcionamiento del sistema

El sistema consistió de dos módulos (M1 y M2) con tres tanques circulares de *liner* cada uno (3x1.2 m de diámetro y alto), lo cual, equivale a un volumen de 7000 litros de agua por tanque y se utilizó para el cultivo de tilapia. El M1 irrigó tres camas con espinaca de agua (5x2x0.6 m) rellenas con 0.55 m de arena de río y 0.05 m de grava y estas regaron tres camas hidropónicas con lechuga (7x0.8x0.2 m) las cuales, se rellenaron con 0.05 m de grava y 0.15 m de zeolita. Por otro lado, en el M2 se llevó a cabo un monocultivo de tilapia y se mantuvo con flujo abierto diariamente durante el ciclo de cultivo.

El agua del M1, se hizo pasar por gravedad hacia las camas con espinaca de agua y de estas por gravedad hacia las camas hidropónicas con lechuga, usando un sistema de riego por inundación con manguera agrícola de ½" de diámetro, luego, el agua una vez que pasó por las plantas de espinaca de agua y lechuga se recolectó en una pila de 20 L para retornarla hacia los tanques con una tubería de pvc de ½" elevándola con una bomba de fuente marca EVANS con capacidad de 60 Watts (0.08 HP).

Finalmente, para abastecer los requerimientos de oxígeno en los tanques con tilapia, se contó con 1 soplador (blower) de 1 HP.

7.4. Proceso de producción

7.4.1. Cultivo de tilapia

La tilapia negra (*Oreochromis niloticus*) se seleccionó debido a que soporta un amplio rango de salinidades, se desarrolla adecuadamente en altas densidades, tiene una

gran adaptabilidad en cautiverio, tiene de buena aceptación y está disponible en los laboratorios del noroeste del país.

Se desarrolló un ciclo de producción que comprendió del 10 de noviembre del 2017 al 24 de mayo del 2018, con una duración de 195 días. La densidad de siembra que se utilizó para ambos módulos fue de 60 peces/m³, lo que da un total de 1,260 tilapias por modulo con una talla promedio de 77.48±15.26 g.

7.4.1.1. Monitoreo de la calidad del agua

De acuerdo a Reid y Arnold (1992), el monitoreo del agua se realizó con el propósito de verificar que las condiciones del agua fueran adecuadas para el desarrollo de la especie. Los parámetros monitoreados se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de calidad del agua monitoreados durante el ciclo de cultivo

Parámetro	Hora	Frecuencia
Oxígeno (mg/L)	2 veces al día (06:00 y 18:00)	Diariamente
Temperatura (°C)	2 veces al día (06:00 y 18:00)	Diariamente
pH	2 veces al día (06:00 y 18:00)	Diariamente
Conductividad Eléctrica	2 veces al día (06:00 y 18:00)	Diariamente
N-NH ₃ ⁻ (mg/L)	1 vez al día (12:00-13:00)	Una vez a la semana
N-NO ₂ ⁻ (mg/L)	1 vez al día (12:00-13:00)	Una vez a la semana
N-NO ₃ ⁻ (mg/L)	1 vez al día (12:00-13:00)	Una vez a la semana
Sólidos suspendidos (mg/L)	1 vez al día (12:00-13:00)	Una vez a la semana

El oxígeno disuelto y la temperatura se midieron con un oxímetro YSI modelo 55 (Ohio, USA), mientras que para la conductividad eléctrica y pH se usó un potenciómetro combo HANNA. Para el análisis de nutrientes (N-NH₃⁻, N-NO₃⁻ y N-NO₂⁻) y sólidos

suspendidos se utilizaron un fotómetro Spectroquant-NOVA 60 marca Merck y un espectrofotómetro de microplacas Epoch.

Las muestras de agua para el análisis de los parámetros que se indican en la tabla y sólidos suspendidos, fueron tomadas en los tanques de cultivo de tilapia, a la salida de las camas con espinaca de agua y lechuga. Las muestras de agua para los análisis de NH₃-N, NO₂-N, NO₃-N y sólidos suspendidos se almacenaron en botellas de plástico (500 ml) para posteriormente ser refrigeradas. Para el análisis de los nutrientes y sólidos el agua fue filtrada empleando filtros de fibra de vidrio marca Whatman GF/F de 47 mm de diámetro.

7.4.1.2. Alimentación

La alimentación de las tilapias en ambos módulos se realizó manualmente, iniciando con un porcentaje de alimentación del 4% de la biomasa, mismo que fue disminuyendo cada 15 días hasta finalizar el cultivo en 1.6%. Durante las primeras 13 semanas de cultivo se suministró alimento comercial (nutripec-engorda 4.4 mm: proteína 32%, grasa 6%, fibra cruda 5% y ceniza 10.5%, Cargill) y de la semana 14 a la 26 se empleó otro tipo de alimento (nutripec-engorda 5.5 mm: proteína 25%, grasa 4%, fibra cruda 7.5% y ceniza 15%, Cargill).

La cantidad de alimento se suministró diariamente distribuida en tres raciones (07:00, 13:00 y 17:00). Finalmente se determinó el factor de conversión alimenticia (FCA) con la siguiente ecuación, de acuerdo a Endut *et al.* (2010).

$$\text{FCA} = \frac{\text{Alimento total agregado (kg)}}{\text{Biomasa total cosechada (kg)}}$$

7.4.1.3. Crecimiento y cosecha

El muestreo de crecimiento se realizó quincenalmente con una atarraya de 9 m² de diámetro. El mínimo de tilapias que se muestrearon fue de 30 organismos/tanque/módulo. Se registró el peso (g) y talla (cm) empleando una balanza digital marca OHAUS (capacidad de 5 kg) y un ictiómetro (30 cm de longitud).

La cosecha se realizó vaciando el agua de cada tanque y recolectando las tilapias con una red cuchara para ser depositadas en una tina de fibra de vidrio, las tilapias cosechadas fueron pesadas y medidas de una por una en ambos módulos.

Con la información recabada se determinó la tasa específica de crecimiento (TEC) con la ecuación plantada por Endut *et al.* (2010).

$$\text{TEC (\%)} = \frac{(\text{Ln peso medio final} - \text{Ln peso medio inicial}) \times 100}{\text{Días de cultivo}}$$

7.4.2. Cultivo de espinaca de agua (*Ipomoea acuática*)

El cultivo de la espinaca de agua se realizó de acuerdo a lo especificado en el apartado de descripción y funcionamiento del sistema, se llevó a cabo del 10 de noviembre del 2017 al 30 de mayo del 2018. La siembra se hizo mediante podos cortados de una planta madre, los podos se trasplantaron en cada cama a una separación de 0.20 m entre planta y planta (25 plantas/m²). Una vez que la planta alcanzó los 0.30 m de

altura se inició con el primer corte en el mes de enero del 2019, realizando un corte mensual hasta finalizar en el mes de mayo.

En cada corte realizado, la espinaca de agua fue pesada con una balanza digital OHAUS (5 kg), con la información recabada se calculó: producción total, rendimiento (kg/m^2) y ton/ha .

7.4.3. Cultivo de lechuga (*Lactuca sativa*)

Se desarrolló en dos ciclos de producción, en ambos ciclos para iniciar con el cultivo se efectuó la siembra de la semilla en 3 charolas (germinadoras) de poliestireno con 200 cavidades, cada charola se llenó con un sustrato de petemos y se tapó con vermiculita para mantener la humedad del sustrato, se depositó una semilla por cavidad y durante esta etapa se regaron con agua una vez al día hasta que apareció el primer par de hojas verdaderas (7-10 días), de aquí en adelante las pequeñas plantas se regaron dos veces al día (08:00 y 16:00) con una solución diluida de fertilizante triple 19 a una dosis de 0.5 g/L hasta el trasplante a las camas hidropónicas (después de 30 días).

El trasplante a las camas hidropónicas para el primer ciclo de producción se llevó a cabo del 10 de noviembre del 2017 al 10 de enero del 2018. Posteriormente el sustrato de las camas se lavó y desinfectó con cloro para iniciar el segundo ciclo, trasplantando del 01 de febrero al 01 de abril del 2018, ambos con una duración de 60 días. Al momento de trasplante de las lechugas, estas se sembraron a una distancia entre

planta y planta de 0.334 m colocando 41.6 lechugas a doble hilera por cama (7.44 lechugas/m²)

Al finalizar cada ciclo de cultivo se cosechó la lechuga midiendo y pesando cada planta con una regla y una balanza digital OHAUS (5 kg). Con la información recabada se calculó: producción total, rendimiento (kg/m²) y se extrapoló a ton/ha.

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1. Producción de tilapia

Los datos finales para la producción de tilapia se muestran en la tabla 2. Como se observa la sobrevivencia fue significativamente mayor (prueba *t*, $P < 0.05$) en el M2 $82.32 \pm 1.8\%$ en comparación con el M1 $67 \pm 2.3\%$, en cuanto al FCA, peso promedio individual final y la biomasa cosechada no hubo diferencias significativas entre los módulos (prueba *t*, $P > 0.05$).

En cuanto al volumen de agua requerido, el M1 empleo un total de $60.34 \pm 0.03 \text{ m}^3$, lo cual, difiere (prueba *t*, $P < 0.05$) al volumen total utilizado en el M2 $296.88 \pm 0.68 \text{ m}^3$. De igual manera cuando se determinó el uso del agua (L/kg de tilapia) el módulo uno fue significativamente menor (prueba *t*, $P < 0.05$) que el módulo dos (135.92 y 679.98, respectivamente).

Tabla 2. Datos de producción de tilapia en los módulos M1 y M2

	M1	M2
Días de cultivo	198	198
Meses de cultivo	6.60	6.60
Densidad de siembra (peces/m ³)	60	60
Organismos sembrados	1,260	1,260
Organismos cosechados	844	1,037
Sobrevivencia (%)	67.0 ± 2.3^a	82.32 ± 1.8^b
FCA	1.56^a	1.46^a
Peso inicial (g)	77.84 ± 16.87	77.12 ± 13.65
Peso final (g)	525.89 ± 85.78^a	420.65 ± 109.57^a
Biomasa cosechada (kg)	443.93^a	436.31^a
Volumen de agua usada (m ³)	60.34 ± 0.03^a	296.88 ± 0.68^b
Uso del agua (L/kg de tilapia)	135.92^a	679.98^b
Uso del agua (L/kg de tilapia+kg lechuga+kg de espinaca)	45.96	
Tasa específica de crecimiento (%/día)	0.96	0.86

*Valores con letras superíndices diferentes indican diferencias significativas (prueba *t*, $P < 0.05$)

El crecimiento de tilapia fue semejante para los dos módulos en el desarrollo del cultivo, mostrándose ligeramente por arriba el módulo 1 respecto al módulo 2 en las primeras 6 quincenas, a partir de la séptima quincena se puede observar que los dos módulos presentan un crecimiento similar y a partir de la quincena 12 vuelve a notarse un ligero aumento del crecimiento en el M1 respecto al M2 y así hasta finalizar el cultivo, probablemente esto se debió a una menor sobrevivencia en el M1, por lo tanto, al haber menos organismos en el sistema integrado el crecimiento de las tilapias aumento (Figura 3).

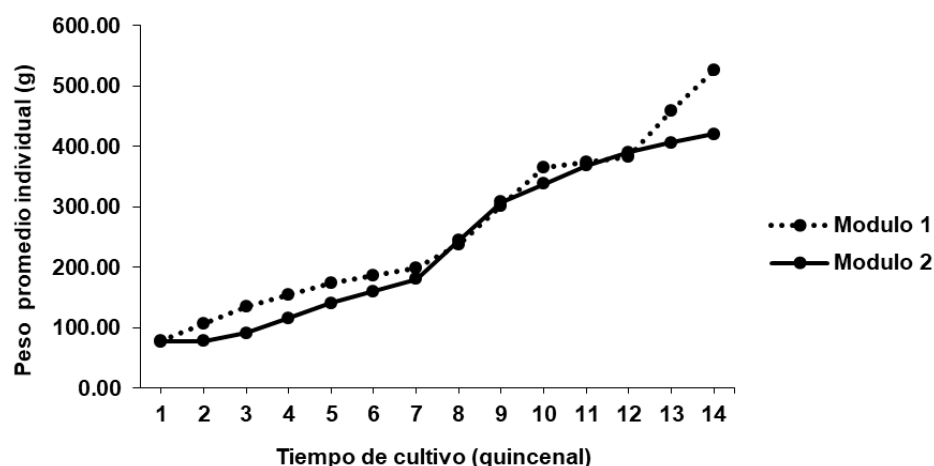


Figura 3. Crecimiento de tilapia para el M1 (Sistema acuapónico) y M2 (Monocultivo)

De acuerdo al Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera del Gobierno de México (SIAP, 2019) las tallas comerciales para la comercialización de la tilapia se clasifican en: chica (250-360 g), mediana (370-500 g) y grande (520-700 g). Con base a lo anterior, la clasificación de tallas obtenidas en este estudio fueron comerciales (≥ 250 g), es decir para el módulo acuapónico el porcentaje de tallas no comerciales fue de 0.0% mientras que para el monocultivo fue de 6.94%, por lo tanto, el % de tallas

comerciales para el M1 y M2 fueron de 100% y 93.06% respectivamente, de nueva cuenta, es probable que esta pequeña diferencia de tallas comerciales se haya debido a la menor sobrevivencia del M1 (tabla 3).

Tabla 3. Distribución de tallas de tilapia alcanzadas en este estudio

Clasificación	Acuaponia	Monocultivo
% Talla no comercial	0.00	6.94
%Talla comercial	100.00	93.06
%Chica	1.09	21.97
%Mediana	11.31	47.98
%Grande	87.59	23.12

La distribución de la talla chica para el M1 fue de 1.09% y para el M2 de 21.97%, la talla mediana alcanzó un 11.31% en el módulo acuapónico, mientras que el monocultivo 47.98%, de igual forma el M1 y el M2 lograron porcentajes de 87.59 y 23.12 respectivamente de tallas grandes, esto probablemente a que en el M1 la menor sobrevivencia obtenida permitió que las tilapias se desarrollaran de una mejor manera (figura 4).

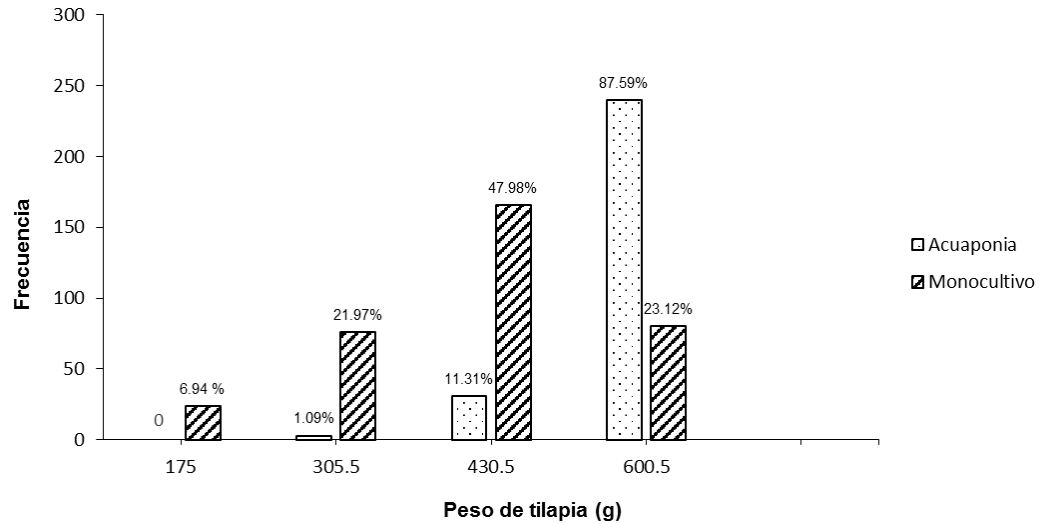


Fig. 4. Distribución de tallas de tilapia para cada módulo de producción

En la tabla 4 se comparan distintas variables de producción de cultivos de tilapia. En los cultivos se muestran densidades de siembra que van desde los 60 hasta 160 peces/m³, el estudio presente es el que menor densidad de siembra manejó, siendo el trabajo de Al-Hafedh *et al.* (2008) el que mayor densidad de siembra utilizó. Se muestran sobrevivencias similares en los distintos estudios, como se puede ver Al-Hafedh *et al.* (2008) son los que mejor sobrevivencia reportan con un 98%. El factor de conversión alimenticia que muestran los diferentes estudios es similar, el FCA del M2 en el estudio presente es uno de los mayores comparado con el del estudio desarrollado por Al-Hafedh *et al.* (2008). El peso inicial es muy parecido en las diferentes investigaciones, por otra parte se muestran diferencias en el peso promedio final individual con valores que van desde 198 g reportado por Vega-Villasante *et al.* (2010) hasta 813.80 g en el estudio de Rakocy *et al.* (2006); en el trabajo presente se reporta un peso promedio final individual de 525.89 g, siendo este un peso aceptable para tallas comerciales. Se reportan diferentes porcentajes en tasa específica de

crecimiento, el estudio de Vega-Villasante *et al.* (2010) fue el que mejor comportamiento mostró, sin embargo el estudio presente muestra los menores porcentajes en cuanto a TEC reportando 0.87 para M2 y 0.98 para M1. Al comparar estadísticamente los dos tratamientos de este estudio no se encontraron diferencias significativas en crecimiento (g/quincena), FCA y peso final (g) de los organismos cosechados en el cultivo ($p>0.05$); pero si existe diferencia en cuanto a sobrevivencia (%) y consumo de agua ($m^3\ kg^{-1}$) para M1 Y M2 ($p<0.05$).

Las tasas de recambio mínimas cobran gran relevancia debido que a nivel mundial se han presentado problemas relacionados con enfermedades e impactos negativos al ambiente a causa de las grandes cantidades de agua que son desechadas producto de las altas tasas de recambios en granjas de cultivos acuícolas (Treece y Hamper, 2000).

El agua utilizada en el sistema acuapónico (M1) fue de $60.34\pm 0.03\ m^3$ para el ciclo de cultivo y de $296.88\pm 0.68\ m^3$ para M2. La eficiencia en el empleo del agua (L/kg de tilapia) para el sistema acuapónico fue de 135.92 y de 679.98 para el M2, cuando se integra la producción de lechuga y la espinaca de agua la eficiencia del uso de agua se reduce considerablemente 45.96 L/kg de tilapia + kg de lechuga + kg de espinaca en comparación a los 679.98 L/kg de tilapia del M2 (Tabla 2). En este trabajo las tasas de consumo de agua en el cultivo de *Oreochromis niloticus* para ambos tratamientos (M1 y M2) mostraron diferencias significativas ($p<0.05$), siendo el M1 el tratamiento que tuvo una menor tasa de consumo de agua por biomasa producida (Tabla 2).

En la tabla 5 se muestran datos de rendimiento por consumo de agua (m³ de agua/ kg de biomasa) de diferentes autores; como se puede observar el rendimiento en el tratamiento de M1 es de los más altos, ya que muestra resultados por encima de los reportados por Al-Hafedh *et al.* (2008) y los que se reportan del tratamiento en el M2 del presente estudio, sin embargo el mejor resultado se muestra en la investigación de Liang y Chien (2013) con un consumo de 20 L/kg. En el desarrollo de esta investigación se muestra que al integrar el cultivo de peces y diferentes hortalizas se logra un menor consumo agua, reportando el uso de 45.96 L/kg de tilapia + kg de lechuga + kg de espinaca.

Tabla 4. Datos de consumo de agua en diferentes sistemas integrados

Especie	Duración (días)	Consumo de agua L/kg	Referencia
Tilapia-Lechuga	180	320.00	Al-Hafedh <i>et al</i> (2008)
Tilapia-Espinaca de agua	28	20.00	Liang y Chien (2013)
Tilapia-Espinaca de agua-Lechuga	198	135.92	Este estudio (sistema integrado)
Tilapia	198	680.43	Este estudio (monocultivo)

Tabla 5. Datos de los factores de producción en el desarrollo de cultivos de tilapia con diferentes densidades de siembra y tiempo de cultivo

Especie cultivada	Densidad (peces/m ³)	Sobrevivencia (%)	FCA	Duración (días)	Peso inicial (g)	Peso promedio final individual (g)	TC g/día	TEC (%)	Referencia
Tilapia de Nilo	77	98	1.70	168	79.20	813.80	4.40	1.40	Rakocy <i>et al</i> (2006)
Tilapia roja	154	90	1.80	168	58.80	512.50	2.70	1.30	Rakocy <i>et al</i> (2006)
Tilapia de Nilo	160	98	1.00	194	11.60	340.60	1.76	1.60	Al-Hafedh <i>et al</i> (2008)
Tilapia de Nilo	80	79	1.66	80	50.00	198.00	2.48	1.72	Vega-Villasante <i>et al</i> (2010)
Tilapia de Nilo	60	67	1.56	198	77.84	525.89	2.70	0.98	Sistema acuaponico (Este estudio)
Tilapia de Nilo	60	82	1.46	198	77.12	420.00	2.16	0.87	Monocultivo (Este estudio)

8.2 Producción de espinaca de agua

La producción de espinaca de agua en el sistema integrado se llevó a cabo del 10 de noviembre del 2017 al 30 de mayo del 2018, obteniendo un peso total cosechado de 810.20 kg en 5 cortes (enero-mayo), lo anterior, da un rendimiento de 22.50 kg/m² lo que significa 224.70 ton/ha de materia verde, debido a que la espinaca de agua tiene un 82% de agua, la producción como materia seca equivale a 40.50 ton/ha (Tabla 6).

Tabla 6. Características de producción de espinaca de agua en el sistema integrado

Total cosechado	810.2	
kg/m ²	2.2	
kg promedio/mes	54.0	
Kg/m ² /año (10 meses)	22.5	
kg/ha	224,733.8	
Ton/ha	224.7	verde
Ton/ha	40.5	seco

En la tabla 7 se muestran diferentes estudios donde se integra el cultivo de peces con espinaca de agua, las distintas investigaciones muestran tiempos de cultivo más bajos que los reportados en el presente estudio por lo que se estimó una producción de 150 días para hacer la comparación. Las producciones reportadas van desde 1.46 ton/ha (Li *et al.* 2016) hasta 224.70 ton/ha producción mostrada en la investigación presente, por otra parte Endut *et al.* (2009) y Enduta *et al.* (2011) reportan 191.78 y 107.00 ton/ha respectivamente, siendo estos resultados los que más se asemejan a los datos mostrados en este estudio (Tabla 7).

Tabla 7. Comparación de cosechas de espinaca de agua en diferentes sistemas integrados

Tipo de cultivo	Tiempo de cultivo (días)	Cosecha (ton/ha)	Referencia
Bagre- Espinaca de agua	150	191.78	Endut <i>et al</i> (2010)
Tortuga china- Espinaca de agua	150	3.12	Li <i>et al</i> (2013)
Carpa plateada-Espinaca de agua	150	2.58	Li <i>et al</i> (2013)
Carpa cabezona-Espinaca de agua	150	1.46	Li <i>et al</i> (2013)
Bagre africano-Espinaca de agua	150	107.00	Enduta <i>et al</i> (2012)
Tilapia-Espinaca de agua	150	224.70	Este estudio

8.3 Producción de lechuga en el sistema integrado

La producción de lechuga se llevó a cabo en dos etapas (ciclo 1 y ciclo 2). El ciclo 1 abarcó del 10 de noviembre del 2017 al 10 de enero 2018 y el ciclo 2 del 01 de febrero al 01 de abril del 2018. La producción total fue de 33.40 kg y 25.49 kg para la primera y segunda etapa, respectivamente, siendo la producción del ciclo 1 mayor al ciclo 2 (t , $P < 0.05$), mientras que el peso promedio individual obtenido por cada lechuga fue 267.24 g para el ciclo 1 y 203.99 g para el ciclo 2 (Fig.5). Lo anterior, dió como resultado una cosecha total en los dos ciclos de 58.90 kg, lo cual equivale a un rendimiento de 35.06 ton/ha (Tabla 8).

Tabla 8. Datos de producción de la lechuga cultivada en el sistema acuapónico

	Ciclo 1	Ciclo 2
Superficie de camas (m ²)	16.80	16.80
Fecha de siembra	10/11/2017 a 10/01/2018	01/02/2018 a 01/04/2018
Densidad de siembra (plantas/m ²)	7.44	7.44
Duración del ciclo en días	60.00	60.00
Peso individual cosechado (g)	267.24 ^a	203.99 ^b
Rendimiento (kg/m ²)	1.99 ^a	1.52 ^b
Rendimiento ton/ha	19.90 ^a	15.20 ^b
Peso total (kg)	33.40 ^a	25.50 ^b
Producción total (kg) en los dos ciclos	58.90	

*Letras superíndices diferentes indican diferencias significativas (t , $P < 0.05$)

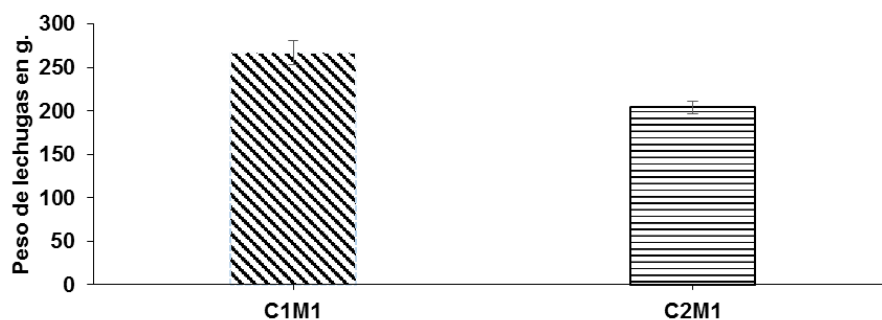


Fig.5. Producción de lechuga del sistema integrado (M1) en dos Ciclos

En la tabla 9 se muestran resultados de producción en sistemas integrados de tilapia y langostino con lechuga, como puede apreciarse la producción de lechuga (ton/ha) cuando se usó el langostino (*Macrobrachium amazonicum*) fueron menores a las reportadas por Moreno-Simón y Zfra-Trelles (2014), Al-Hafedh *et al.* (2008) y en este estudio, probablemente lo anterior puede explicarse debido a que de acuerdo a los resultados de la prueba langostino-lechuga no se producen los suficientes nutrientes para abastecer los requerimientos de la lechuga. De acuerdo a Lima *et al.* (2019) las concentraciones de amonio no ionizado y nitrito (compuestos nitrogenados) fueron 0.14 y 0.05 mg/L respectivamente, lo que representa 89% menos en el N-NH_3^- y 91% más bajo en el NO_2^- en lo reportado por Al-Hafedh *et al.* (2008) en un cultivo de tilapia-lechuga. De igual manera los resultados del cultivo acuapónico tilapia-lechuga muestran un incremento de 50% de amonio no ionizado y 97.5% más en el nitrito (0.28 y 2.04 mg/L) respecto a los resultados de Lima *et al.* (2019).

Por otro lado, la conductividad eléctrica (CE) que de alguna manera mide la concentración total de nutrientes en el agua presentó variaciones similares a los

compuestos nitrogenados cuando se empleó *Macrobrachium amazonicum*, es decir la CE indicada por Lima *et al.* (2019) fue de 166 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mientras que AlHafedh *et al.* (2008) y este estudio alcanzaron una conductividad eléctrica de 2,127 y 890 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente. Aunque en ninguno de los reportes anteriores se analizaron las concentraciones totales de los nutrientes del agua, la baja conductividad del cultivo *Macrobrachium amazonicum-Lactuca sativa* da como resultado una carga de nutrientes que pueden ser insuficientes para la producción de lechuga y por ende los bajos rendimientos alcanzados, por lo tanto, se puede concluir que resulta mejor utilizar la tilapia para un cultivo acuapónico de lechuga y otros, tal y como lo estipulan Love *et al.* (2015), en la revisión internacional a cerca de sistemas acuapónicos que realizaron, en ella encontraron que de las especies acuáticas usadas en sistemas acuapónicos la tilapia se empleó el 69% de las veces, donde el cultivo vegetal predominante es la lechuga (70% de las veces).

Tabla 9. Valores medios de producción de lechuga reportados para diferentes sistemas acuapónicos

Tipo de cultivo	Densidad (peces/m ³)	Densidad (plantas/m ²)	Duración de cultivo (días)	Peso individual (g) de lechuga	producción de lechuga (ton/ha)	Referencia
Sistema integrado de tilapia roja-lechuga	50	50	90	118.20	22.61	Moreno-Simón, Zfra-Trelles (2014)
Sistema integrado tilapia-lechuga	160	42	28	219.33	92.10	Al-Hafedh <i>et al.</i> (2008)
Sistema integrado de langostino-lechuga	40	14.10	36	50.97	9.57	Lima <i>et al.</i> (2019)
Sistema integrado de langostino-lechuga	80	16	36	61.57	11	Lima <i>et al.</i> (2019)
Sistema integrado de langostino-lechuga	120	18.60	36	76.15	19.25	Lima <i>et al.</i> (2019)
Sistema integrado de tilapia con lechuga	60	7.44	120	235.60	33.04	Este estudio

8.4 Calidad del agua

Mantener una buena calidad del agua es muy importante para que el cultivo de tilapia tenga éxito. Tener mala calidad del agua afecta directamente a la salud y crecimiento, ocasionando enfermedades y hasta la muerte de los organismos. La calidad del agua se ve afectada por algunos factores ambientales y procesos biológicos.

8.4.1. Temperatura

El rango óptimo para la producción de tilapia es de 28-32 ° C, cuando disminuye a los 15 ° C los peces dejan de comer y cuando desciende a menos de 12 ° C no sobreviven mucho tiempo. Durante los meses fríos los peces dejan de crecer y el consumo de alimento disminuye, cuando se presentan cambios repentinos de 5 ° C en la temperatura del agua, el pez se estresa y algunas veces muere. Cuando la temperatura es mayor a 30 ° C los peces consumen más oxígeno.

Como se observa en las figuras 6 y 7 la temperatura en el estudio presentó una variabilidad esperada en relación a las condiciones climatológicas del sitio de estudio, mostrando las temperaturas más altas en el último mes (mayo) de cultivo y las más bajas en los meses del invierno. Las temperaturas a las 6:00 horas en M1 oscilaron entre 17.46 y 24.87 °C, con un promedio de 21.63 °C, mientras que a las 18:00 horas variaron entre 20.22 y 28.61 °C con una media de 24.82 °C, en el M2 las temperaturas a las 6:00 horas variaron entre 18.5 y 25.9 °C, con un promedio de 21.5 °C y a las 18:00 horas variaron entre 21.20 y 28.20 con promedio de 24.30 °C. En ambos módulos las temperaturas más bajas se registraron en la semana 11 en el horario

matutino, 17.46 y 18.5 °C para M1 y M2, respectivamente, sin embargo las temperaturas más altas se registraron en la semana 29 del M1 y 25 del M2 en el horario vespertino, con 25.10 y 24.90 °C para M1 y M2, respectivamente.

Se mostraron temperaturas dentro de los límites adecuados, a excepción del periodo matutino comprendido entre las semanas 5 y 16, donde los resultados están por debajo de los límites óptimos, pero por encima de los límites letales que propone Saavedra-Martínez (2006). Al aplicar las pruebas estadísticas se determinó que el horario de las 6:00 y 18:00 horas en el M1 y M2 no muestran diferencias significativas ($P>0.05$) por otra parte en el M1 y M2 se muestran diferencias al comparar el horario matutino con el vespertino.

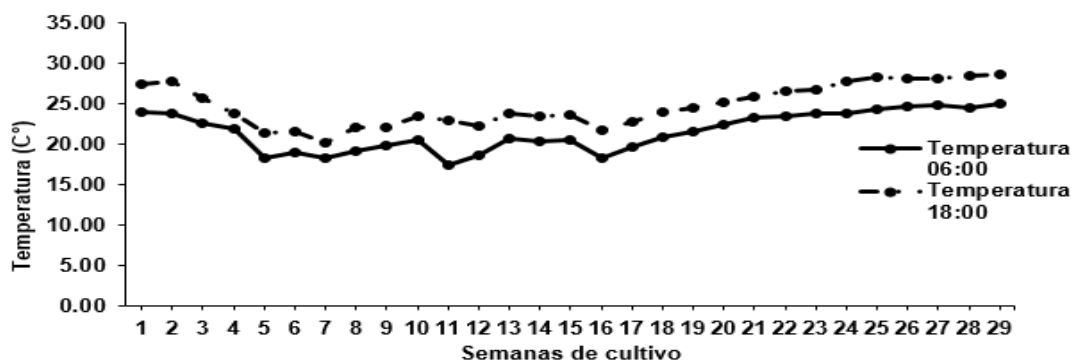


Figura 6. Variación de temperatura en M1 (sistema integrado) para el horario de la mañana y tarde

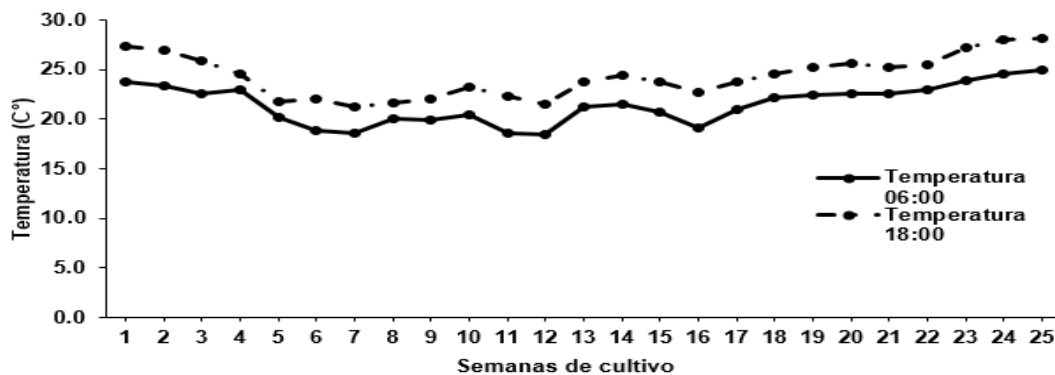


Figura 7. Variación de temperatura en M2 (monocultivo) para el horario de la mañana y tarde

8.4.2 pH

El pH interviene determinando si un agua es ácida o alcalina, la tilapia crece mejor en aguas de pH neutro o levemente alcalino. Su crecimiento se reduce en aguas ácidas y toleran hasta un pH de 5; un alto valor de pH (de 10 durante las tardes) no las afecta y el límite, aparentemente, es de 11. Con valores de 6.5 a 9 se tienen condiciones adecuadas para el cultivo (Saavedra-Martínez 2006).

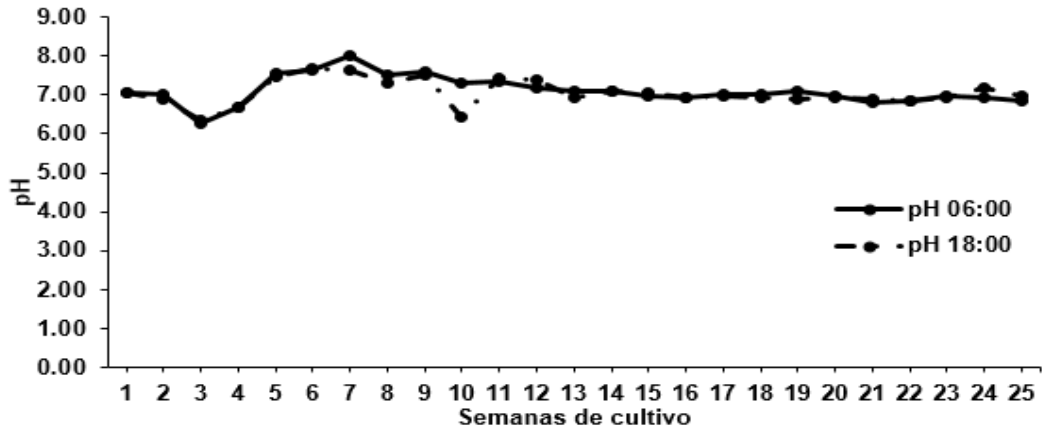


Figura 8. Variación de pH en M2 (monocultivo) para el horario de la mañana y tarde.

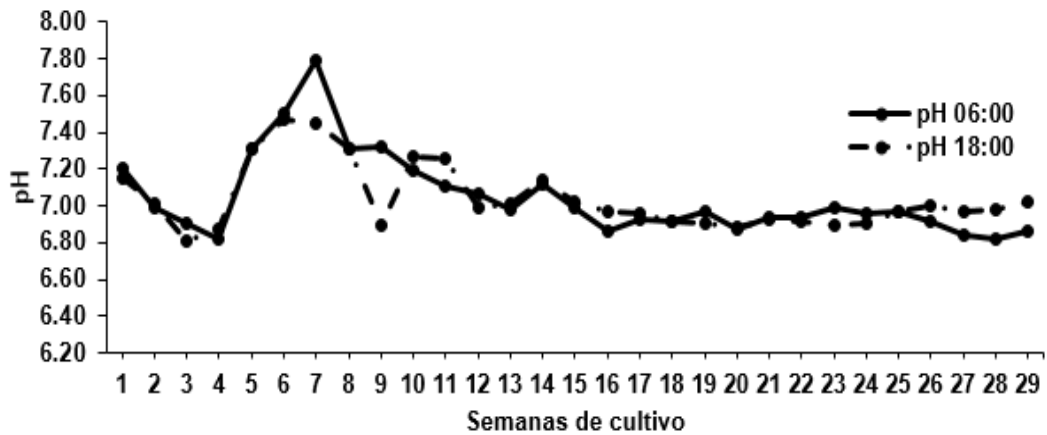


Figura 9. Variación de pH en M1 (sistema integrado) para el horario de la mañana y tarde

En este estudio los valores de pH en M1 variaron entre 6.82 Y 7.79 a las 6:00 horas con un promedio general de 7.05 ± 0.22 , mientras que a las 18:00 horas los resultados oscilaron entre 6.81 y 7.47 con un promedio general de 7.04 ± 0.18 ; y en el M2 se

presentó un promedio general de 7.10 ± 0.36 con mínimos y máximos de 6.25 y 8.0 para el horario matutino, a su vez, en el horario vespertino el pH presentó variaciones entre 6.35 y 7.68, con un promedio de 7.05 ± 0.33 (Fig. 8 y 9).

No se observaron diferencias significativas ($P > 0.05$) entre el sistema integrado y el monocultivo para los dos horarios. En ninguno de los casos los valores de pH representaron un peligro para los organismos con respecto al rango óptimo pues se mantuvieron entre 6.25 y 7.79.

8.4.3. Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto (OD) es considerado como la variable más crítica en la calidad del agua en un estanque, debido a que los organismos acuáticos lo requieren para su respiración, proceso fisiológico en el cual las células oxidan los carbohidratos y liberan energía indispensable para lograr metabolizar los nutrientes del alimento (Saavedra-Martínez 2006).

La tilapia es capaz de sobrevivir a niveles bajos de oxígeno disuelto (1,0 mg/L), pero esto provoca estrés, siendo la principal causa de origen de infecciones patológicas. Para mantener un cultivo exitoso de tilapia, los valores de oxígeno disuelto deben estar por encima de los 4 mg/L. Valores menores al indicado, reducen el crecimiento e incrementa la mortalidad (Nicovita, 2002).

En este estudio, las concentraciones de OD en M1 variaron entre 4.21 y 6.20 mg/L a las 6:00 horas con un promedio de 5.14 mg/L, y a las 18:00 horas entre 3.63 y 5.95 mg/L con un promedio 4.85 mg/L; mientras que en M2 el OD oscilo entre 3.84 y 6.64

mg/L en la mañana y una fluctuación de 3.32 y 5.85 mg/L por la tarde, con promedios de 5.33 y 4.87 mg/L para la mañana y tarde respectivamente (Fig. 10 y 11).

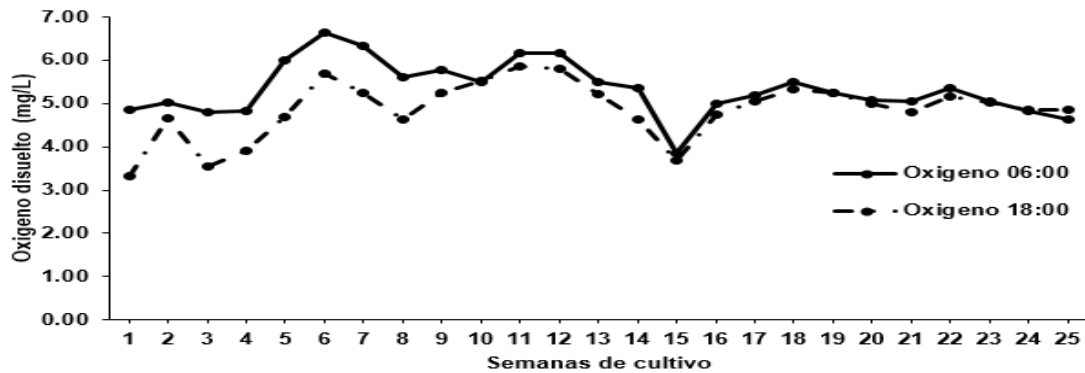


Figura 10. Variación del oxígeno disuelto en M2 (monocultivo) para el horario de la mañana y tarde

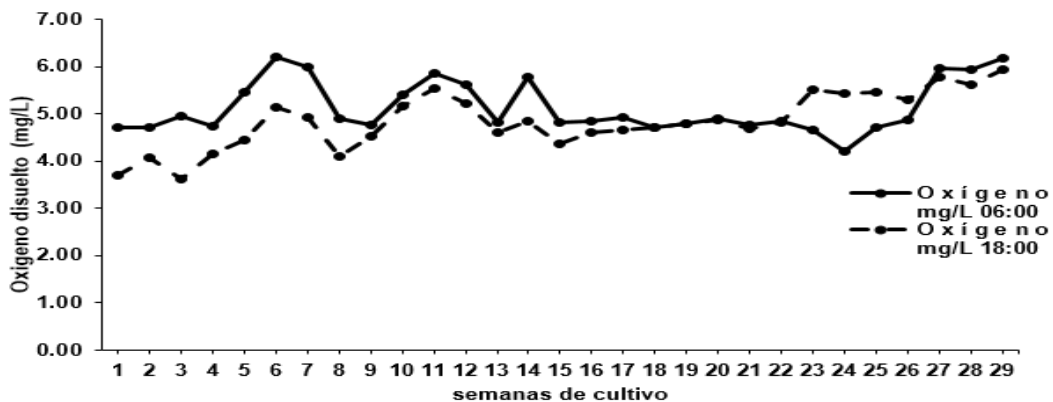


Figura 11. Variación del oxígeno disuelto en M1 (sistema integrado) para el horario de la mañana y tarde

De acuerdo a los promedios semanales, el mínimo registrado a las 6:00 horas fue de 4.21 mg/L para M1 y 4.98 mg/L para M2, en las semanas 24 y 15 respectivamente, mientras que los máximos fueron de 6.20 mg/L y 6.64 mg/L para el M1 y M2 respectivamente, ambos en la semana 6. Para las lecturas de las 18:00 horas los

promedios de las concentraciones mínimas fueron de 3.63 y 3.32 mg/L en la semana 3 del M1 y semana 1 del M2, se presentaron las temperaturas máximas de 5.95 y 5.85 mg/L en el M1 y M2 respectivamente, en las semanas 29 en el sistema integrado y la semana 11 del monocultivo.

El oxígeno disuelto se encuentra muy ligado a la variable de temperatura debido a que esta afecta la concentración de los gases disueltos, especialmente al oxígeno, el cual tiende a disminuir conforme la temperatura aumenta, lo que se refleja en la disponibilidad de este último para los organismos en cultivo (Tucker y Boyd, 1985).

En este estudio la aireación fue constante por lo que la temperatura en este caso no influyó de manera considerable entre las horas de la mañana y la tarde, no existen diferencias significativas ($p < 0.05$) en M1 entre los horarios matutino y vespertino, mientras que el horario matutino del M2 muestra diferencias significativas ($p > 0.05$) en cuanto al horario vespertino y de igual manera los datos del monocultivo muestran diferencia a los horarios de las 6:00 y 18:00 de M1.

8.4.4. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica, se define como la capacidad que tienen las sales inorgánicas en solución para conducir la corriente eléctrica, así cuanto más cantidad de sales, mayor es la conductividad.

Se muestra en las Figuras 12 y 13 que la conductividad eléctrica tuvo una oscilación en el M1 entre 0.46 y 1.00 ms/cm para las 6:00 horas, con un promedio general de 0.89 ms/cm; mientras que a las 18:00 horas vario entre 0.46 y 0.98 ms/cm, con promedio general de 0.89 ms/cm. Para el M2 las variaciones vespertinas fueron entre

0.75 y 0.93 ms/cm con un promedio de 0.84 ms/cm, mientras que por la tarde fluctuaron entre 0.74 y 0.96 ms/cm con promedio de 0.85 ms/cm. Los datos reportados muestran que no existen diferencias significativas ($P>0.05$) en ninguno de los horarios para los dos módulos del estudio.

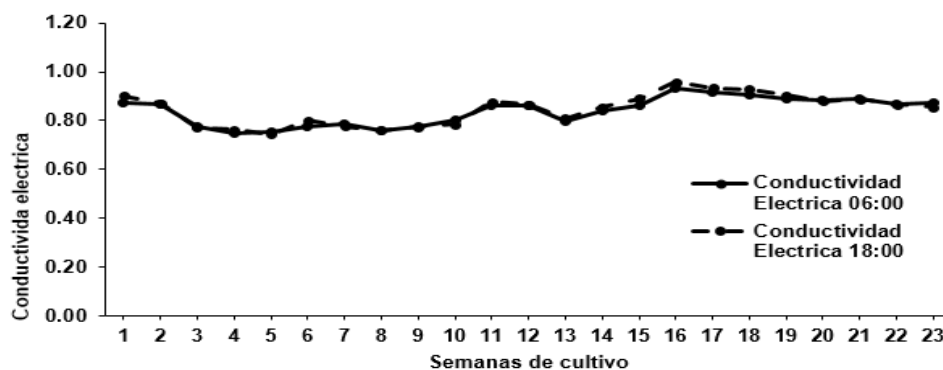


Figura 12. Variación de la conductividad eléctrica en M2 (monocultivo) para el horario de la mañana y tarde

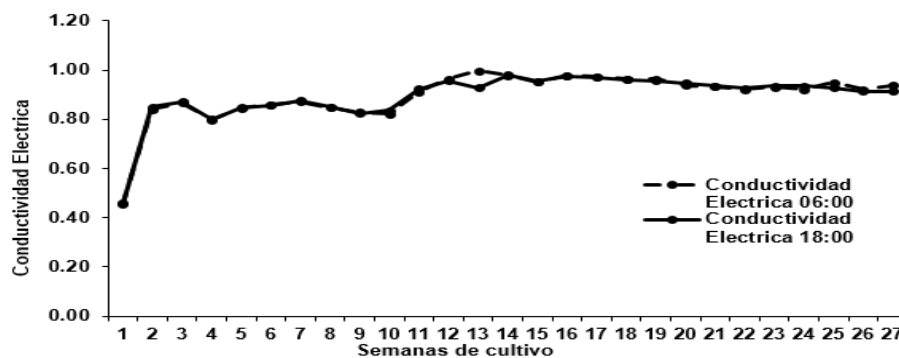


Figura 13. Variación de la conductividad eléctrica en M1 (sistema integrado) para el horario de la mañana y tarde

8.5 Compuestos nitrogenados

El caso del N se vuelve especial, este entra al sistema principalmente por el alimento que se da a los peces, por desechos metabólicos (excreción directa por las branquias

y orina) y por el alimento que no consumen. De manera natural el N se va oxidando y transformando en diferentes formas de N con la acción de diferentes microorganismos (bacterias).

El NH_3^- se convierte a nitrito (NO_2^-) y este a nitrato (NO_3^-) por que intervienen en el proceso bacterias del género nitrosomonas y nitrobacter, respectivamente. Las formas de NH_3^- y NO_2^- son tóxicas en pequeñas concentraciones para los animales acuáticos y todas las formas de N pueden ser usadas por las plantas como nutrientes para crecer, pero el NH_3^- y NO_3^- son preferidas. Aunque la toxicidad de NH_3^- y el NO_2^- depende de la edad y la especie del pez, se considera que niveles por debajo de 0.1 mg/L son seguros para un buen desarrollo de los organismos en cultivo (Van Wyk 1999, Nicovita 2002, Somerville *et al.* 2014).

La acumulación de N en el agua, así como del resto de los nutrientes que genera el alimento de los peces, deterioran la calidad de la misma y para mejorarla se pueden seguir dos caminos: a) liberar una parte del agua mediante recambios diarios a cuerpos receptores (lagos, ríos, presas, esteros o mar) para reponerla con agua nueva de mejor calidad y b) tratar el agua ya sea usando un sistema de recirculación acuícola (tratamiento con sedimentadores filtración biológica, filtración mecánica, carbón activado, fraccionadores de espuma y sistemas de desinfección) o emplear la bioremediación con plantas usando los denominados sistemas acuapónicos (Ingram *et al.* 2000, Stevenson *et al.* 2010, Somerville *et al.* 2014, Matheus *et al.* 2019).

8.5.1 Concentración de amonio

La variación de amonio no ionizado en el periodo de cultivo para el sistema acuapónico se puede ver en la figura 14. La concentración del amonio en los tanques de M1 se mantuvo por encima de las concentraciones encontradas en el efluente que sale de las camas con espinaca y lechuga, de igual forma la concentración que sale de las camas de espinaca es mayor al efluente que sale de las camas con lechuga. En los tanques, la concentración de amonio fue superior ($P < 0.05$) a los efluentes de espinaca y lechuga, registrando una concentración mínima de 0.06 mg/L y una máxima de 0.67 mg/L con un promedio de 0.28 mg/L, para el efluente de las camas de espinaca la concentración mínima reportada fue de 0.04 mg/L, 0.19 mg/L y 0.10 mg/L, como máxima y media respectivamente, no encontrando diferencias significativas ($P > 0.05$) respecto al efluente de las camas con lechuga, donde se reporta una concentración mínima de 0.01 mg/L y una máxima de 0.13 mg/L con promedio de 0.06 mg/L.

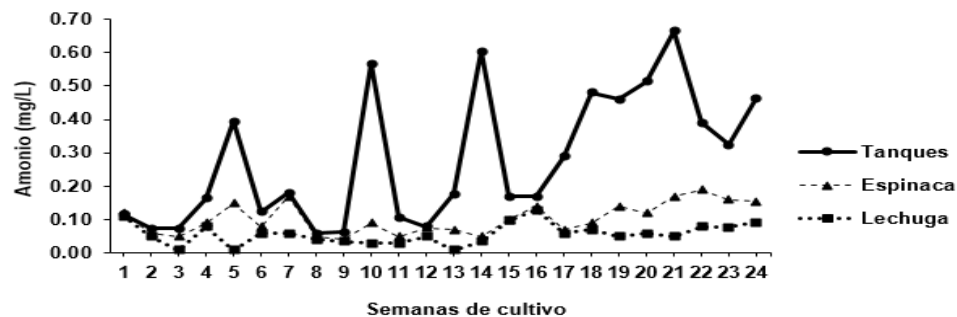


Figura 14. Variación del amonio no ionizado en el M1 (sistema integrado) durante el ciclo de cultivo

Después de que el efluente de los tanques con tilapia pasó por las camas de espinaca se removió el 48.41% de la concentración de amonio de los tanques y cuando el efluente de las camas de espinaca paso por las camas de lechuga se eliminó un 36.99% de la concentración de N-NH_3^- proveniente de las camas de espinaca, no existiendo diferencias significativas (t , $P < 0.05$) entre la espinaca y la lechuga para la remoción de amonio no ionizado. En total el sistema espinaca- lechuga fue capaz de remover el 85.40% de la concentración de N-NH_3^- presentada en los tanques de cultivo de tilapia, lo cual, permitió recircular el agua hacia dichos tanques manteniendo el amonio no ionizado en niveles adecuados para la especie.

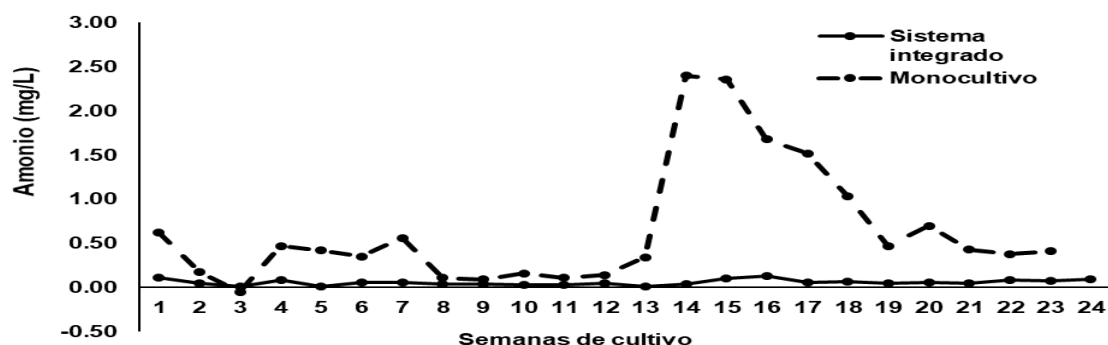


Figura 15. Variación del amonio no ionizado en el M1 (sistema integrado) y M2 (monocultivo) durante el ciclo de cultivo

Al comparar el M1 (sistema acuapónico) con el M2 (monocultivo) la concentración promedio de amonio fue menor (t , $P < 0.05$) en el M1 (0.06 mg/L) que para el M2 (0.65

mg/L) demostrando con esto la efectividad de las plantas de espinaca y lechuga para tratar el efluente del cultivo de tilapia (Fig. 15).

La remoción de amonio no ionizado (85.40%) en el sistema acuapónico probado en el presente estudio fue mejor que los porcentajes de remoción reportados por otros autores, sin embargo, en dichos reportes solo trabajaron con una especie vegetal a diferencia del presente estudio, en el cual se emplearon dos vegetales (espinaca de agua y lechuga), si se compara la remoción solo de la espinaca de agua los resultados de esta investigación dicen que la remoción de N-NH_3^- es más baja a la tasa de remoción indicada en diferentes estudios, por ejemplo, en la tabla 11 se observan reportes de remoción de amonio no ionizado usando la espinaca de agua, como puede verse la variación fue de 71 a 81.90% contra un 48.41% en nuestro trabajo. Quizás lo anterior se debió a que en dichos estudios el tiempo de retención del agua varió de 2.06 a 216 horas, mientras que este sistema fue de flujo constante, al haber un mayor tiempo de retención permite que el agua este más tiempo en contacto con las plantas, logrando con ello una mayor remoción de nutrientes, en este caso N-NH_3^- (Enduta *et al.* 2011).

Tabla 10. % de remoción de nitratos, nitritos y amonio en diferentes sistemas acuapónicos

Tipo del cultivo	Eliminación de nitrato %	Eliminación de nitrito %	Eliminación de amonio%	Referencia
Bagre-Espinaca de agua	64.9	75	-	Endut et al (2010)
Langosta-Espinaca de agua	28.86	70.1	72.2	Effendi <i>et al</i> (2015)
Langosta-Lechuga	21.7	-	79.56	Effendi <i>et al</i> (2015)
Bagre-Espinaca de agua	48.00	78.50	71.00	Endut et al (2009)
Tilapia-Lechuga	22.86	28.64	29.36	Wahyuningsih et al (2015)
Bagre Africano-Mostaza verde	78.66	76.00	72.43	Enduta et al (2012)
Bagre Africano-Espinaca de agua	83.14	87.58	81.90	Enduta et al (2012)
Tilapia-Espinaca de agua	55.47	52.19	48.41	Este estudio
Tilapia-Espinaca de agua-Lechuga	69.10	97.20	85.40	Este estudio

8.5.2 Concentración de nitrito

Como se explicó anteriormente los nitritos al igual que el amonio no ionizado son compuestos nitrogenados que resultan tóxicos en concentraciones bajas (<0.1 mg/L) para los organismos acuáticos en cultivo. El exceso de nitritos en el agua afecta directamente el transporte de oxígeno en la sangre ya que la hemoglobina se transforma en metahemoglobina perdiendo la capacidad para transportar oxígeno y entonces la sangre se vuelve café ocasionando la enfermedad denominada de la “sangre café”, esta provoca que los organismos acuáticos mueran por insuficiencia de oxígeno (Durborow *et al.* 1997).

Como se puede observar en la figura 16, la concentración de nitrito en los tanques del M1 se mantuvo por encima de las concentraciones encontradas en el efluente que sale de las camas con espinaca y lechuga, de igual forma la concentración que sale de las camas de espinaca es mayor al efluente que sale de las camas con lechuga. En los

tanques la concentración de nitrito fue superior estadísticamente ($P < 0.05$) a los efluentes de espinaca y lechuga, registrando una mínima de 0.60 mg/L y un máximo de 2.97 mg/L con un promedio de 2.04 mg/L, para el efluente de las camas de espinaca la concentración mínima reportada fue de 0.31 mg/L, 2.14 mg/L y 0.89 mg/L, como máxima y media respectivamente, no encontrando diferencias significativas ($P > 0.05$) respecto al efluente de las camas con lechuga, presentando estas un mínimo y un máximo 0.09 y 1.28 mg/L respectivamente con promedio de 0.51 mg/L.

Después de que el efluente de los tanques con tilapia pasó por las camas de espinaca estas removieron el 52.19% de la concentración de nitrito de los tanques y cuando el efluente de las camas de espinaca paso por las camas de lechuga se eliminó un 45.70% de la concentración de nitrito proveniente de las camas de espinaca, no existiendo diferencias significativas (t , $P < 0.05$) entre la espinaca y la lechuga para la remoción de nitrito. En total el sistema espinaca- lechuga fue capaz de remover el 97.90% de la concentración de nitrito presente en los tanques de cultivo de tilapia, lo cual, permitió recircular el agua hacia dichos tanques manteniendo la calidad del agua de manera adecuada para las tilapias respecto al nitrito.



Figura 16. Variación del nitrito en el M1 (sistema integrado) durante el ciclo de cultivo

Al comparar el M1 (Sistema acuaponico) con el M2 (Monocultivo) la concentración promedio de nitrito fue menor (t , $P < 0.05$) en el M1 (0.51 mg/L) que para el M2 (2.32 mg/L) demostrando con esto la efectividad de las plantas de espinaca y lechuga para tratar el efluente del cultivo de tilapia (Fig. 17).

La remoción de nitrito (97.20%) en el sistema acuapónico probado aquí fue mejor que los porcentajes de remoción reportados por otros autores, sin embargo, en dichos reportes solo trabajaron con una especie vegetal a diferencia del presente estudio, en el cual se emplearon dos vegetales (espinaca de agua y lechuga), si se compara la remoción solo de la espinaca de agua los resultados en este estudio dicen que la remoción de nitrito es más baja a la tasa de remoción indicada en diferentes estudios, por ejemplo, en la tabla 11 se observan reportes de remoción de nitrito usando la espinaca de agua, como puede verse la variación fue de 70.1 a 87.58% contra un 52.19% en nuestro trabajo. Quizás lo anterior se debió a que en dichos estudios el tiempo de retención del agua varió de 2.06 a 216 horas, mientras que nuestro sistema fue de flujo constante, al haber un mayor tiempo de retención permite que el agua este

más tiempo en contacto con las plantas, logrando con ello una mayor remoción de nutrientes, en este caso nitrito (Enduta *et al.* 2011, Effendi *et al.* 2009). Aunado al tiempo de retención, la densidad de siembra de la espinaca de agua también puede influir en la remoción del nitrito, en los reportes existentes de sistemas acuapónicos con espinaca de agua, esta fue sembrada a una separación de 5 a 8 cm entre planta y planta, mientras que en el estudio presente fue de 20 cm, lo cual provoca que se incremente la cantidad de plantas y como resultado se eleve la absorción de nutrientes del agua de cultivo y se de una mejor purificación de la misma para que pueda ser reutilizada.

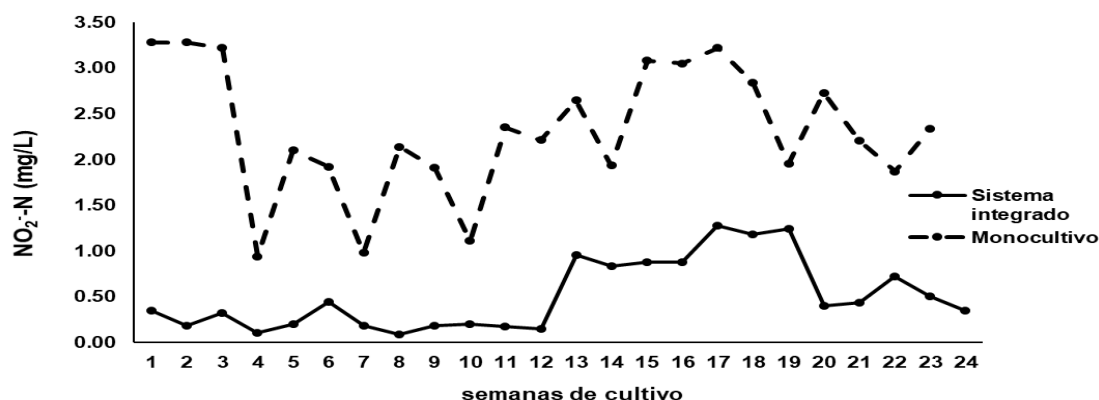


Figura 17. Variación del Nitrito en el M1 (sistema integrado) y M2 (monocultivo) durante el ciclo de cultivo

8.5.3 Concentración de nitrato

Como se puede observar en la figura 18, la concentración de nitrato en los tanques del M1 se mantuvo por encima de las concentraciones encontradas en el efluente que sale

de las camas con espinaca y lechuga, de igual forma la concentración que sale de las camas de espinaca es mayor al efluente que sale de las camas con lechuga. En los tanques la concentración de nitrato fue superior estadísticamente ($P < 0.05$) a los efluentes de espinaca y lechuga, registrando una mínima de 10.57 mg/L y una máxima de 30.27 mg/L con promedio de 14.54 mg/L, para el efluente de las camas de espinaca la concentración mínima reportada fue de 3.85 mg/L, 9.95 mg/L y 6.28 mg/L, como máxima y media respectivamente, no encontrando diferencias significativas ($P > 0.05$) respecto al efluente de las camas con lechuga, presentando estas un mínimo y un máximo de 2.35 y 11.40 mg/L con un promedio de 5.50 mg/L.

Después de que el efluente de los tanques con tilapia paso por las camas de espinaca estas removieron el 55.47% de la concentración de nitrato de los tanques y cuando el efluente de las camas de espinaca paso por las camas de lechuga se eliminó un 13.63% de la concentración de nitrato proveniente de las camas de espinaca, esto demuestra que la espinaca es mejor que la lechuga para remover la concentración de nitrato, lo cual concuerda con Enduta *et al.* (2011) quienes argumentaron que la espinaca de agua fue mejor que la mostaza verde para remover el nitrato en un sistema acuapónico. En total el sistema espinaca- lechuga fue capaz de remover el 69.1% de la concentración de nitrato presentada en los manteniendo la calidad del agua de manera adecuada para las tilapias respecto al nitrato tanques de cultivo de tilapia lo cual, permitió recircular el agua hacia dichos tanques nitrato tanques de cultivo de tilapia lo cual, permitió recircular el agua hacia dichos tanques.

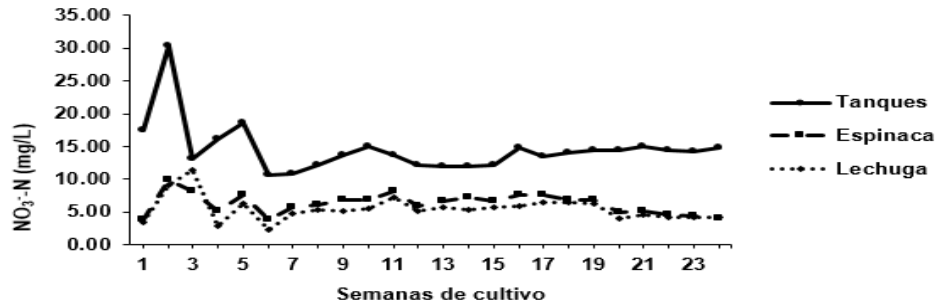


Figura 18. Variación de nitrato en el M1 (sistema integrado) durante el ciclo de producción

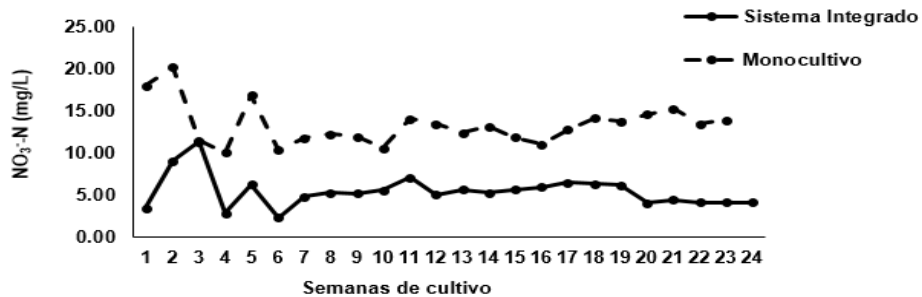


Figura 19. Variación de nitrato en el M1 (sistema integrado) y M2 (monocultivo) durante el ciclo de producción

Al comparar el M1 (sistema acuaponico) con el M2 (monocultivo) la concentración promedio de nitrato fue menor ($P < 0.05$) en el M1 (5.50 mg/L) que para el M2 (13.40 mg/L) demostrando con esto la efectividad de las plantas de espinaca y lechuga para tratar el efluente del cultivo de tilapia (Fig. 19).

La remoción de nitratos (69.10%) en el presente estudio está dentro del promedio reportado por diferentes autores en sistemas similares, solamente, fue rebasado por lo reportado por Enduta *et al.* 2011 en un sistema acuapónico de bagre-espinaca de agua (83.14%), probablemente lo anterior se deba a que en ese cultivo la espinaca se

sembró con una separación de 5 a 8 cm entre planta y planta, mientras que en el estudio presente fue de 20 cm y entonces al haber una mayor cantidad de plantas puede existir una mayor remoción de este nutriente (tabla 11).

8.6 Remoción de sólidos suspendidos

Los sólidos suspendidos en un sistema de acuicultura pueden impactar negativamente a las especies en cultivo, ya que si se encuentran en concentraciones elevadas (> 100 mg/L) pueden tapar las branquias de los animales y provocar la muerte por asfixia. Los sólidos suspendidos se generan principalmente por el alimento agregado, las heces de los peces, el alimento no consumido, polvo circundante y por flóculos orgánicos como: microorganismos y microalgas (Summerfelt y Vinci, 2010).

Como se puede observar en la figura 20, la concentración de sólidos en los tanques de cultivo de tilapia del M1 se mantuvo por encima ($P < 0.05$) de las concentraciones encontradas en el efluente que sale de las camas con espinaca y lechuga, teniendo en los tanques un mínimo de 57.67 mg/L y un máximo de 360 mg/L con promedio de 139.08 mg/L, la espinaca muestra un mínimo de 6.00 mg/L y un máximo de 76.50 mg/L con promedio de 23.52 mg/L, mientras que la lechuga muestra un mínimo de 5.80 mg/L y un máximo de 55 mg/L con promedio de 20.01 mg/L (Fig. 20). La concentración de sólidos suspendidos entre el efluente que sale de las camas de espinaca y la lechuga no presentó diferencias significativas ($P > 0.05$)

Después de que el efluente de los tanques con tilapia paso por las camas de espinaca estas removieron el 81.79% de la concentración de sólidos suspendidos de los tanques

y cuando el efluente de las camas de espinaca paso por las camas de lechuga se eliminó un 11.57% de la concentración de sólidos suspendidos proveniente de las camas de espinaca, esto demuestra que el filtro biomecánico (camas de arena con espinaca) es mejor que el filtro biomecánico de las camas de lechuga para remover la concentración de sólidos suspendidos, lo cual resulta lógico ya que los filtros biomecánicos con espinaca se empacaron con arena (tamaño de partícula de 1 a 2 mm de diámetro) mientras que las camas con lechuga fueron empacadas con zeolita que tiene un tamaño de partícula de 16 a 32 mm de diámetro y al ser el grano de la área más fino que la zeolita se retiene más cantidad de sólidos suspendidos. Lo anterior concuerda con Endut *et al.* (2009) y Schulz *et al.* (2003) quienes reportan una remoción de sólidos suspendidos en filtros biomecánicos con espinaca de agua, junco, Jacinto de agua, lechuga de aguas y la planta de pluma de loro de 74.16%, 97.00%, 39.5%, 29.30% y 21.4%, respectivamente. En total el sistema espinaca- lechuga fue capaz de remover el 93.36% de la concentración de sólidos disueltos resultando este sistema por encima del trabajo de Endut *et al.* (2009) y muy similar al reportado por Schultz *et al.* (2003).

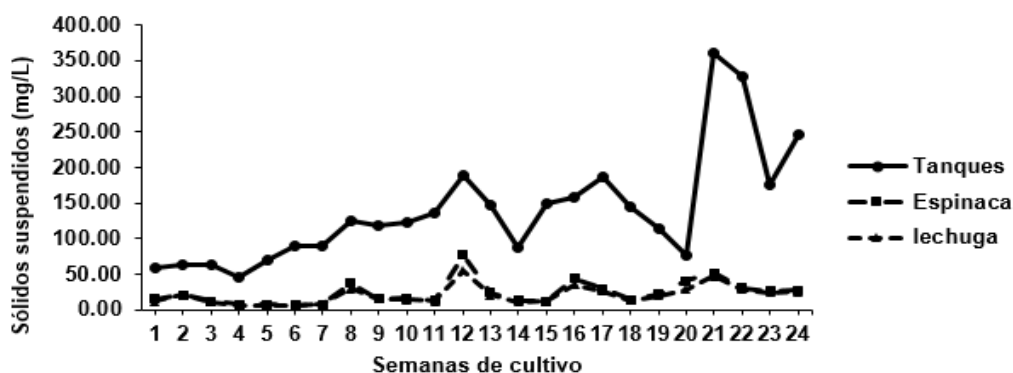


Figura 20. Concentración de solidos suspendidos en el M1 (sistema integrado)

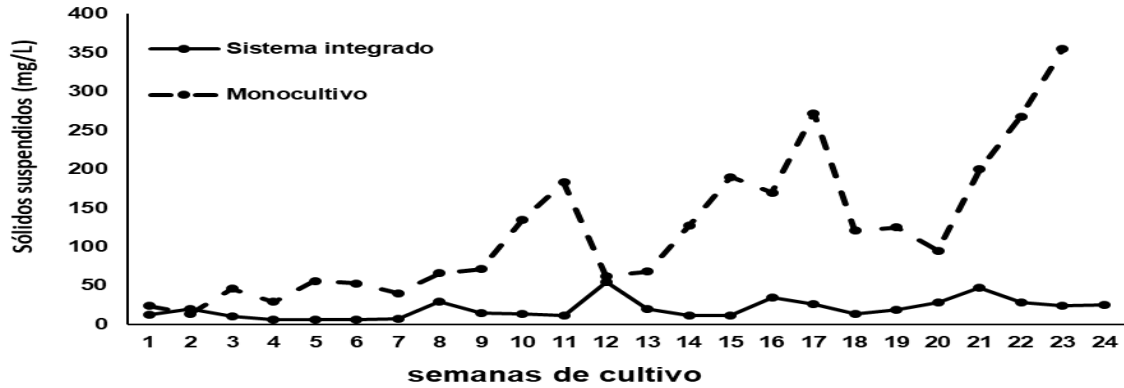


Figura 21. Concentración de sólidos suspendidos en el M1 (sistema integrado) y M2 (monocultivo)

Como se puede observar en la fig. 21, el M1 presenta un mínimo de 6.00 mg/L y un máximo de 55.00 mg/L con promedio de 20.00 mg/L, mientras que el M2 presenta un mínimo de 14.00 mg/L y un máximo de 355 mg/L con promedio de 120 mg/L. El M1 presenta diferencias significativas respecto al M2, mostrando el sistema integrado un 93.36 % en remoción de sólidos; en el desarrollo de este estudio se obtuvieron mejores resultados en cuanto a eliminación de sólidos que los reportados por Endut *et al.* (2009) en el desarrollo de un sistema integrado por bagre y espinaca de agua con el cual se redujo un 74.16 % los sólidos.

Al comparar el M1 (sistema acuapónico) con el M2 (monocultivo) la concentración promedio de sólidos disueltos fue menor (t , $P < 0.05$) en el M1 (20.01 mg/L) que para el M2 (120.43 mg/L) demostrando con esto la efectividad de los biomecánicos de espinaca y lechuga para tratar el efluente del cultivo de tilapia (Fig. 21).

Aunque no fue el objetivo de este trabajo medir la carga bacteriana del sistema (benignos y patógenos), al parecer los filtros biomecánicos removieron buena parte de

dicha carga ya que las plantas de espinaca y lechuga no presentaron signos de patología, esto concuerda con Mori y Smith (2019) en el sentido de que la filtración con arena puede remover más del 90% de la carga bacteriana presente en un efluente acuícola.

9. CONCLUSIONES

- La espinaca de agua y la lechuga mostraron una respuesta positiva al efluente del cultivo de tilapia, en términos de crecimiento y producción. No presentaron signos visibles de enfermedades o desnutrición y alcanzaron un rendimiento de 224.70 ton/ha y 35.06 ton/ha, concordando con los reportes de otras investigaciones en sistemas acuapónicos.
- La remoción de los compuestos nitrogenados (NH_3^- , NO_2^- y NO_3^-) por la espinaca de agua fue de 52.02% y de 31.87% demostrando que la espinaca de agua es mejor que la lechuga para absorber dichos nutrientes. Por otro lado, la utilización de los filtros biomecánicos con espinaca de agua y lechuga fueron capaces de remover el 81.79% y 11.57% de los sólidos suspendidos que se generaron en los tanques del cultivo de tilapia, respectivamente.
- En cuanto al uso del agua el sistema acuapónico demostró ser más eficiente que en el monocultivo de tilapia, ya que la cantidad de agua utilizada fue de 45.96 L por cada kg de biomasa cosechada en comparación a los 680 L usados en el monocultivo para obtener un kg de tilapia. Lo anterior representa un 80% menos de agua.
- El sistema acuapónico tilapia-espinaca de agua-lechuga probado, demostró ser eficiente para tratar el efluente de las aguas provenientes del cultivo de tilapia, ya que se logró una remoción promedio total de 83.89% de los nutrientes (NH_3^- , NO_2^- y NO_3^-) y un 93.36% de los sólidos suspendidos, por lo que se acepta la hipótesis de trabajo.

10. LITERATURA CITADA

- Al-Hafedh, Y., S., Aftab, Alam., y Salaheldin, M., B. (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* Vol. 39, No. 4.
- Busby, K., M., y Lin., L., S. (2014). Scaling aquaponics system. balancing plant up take with fish Output. *Aquacultural Engineering* 63, 39–44.
- Durborow, M., R., Crosby, D., M., y Brunson, M., W. (1997). Nitrite in Fish Ponds Southern regional aquaculture center, publicación 462.
- Effendi, H., Wahyuningsih, S., y Wardiatno, Y. (2015). Nitrogen removal of aquaculture wastewater in aquaponic recirculation system. *Aquaculture, Aquarium, Conservation y Legislation International Journal of the Bioflux Society*, 6(4), 491-499.
- Endut, A., Jusoh, A., Ali, N., Wan Nik, W., B., y Hassan, A. (2009). Effect of flow rate on water quality parameters and plant growth of water spinach (*Ipomoea aquatica*) in an aquaponic recirculating system. *Desalination and Water Treatment* 5, 19–28.
- Endut, A., Jusoh, A., Ali, N., Wan Nik, W., B., y Hassan, A. (2010). A study on the optimal hydraulic loading rate and plant ratios in recirculation aquaponic system. *Bioresource Technology*. 1511-1517.

- Enduta, A., Jusoh, A., Ali, N., y Wan Nikc, W., B. (2011). Nutrient removal from aquaculture wastewater by vegetable production in aquaponics recirculation system. *Desalination and Water Treatment*: 37-41.
- FAO. (2012). *El estado mundial de la pesca y la acuicultura*, Departamento de pesca y acuicultura, Roma. 219 p.
- FAO. (2017) *the state of food and agriculture leveraging food systems for inclusive rural transformation*. FAO, Rome
- Flaherty, M., Szuster, B., y Miller, P. (2000). Low salinity inland shrimp farming in Thailand. *Ambio* 29 (3), 174-179.
- García-Ulloa, M., León, C., Hernández, F., y Chávez, E. (2005). Evaluación de un sistema experimental de acuaponia. *Avances en Investigación Agropecuaria* 9, 1-5.
- Hanson, A., Yabes Jr, J., y Primavera, L., P. (2008). Cultivation of Lemon Basil, (*Ocimum americanum*), in two different hydroponic configurations supplemented with various concentrations of Tilapia aquaculture green water. *BIOS*, 79(3):92-102.
- Ingram, B., A., Gooley, G., J., y Mckinnon, L., J. (2000). Aquaculture-agriculture systems integration: an Australian prospective. *Fisheries Management and Ecology*, 7: 33-43.
- Liang, J, Y., y Chien, Y., H. (2013). Effects of feeding frequency and photoperiod on water quality and crop production in a tilapia and water spinach raft aquaponics system. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 85, 693-700.

- Lima, J., F., Silva, D., S., Midones, B., A., y Carvalho, T. (2019). Performance of an aquaponics system using constructed semi-dry wetland with lettuce (*Lactuca sativa* L.) on treating wastewater of culture of Amazon River shrimp (*Macrobrachium amazonicum*). *Environmental Science and Pollution Research*, 1-13
- Li, W., Ding, H., Zhang, F., Zhang, T., Liu, J., y Li, Z. (2016). Effects of water spinach *Ipomoea aquatic* cultivation on water quality and performance of Chinese soft-shelled turtle *Pelodiscus sinensis* pond culture. *Aquaculture environment interactions*, 8, 567-574.
- Love, D., Fry, J., Li, X., Hill, E., Genllo, L., Semmens, K., y Thompson, R. (2015). Commercial aquaponics production and profitability: Findings from an international survey. *Aquaculture* 435, 67-74.
- Mariscal-Lagarda, M., M., Páez-Osuna, F., Esquer-Méndez, J., L., Guerrero-Monroy, I., Romo del Vivar, A., y Félix-Gastelum, R. (2012). Integrated culture of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) and tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) with low salinity groundwater: management and production. *Aquaculture* 366, 76–84.
- Mariscal-Lagarda, M., M., y Páez-Osuna, F. (2014b). Mass balances of nitrogen and phosphorus in an integrated culture of shrimp (*Litopenaeus vannamei*) and tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) with low salinity groundwater: A short communication. *Aquacultural Engineering* 58, 107– 112.

- Martelo, Jorge., y Lara-Borrero, J., A. (2012). Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales: una revisión del estado de arte. *Ingeniería y ciencia, ing. Cienc.* 221-243.
- Mateus, J. (2009). *Acuaponía: hidroponía y acuacultura, sistema integrado de producción de alimentos. Red de hidroponía, boletín 44.* Lima, Perú.
- Matheus, N., P., Mateus, V., y Antonio, F., M. (2019). Overview of strategies that contribute to the environmental sustainability of pond aquaculture: rearing systems, residue treatment, and environmental assessment tools. *Reviews in aquaculture* 1-18
- McIntosh, D., y Fitzsimmons, K. (2003). Characterization of effluent from an inland, low salinity shrimp farm: what contribution could this water make if used for irrigation. *Aquacultural Engineering* 27, 147–156.
- Montgomery, C., D. (2002). *Diseño y Análisis de Experimentos, Segunda edición.* Editorial Limusa-Willey, México, D.F. 686.
- Moreno-Simón, E., W., y Zafra-Trelles, A. (2014). Aquaponic system growth of lettuce, *Lactuca sativa*, with tilapia farming effluents. *Revista Científica de la Facultad de Ciencias Biológicas*, 34(2), 60-72.
- Mori, J., y Smith, R. (2019). Transmission of waterborne fish and plant pathogens in aquaponics and their control with physical disinfection and filtration: A systematized review. *Aquaculture* (504) 380-395.

- Naegel, L., C., A. (1977). Combined production of fish and plants in recirculating water. *Aquaculture*, 10, 17-24.
- Rakocy, J., E., Losordo, T., M., y Masser, M., P. (1992). Recirculating aquaculture tank production systems: integrating fish and plant culture. Southern Regional Aquaculture Center, publication 452.
- Rakocy, J., E., Masser, M., P., y Losordo, T., M. (2006). Recirculating aquaculture tank production systems: aquaponics—integrating fish and plant culture. Southern Regional Aquaculture Center. Publication no. 454.
- Ramírez, D., Sabogal, D., Gómez, E., Rodríguez, D., y Hurtado, H. (2009). Montaje y evaluación preliminar de un sistema acuapónico goldfish-lechuga. *Facultad de ciencias básicas* 5, 154-170.
- Saavedra, M., A. (2006). Texto de Asignatura Producción Agropecuaria y Acuícola. Carrera Ingeniería Industrial. Departamento de Tecnología y Arquitectura. Facultad de Ciencia, Tecnología y Ambiente. Universidad Centroamericana. Managua, Nicaragua. Marzo, 2006.
- SIAP. (2019). Servicio de información agroalimentaria y pesquera. SIAP.gob.mx. Gobierno federal, SAGARPA. <http://www.siap.gob.mx/index.php>.
- Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., y Lovatelli, A. (2014). Small-scale aquaponic food production: integrated fish and plant farming. *Fisheries aquaculture technical paper* 589. FAO.

- Stevenson, K., T., Fitzsimmons, K., M., Clay, P., A., Alessa, L., y Kliskey, A. (2010). Integration of aquaculture and arid lands agriculture for water reuse and reduced fertilizer dependency. *Experimental Agriculture* 46, 173–190.
- Summerfelt, S., T., y Vinci, B. (2010). Solids capture. pp. 177-243. In: M.B. Timmons and J.M. Ebeling (eds). *Recirculating aquaculture*
- Treece G., D., y Hamper, L. (2000). Achieving environmentally friendly shrimp farming in Texas, USA. *World Aquaculture Magazine*, June, 49-53.
- Tucker, C., S., y Boyd, C., E. (1985). Water quality. In *Water Quality (Channel catfish Culture Ponds)*, ed. C. S. Tucker, developments in Aquaculture and Fisheries Science. Pp.135-227.
- Van Wyk, P. (1999). Farming marine shrimp in freshwater systems: An economic Development strategy for Florida. In *farming marine shrimp in recirculating freshwater systems*.
- Vega-Villasante, F., Cortés-Lara, M., C., Zúñiga-Medina, L., M., Jaime-Ceballos, B., Galindo-López, J., Basto-Rosales, M., E., R., y Nolasco-Soria, H. (2010). Small-scale culture of tilapia (*Oreochromis niloticus*) peri-urban families in Mexico?, alimentary alternative for rural and.