



CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS
DEL NOROESTE, S.C.

Programa de Estudios de Posgrado

ACUICULTURA DE *Oreochromis niloticus* EN SAR Y TBF
INTEGRADA CON HORTICULTURA HIDROPÓNICA EN
SISTEMAS SIN RECIRCULACIÓN.

T E S I S

Que para obtener el grado de

Doctor en Ciencias

Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales
(Orientación en Acuicultura)

P r e s e n t a

Yenitze Elizabeth Fimbres Acedo.

La Paz, Baja California Sur, agosto de 2019.

ACTA DE LIBERACIÓN DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B. C. S., siendo las 12:00 horas del día 20 del Mes de Julio del 2019, se procedió por los abajo firmantes, miembros de la Comisión Revisora de Tesis avalada por la Dirección de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C., a liberar la Tesis de Grado titulada:

Acuicultura de *Oreochromis niloticus* en SAR y TBF integrada con horticultura hidropónica en sistemas sin recirculación.

Presentada por el alumno:

Yenitze Elizabeth Fimbres Acedo

Aspirante al Grado de DOCTOR EN CIENCIAS EN EL USO, MANEJO Y PRESERVACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES CON ORIENTACIÓN EN **ACUÍCULTURA**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron su **APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA



Dr. Francisco Javier Magallón Barajas
Co-Director de Tesis



Dra. Rosalía Servín Villegas
Co-Director de Tesis



Dr. Masato Endo
Co-Tutor

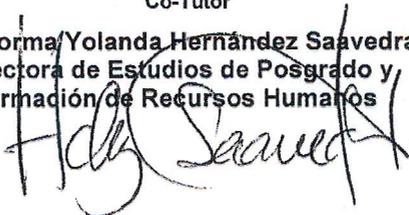


Dr. Kevin M. Fitzsimmons
Co-Tutor



Maurício Gustavo Coelho Emerenciano
Co-Tutor

Dra. Norma Yolanda Hernández Saavedra,
Directora de Estudios de Posgrado y
Formación de Recursos Humanos



Conformación de Comités

Comité Tutorial

Dr. Francisco Javier Magallón Barajas
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C.
Co-Director de Tesis

Dra. Rosalía Servín Villegas
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C.
Co-Director de Tesis

Dr. Masato Endo
Tokyo University of Marine Science and Technology
Co-Tutor

Dr. Mauricio G. Coelho Emerenciano
Universidad Federal de Santa Catarina
Co-Tutor

Dr. Kevin M. Fitzsimmons
University of Arizona
Co-Tutor

Comité Revisor de Tesis

Dr. Francisco Javier Magallón Barajas
Dra. Rosalía Servín Villegas
Dr. Masato Endo
Dr. Mauricio G. Coelho Emerenciano
Dr. Kevin M. Fitzsimmons

Jurado de Examen

Dr. Francisco Javier Magallón Barajas
Dra. Rosalía Servín Villegas
Dr. Masato Endo
Dr. Mauricio G. Coelho Emerenciano
Dr. Kevin M. Fitzsimmons

Suplentes

Dr. Pedro Cruz Hernández
Dr. Alfonso N. Maeda Martínez

Resumen

El crecimiento acelerado de la acuicultura ha permitido el desarrollo de distintos modelos de producción hiperintensiva, donde destacan los sistemas acuícolas de recirculación (SAR) y los sistemas de Tecnología de Biofloc (TBF). La búsqueda de sistemas que permitan producciones hiperintensivas sustentables ha llevado a la generación de sistemas integrados con horticultura hidropónica, sin embargo, la generación y liberación de residuales particulados constituye un reto actual. Con el propósito de integrar sistemas acuícolas de producción hiperintensiva, la presente investigación se divide en cuatro fases: I) cultivo hiperintensivo de tilapia *Oreochromis niloticus* en SAR, II) cultivo hiperintensivo de *O. niloticus* en TBF, III) caracterización de los residuales líquidos y particulados, su mineralización y solubilización, IV) incorporación de los residuales en cultivos de horticultura hidropónica mediante la Técnica de Flujo de Nutrientes (TFN). En los SAR se diseñó un modelo matemático para administrar la ingesta diaria de proteína (IDP), la cual se aplicó durante 34 semanas con tres tratamientos T1: 1.4, T2: 1.2 y T3: 1.0 con ajustes semanales mediante biometrías. Se caracterizó el flujo de nutrientes en la fracción líquida y sólida, la calidad de agua del cultivo, los parámetros de crecimiento y la composición nutricional de los organismos. El crecimiento final fue de 908 ± 57.9 g (T1), 887 ± 113.5 g (T2) y 702.2 ± 38.1 g (T3). La IDP moduló el crecimiento, el FCA, el contenido de lípidos y proteína en el cuerpo completo de los peces ($p < 0.05$), pero no en el contenido de los filetes. La IDP puede ser usada para proveer la proteína necesaria en cada etapa de crecimiento de *O. niloticus*, lo cual favorece la racionalización de alimento, el crecimiento de los organismos y modula el desperdicio y la generación de residuales. Para los sistemas TBF (fase II) se utilizaron 5 tratamientos con tres réplicas, en tres niveles tróficos (T1= quimioautotrófico, T2= heterotrófico, y fotoautotrófico (T3=*Chlorella sorokiniana*-2805, T4= *C. sorokiniana*-2714, T5=*C. spp*) durante cuarenta semanas, con una IDP de 1.2. Se monitorearon los factores de crecimiento (biometrías semanales), la calidad del cultivo (NO_2 , NO_3 , PO_4 , NH_4), se tomaron muestras de organismos (n 9) y de biofloc en el tiempo inicial, semana 10, 20, 30, 40 para análisis elementales, proximales y aminoácidos. La aportación de microalga favoreció el crecimiento y el perfil nutricional de los organismos ($p < 0.05$), además generó un sistema con parámetros más estables ($p < 0.05$), permitió recuperar mayor cantidad de Ca, Mg y P ($p > 0.05$). En la fase III se recuperó, secó pulverizó y analizó (16 elementos) la fracción particulada generada en SAR y TBF, y se procesó a través de cinco métodos de mineralización: a) aeróbico, b) anaeróbico, c) ácido con H_2SO_4 , d) ácido con HNO_3 , e) incineración. El mejor método fue la mineralización ácida con H_2SO_4 , al permitir una mayor recuperación de P, Ca y S ($p < 0.05$), incluso a niveles mayores que los contenidos en las soluciones hidropónicas comerciales de Steiner y Hoagland. En la fase IV se reutilizaron los nutrientes residuales de la fracción

líquida generada en los cultivos TBF, mediante cultivos de horticultura hidropónica en la modalidad TFN sin recirculación con TBF, que incluyeron cinco especies de vegetales de hoja en camas hidropónicas comunes; lechuga (*Lactuca sativa*), albahaca (*Ocimum basilicum*), arugula (*Eruca sativa*), espinaca (*Spinacia olearacea*) y pak choi (*Brassica rapa* susp. *chinensis*). Se encontró que los efluentes del TBF pueden ser aplicados para los cultivos hidropónicos, pero es necesario llevar a cabo complementación de nutrientes con fósforo y hierro, aplicar metodologías para la floculación de la microalgas y procesos de filtración. Los resultados generados durante las cuatro etapas de esta investigación nos han permitido diseñar modelos de sistemas integrados para ser aplicados en zonas áridas. Asimismo, la caracterización de los nutrientes residuales permite diseñar metodologías necesarias para la utilización de la fracción líquida y particulada proveniente de cultivos hiperintensivos de *O. niloticus* en modalidad TBF en cultivos integrados de horticultura hidropónica en modalidad TFN sin recirculación con TBF, así como detectar los retos y los factores que tienen que ser evaluados para la implementación de sistemas integrados de producción integrada hiperintensiva de peces con aprovechamiento completo de los residuales generados mediante horticultura hidropónica.

Palabras clave: *Oreochromis niloticus*, Ingesta Diaria de Proteína, SAR, TBF, fase fotoautotrófica, hidroponía en TFN.

Vo. Bo.



Dr. Francisco Javier Magallón Barajas
Co-Director Tesis



Dra. Rosalía Servín Villegas
Co-Director de Tesis

Summary

The accelerated growth of aquaculture has enabled the development of different production models, including recirculation systems (RASs) and Biofloc Technology (BFT) systems. The search for systems that enable sustainable intensive production has led to the generation of integrated systems, however, the generation and release of particulate waste remains a challenge. In order to integrate hyper-intensive aquaculture production systems, this research is divided into four phases: I) cultivation of hyper-intensive *Oreochromis niloticus* tilapia in RAS, II) *O. niloticus* hyper-intensive cultivation in BFT, III) characterization of liquid and particulate residuals, particulate fraction mineralization, IV) incorporation of residuals into hydroponic horticulture crops in NFT. For RAS, a mathematical model was designed to administer daily protein intake (DPI), which was applied for 34 weeks with three treatments T1:1.4, T2: 1.2 and T3: 1. adjusted weekly using biometrics. The flow of nutrients in the liquid and solid fraction, the water quality of the crop, the growth parameters, the nutritional composition of the organisms were characterized. The final growth was 908 ± 57.9 g (T1), 887 ± 113.5 g (T2) and 702.2 ± 38.1 g (T3). The DPI conditioned the growth, the FCR, the amount of lipids and protein that contained the whole animal ($p < 0.05$), but not the condition of the fillet. DPI can be used to provide the necessary protein at every stage of growth, favoring food rationalization, organism growth and avoiding waste and waste generation. For BFT (Phase II) 5 treatments with three replicates were used, implementing three trophic levels: T1=chemotrophic; T2=heterotrophic; and photoautotrophic (T3=*Chlorella sorokiniana*-2805, T4=*C. sorokiniana*-2714, T5=*C. spp*) for forty weeks. All growth factors (weekly biometrics), crop quality (NO_2 , NO_3 , PO_4 , NH_4) are monitored. Organisms (n 9) and biofloc samples were taken at the initial time, week 10, 20, 30, 40 for elemental, proximal and amino acid analyses. The contribution of microalgae favored the growth and nutritional profile of organisms ($p < 0.05$), in addition to generating a system with more stable parameters ($p < 0.05$), allowed to recover more amounts of Ca, Mg and P ($p > 0.05$). In phase III and recovered particulate fraction generated in RAS and BFT, (dried, sprayed and analyzed (16 elementals) and processed through five mineralization methods: a) aerobic, b) anaerobic, c) acid with H_2SO_4 , d) acid with HNO_3 , and e) incineration. The best method was acid mineralization with H_2SO_4 , it allowed greater recovery of P, Ca, S ($p < 0.05$), even at levels higher than those contained in Steiner and Hoagland commercial hydroponic solutions. In phase IV, the residuals of the liquid fraction of the BFT culture were reused, using lettuce (*Lactuca sativa*), basil (*Ocimum basilicum*), arugula (*Eruca sativa*), spinach (*Spinacia olearacea*) and pak choi (*Brassica rapa* susp. *chinensis*) in NFT hydroponics. Finding that BFT effluents can be applied for hydroponic crops, but it is necessary to carry out the complementation of phosphorus and iron, apply methodologies for microalgae flocculation and filtration processes. The results

generated during the four stages of this research have allowed us to design models of integrated systems to be applied in arid areas. The characterization of the residuals has allowed us to design the methodologies needed for the implementation of the liquid and particulate fraction in attached hydroponics crops by NFT, as well as to detect the challenges and factors that have to be evaluated for the implementation of integrated intensive production systems with full use of the waste generated.

Keywords: *Oreochromis niloticus*, Daily Protein Intake, RAS, BFT, photoautotrophic phase, hydroponics in NFT.

Vo. Bo.



Dr. Francisco Javier Magallón Barajas
Co-Director Tesis



Dra. Rosalía Servín Villegas
Co-Director de Tesis

Dedicatoria

Toda bella historia tiene un final

Hoy concluyo una etapa muy importante en mi vida, que me enseñó a ser paciente, aprovechar cada una de las oportunidades, a retar a la vida y sobre todo a desarrollar la creatividad con conocimiento. Hoy culmina aquel sueño que empezó hace casi cuatro años.

Este trabajo se lo dedico a mi familia y a todas aquellas personas que hicieron posible alcanzar cada una de las metas y sortear cada obstáculo.

**Halina Zelene Fimbres Acedo
Elizabeth Acedo Carrilo
Milton Fimbres Coffey
Rodolfo Garza Torres
Mina Luna**

Agradecimientos

Al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C., por ser el receptor de mi estudio de Posgrado.

Al Consejo de Ciencia y Tecnología por la beca recibida (No. becario 278223), durante mi Doctorado.

Al Proyecto número JPMJSA1405, financiado por la Agencia de Ciencias de Japón (JST) y la Agencia de Japón de Cooperación Internacional (JICA).

A mis co-directores y miembros de comité: Dr. Francisco Magallón Barajas, Dra. Rosalía Servín Villegas, Dr. Masato Endo, Dr. Mauricio Emerenciano y Dr. Kevin Fitzsimmons por todo su tiempo, apoyo y consejos recibido durante mi Doctorado.

Al Dr. Rodolfo Garza Torres por su invaluable apoyo y asesoría durante el desarrollo de este trabajo.

Dra. Emi Kaburagui y el Dr. Kuzasa Itsuo por todo el apoyo recibido, orientación y participación durante el desarrollo de esta tesis.

A mis profesores y tutores durante mis estancias de Investigación en: Tottori University Dr. Yamada Satoshi, Dr. Saito Tadaomi, Tawaga Kotaro, Dr. Ando Takayuki, Dr. Kobayashi Hajime, Dr. Inosako Koji, cDr. Hideki Tanaka, Dra. Maria Luisa Abe, Dra. Shimizu Megumi por su tiempo, sus enseñanzas y su dedicación para que mi estancia fuera provechosa. A Pedro Luna por toda la ayuda recibida durante mis traslados en la estancia en Japón.

Tokyo University of Marine Sciences and Technology (TUMSAT), Dr. Masato Endo, Dr. Iwata Shigehide, Dra. Ayako Matsui, Mihana Matsui, MC. Yoshiko Kanazawa, MC. Ryota Okada, Shuma Terauchi, Tomomi Tsujimura por su orientación, compañía y esfuerzo para sacar adelante todo el trabajo de capacitación y experimentación desarrollado durante mi estancia en Japón.

Universidad Federal de Santa Catarina (UFSC), al Dr. Walter Quadros, al Dr. Luiz Barcelos, a Suelín, Antonio, Samir, Marcelo, Elaine Soares, Victoria Milanez y Ihona por sus enseñanzas, su apoyo incondicional en mi capacitación en los sistemas hidropónicos.

A la Dra. Libia Iris Trejo Téllez, Dra. Paola Magallón Servín, Dra. Melisa López Vela, al Dr. Alfonso N. Maeda Hernandez, Dr. Pedro Cruz Hernandez, Dr. Ilie Sava Racotta Dimitrov, Dr. Enrique Troyo por todo el apoyo recibido durante la realización de este trabajo.

A la Profesora Diana Leticia Dorantes Salas, por el apoyo invaluable durante la revisión y edición de la versión en Inglés de la tesis de Doctorado y por sus recomendaciones, asesorías y edición de los artículos.

A las estudiantes Lic. Carolina Vásquez Pérez, Lic. Natalia Avilés Quintero, Lic. Stephanie Romero Salas por el apoyo recibido durante el montaje, pruebas e inicio del Exp. I.

A los técnicos M.C. Lucina Ledesma López, M.C. María Sofía Ramos Galván, por su apoyo incondicional durante el Experimento I, II y IV, a Lic. Luis Enrique Murillo Moreno por el apoyo recibido durante el Exp. I., a M.C. Alondra Martínez Hernández por el apoyo con el análisis químico de la fracción líquida de los Exp. I y II.

A la M.C. Celia Angelica Martinez Sarmiento, Lic. Luis Alfonso Licea García, Ing. Milton Fimbres Coffey, Lic. Elizabeth Acedo Carrillo por el apoyo, recibido durante el montaje y desarrollo del Exp. II y IV.

A M.C. María Dolores Rondero Astorga, M.C. Sindi Areli Juan Antúnez por el apoyo recibido con la lectura de muestras de proximales utilizadas en el Exp. I y II.

Al Dr. David P. Vega García, Lic. Arturo Guerrero Saldaña, Lic. Meztli Pedraza Mirafuentes, Lic. Christian Alejandro Vargas Domínguez, C Dr. Marco Alejandro Salguero González, Tec. José Raymundo Ceseña Nuñez, Tec. Saúl Edel Briseño Ruiz y Tec. Adrián Jordán Castro. M. C. Tomas López por todo el apoyo recibido para el montaje, procesamiento y cosecha de las plantas en el Exp. IV. A la Dra. Magnolia Montoya por la ayuda recibida en la cosecha de las plantas y al M.C. Gerardo Salvador Reyes por el apoyo recibido en el Exp. II.

A los Dres. Luz- De Bashan y Bashan Yoav[†] y al Laboratorio de Microbiología Experimental por el apoyo recibido y por las muestras donadas de *Chlorella* spp., *C. sorokinana*-2705 y *C. sorokiniana*-2805 utilizadas durante el Exp. II y IV.

A la Dra. Bertha Olivia Arredondo Vega, al Laboratorio de Biotecnología de Microalgas, a la Dra. Laura Carreón Palau por el apoyo recibido durante el Exp. II.

A la Técnico Myriam Lizzeth Hernández de Haro y al M.C. Manuel Salvador Trasviña Castro del Laboratorio de Edafología, por todo su apoyo en el secado de muestras para elementales y análisis de aminoácidos en peces y biofloc.

A Dra. Norma Yolanda Hernández Saavedra, Lic. Osvelia Ibarra Morales, C. Tania Verónica Núñez Valdez, Lic. Leticia González Rubio Rivera, Lic. Adriana Teresa Franzoni García por todo el apoyo administrativo recibido durante mis estudios de posgrado.

Al Ing. Horacio Sandoval Gómez por todo su apoyo en la organización de las reuniones de comité y todo el apoyo técnico recibido durante mi Doctorado.

Al Lic. Aldo Joaquin Vargas Mendieta por los videos y fotografías tomadas durante el desarrollo de los experimentos I, II y IV.

A C. Cruz Romero Acevedo por todas las facilidades en el envío de las muestras a TUMSAT y COLPOS.

Al P.A.C.E., a la Dra. Sara Cecilia Díaz Castro y Dra. Eleonora Puente Carreón.

A José Antonio Zavala Varela, Fabián Álvarez Rosas, Jesús Omar Castro Domínguez, Julio Enrique Cosio Sánchez, Heraclio Avelino de la Peña Garciglia, Rafael Gómez Geraldo, Juan Antonio Hernández Escobar, Ezequiel Lucero Geraldo, Raúl Ojeda Martínez, Pedro Rodríguez Mendoza, Cruz Jorge Romero Camacho, Luis Alberto Romero Torres, Sergio Valles Ceseña y Pilar Lucero Geraldo por todas las facilidades durante las largas jornadas de trabajo.

A Susana Luna Garcia y Ana María Talamantes Cota por todo el apoyo en la búsqueda y préstamo de material para la realización de este trabajo.

A Marina Hiraes Cota y José Alberto Zepeda Dominguez por todo el apoyo y compañía recibido durante el desarrollo de esta tesis.

A la familia Garza Torres por todo el apoyo, acompañamiento y platicas durante el desarrollo de este trabajo.

A todos los que me apoyaron en el viaje a la India para recibir el premio obtenido en el APA 19, desarrollado por la World Aquaculture Society.

A la profesora Giulia Ferdinando por todas sus enseñanzas, platicas, consejos y por el apoyo recibido para la beca a Italia, a Piero Gurgo Salice y Edoardo Gurgo Salice por la asesoría recibida para el trámite de la beca.

Contenido	
Resumen	i
Summary	iii
Dedicatoria	v
Agradecimientos	vi
Lista de figuras	xii
Lista de tablas	xvii
Abreviaturas	xx
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Sistemas de producción.....	1
1.2 Sistemas productivos acuícolas: Sistemas de Recirculación (SAR) y de Tecnología de Biofloc (TBF).....	5
1.2.1 SAR.....	6
1.2.2 TBF.....	8
1.3 La alimentación y los nutrientes residuales.....	12
1.4 Integración acuícola y producción hortícola.....	15
2. ANTECEDENTES	19
2.1 Sistemas integrados: implementación de SAR y TBF con hidroponía.....	19
2.2 Flujo de macro y micro nutrientes.....	22
2.3 Eficiencia en la alimentación.....	23
2.4 Efluentes de SAR Y TBF.....	24
2.5 Balance de masas y modelación del flujo de nutrientes.....	27
3. JUSTIFICACIÓN	29
3.1 Importancia Científica.....	29
3.2 Importancia Tecnológica.....	30
3.3 Importancia para el desarrollo.....	30
3.3.1 Pertinencia económica.....	30
3.3.2 Pertinencia ambiental.....	30
3.3.3 Pertinencia social.....	31
4. HIPÓTESIS	31
5. OBJETIVOS	32
5.1 Objetivo general.....	33
5.2 Objetivos particulares.....	33
6. MATERIAL Y MÉTODOS	33
EXPERIMENTO I - SAR	34
6.1 Sistema Biológico para SAR.....	34
6.1.1 Disposición del sistema SAR antes del Experimento I.....	35
6.1.2 Condiciones Preliminares Experimento SAR.....	35
6.1.3 Diseño experimental SAR.....	37
6.1.4 Análisis de estrategias de alimentación.....	38
EXPERIMENTO II - TBF	40
6.2 Construcción del sistema TBF.....	40
6.3 Sistema biológico.....	40
6.3.1 Condiciones preliminares TBF.....	41
6.3.2 Diseño experimental.....	42

6.4 Evaluación de los organismos	44
6.4.1 Parámetros de crecimiento.....	44
6.4.2 Preparación de muestras para análisis nutricionales.....	45
6.5 Evaluación de los parámetros.....	46
6.6 Análisis químico de los efluentes	47
6.6.1 Fracción líquida	47
6.6.2 Fracción particulada	47
EXPERIMENTO III - Mineralización	47
6.7 Mineralización de la fracción particulada	47
6.7.1 Digestión aeróbica.....	48
6.7.2 Digestión acida con HNO ₃	49
6.7.3 Incineración	49
6.7.4 Digestión acida con H ₂ SO ₄	49
6.7.5 Digestión anaeróbica.....	49
EXPERIMENTO IV – Hidroponía	50
6.8 Condiciones preliminares del experimento de hidroponía	50
6.8.1 Siembra y germinación.....	50
6.9 Experimento hidropónico	51
6.9.1 Tratamientos.....	51
6.10 Biometría	53
6.11 Análisis de parámetros y toma de muestras.....	53
6.12 Análisis de plantas	53
6.13 Análisis estadísticos.....	54
7. RESULTADOS	55
7.1 Preliminares SAR.....	55
EXPERIMENTO I -SAR	55
7.1.1 Datos obtenidos durante el Experimento SAR	55
7.1.2 Crecimiento de 2.4 a 70 g de juveniles (período de maternidad)	56
7.1.3 Parámetros físicos en SAR.....	56
7.1.4 Parámetros biológicos en SAR.....	60
7.1.5 Análisis de nutrientes en alimentos	65
7.1.6 Análisis de nutrientes en peces	65
7.1.7 Flujo de nutrientes en líquido en SAR	67
7.1.8 Comparación de las diferentes estrategias para alimentar a <i>O. niloticus</i> y la implementación de la ingesta diaria de proteínas (IDP).....	71
EXPERIMENTO II- TBF	77
7.2 Datos obtenidos durante el Experimento TBF	77
7.2.1 Calidad del agua en el experimento TBF.....	77
7.2.2 Rendimiento del crecimiento	81
7.2.3 Caracterización de los residuos en TBF	82
7.2.4 Composición de nutrientes <i>O. niloticus</i> y floc	86
EXPERIMENTO III- Mineralización	95
7.3 Análisis elemental de la fracción particulada en SAR y TBF	95
7.4 Mineralización aeróbica en SAR.....	95
7.5 Mineralizaciones químicas.....	101

7.6 Formulaciones hidropónicas específicas y las mineralizaciones químicas.	101
EXPERIMENTO IV - Hidroponía	103
7.7 Implementación de los efluentes de TBF en hidroponía TFN	103
7.7.1 Análisis elementales en la fracción líquida del cultivo TBF	103
7.7.2 Calidad del agua y nutrientes en TBF	103
7.7.3 Experimento de horticultura hidropónica con plantas de hojas verdes	109
8. DISCUSIÓN	112
8.1 Los sistemas integrados en el futuro inmediato	112
EXPERIMENTO I -SAR	112
8.2 Diseño SAR para regiones áridas y cultivo de tilapia	112
8.3 Experimento SAR	115
8.3.1 Calidad del agua en SAR	115
8.3.2 Rendimiento del crecimiento	116
8.3.3 Análisis proximal en la dieta implementada	119
8.3.5 Caracterización residual del cultivo en SAR	123
8.3.6 IDP y las estrategias de alimentación	124
EXPERIMENTO II -TBF	126
8.4 Experimento TBF	126
8.4.1 Análisis de agua	126
8.5 Crecimiento en Tilapia	129
8.6 TDS y tamaño de partícula	130
8.7 Análisis nutricionales en tilapia y floc	131
8.7.1 Análisis proximales	131
8.7.2 Análisis de aminácidos	134
EXPERIMENTO III – Mineralización	136
8.8 Mineralización de la fracción particulada	136
8.8.1 Fracción particulada en SAR, TBF	136
8.8.2 Caracterización de los residual en el cultivo de <i>Oreochromis niloticus</i> en TBF	138
8.8.3 Mineralización aeróbica en SAR	140
8.8.4 Mineralizaciones químicas y soluciones hidropónicas	142
8.8.5 Manejo de la fracción particulada	145
Experimento IV- Hidroponía	145
8.9 Experimento hidropónico en TFN	145
8.9.2 Calidad del agua y nutrientes en TBF	146
8.9.3 Experimento de horticultura hidropónica con plantas de hojas verdes	153
9. CONCLUSIONES	156
10. LITERATURA CITADA	157
11. ANEXOS	189
A. Participación en eventos científicos	189
B. Estancias realizadas	190
C. Premios y reconocimientos	190
D. Publicaciones	191

Lista de figuras

Figura 1. Ejemplificación de un sistema recirculación acuícola comercial (SAR). Las flechas indican el flujo del proceso de SAR a escala experimental individual (Figura obtenida de: Goddek <i>et al.</i> , 2019). Los componentes en SAR pueden variar dependiendo de la densidad del cultivo y en general de las necesidades de las especies a cultivar.....	7
Figura 2. Sistema acuícola de recirculación (SAR). Este esquema explica de manera general los componentes más comunes de SAR. Las flechas negras indican el flujo de agua. Imagen obtenida de: (Fernandes <i>et al.</i> , 2015).....	8
Figura 3. Sistema de biofloc, A) cultivo de biofloc de tilapia, B) muestras de agua de biofloc heterotrófico, C) tanque de biofloc. (Fotos del autor).....	10
Figura 4. Diversidad de la comunidad que convive en el floc. A) algas clorofitas (40x); B) Cianobacterias (40x); C) Diatomeas (10x); D) Ciliado del genero <i>Paramecium</i> (40x); E) Ciliado del genero <i>Colpidium</i> (100x); F) Ciliado del genero <i>Halteria</i> (100x); G) Rotíferos y ciliados (40x); H) Rotíferos del género <i>Philodina</i> (40x); I) Rotíferos y nematodos unidos a los flóculos bacterianos (40x); J) nematodos (40x); K) <i>Vibrio</i> sp. (40x); L) Levadura <i>Rhodotorula</i> sp. (40x). Foto y datos obtenidos de: Monroy-Dosta <i>et al.</i> (2013).	11
Figura 5. Descripción general de un sistema de acuaponía, con los tres componentes principales; 1) organismos acuáticos, b) agua residual (comunidad bacteriana), c) plantas (Figura obtenida de: Goddek <i>et al.</i> , 2019).	17
Figura 6. Sistema desacoplado de acuaponía, posee tres componentes principales; 1) organismos acuáticos, b) agua residual (comunidad bacteriana), c) plantas (Figura obtenida de: Goddek <i>et al.</i> , 2019).....	18
Figura 7. Esquema general de la evolución de los sistemas acuícolas. Incluye los métodos de mineralización (Esquema diseñado por el autor).	21
Figura 8. Esquema general que muestra todos los puntos que participan en el flujo de nutrientes en un sistema desacoplado. Figura obtenida de Goddek <i>et al.</i> (2019).	29
Figura 9. Diagrama con las características generales del experimento. I) Modelo SAR (Experimento I), II) Modelo TBF (Experimento II), III) Proceso de mineralización con la fracción sólida de SAR y TBF (Experimento III), IV) TFN hidropónico (Experimento IV). La línea de tiempo comienza en 2016 a 2019.....	34
Figura 10. Invernadero Proyecto SATREPS, JICA-JST recubierto de plástico, malla antifidos y Luminet® con reducción del 20%. Dividido en tres áreas experimentales: 1 ^{ra} fase acuícola en SAR, 2 ^{da} fase hidropónica en cama flotante y 3 ^{ra} fase para cultivo en suelo por ferti-irrigación. El Experimento I, se llevó a cabo en la fase acuícola del invernadero.....	35
Figura 11. Cronología del Experimento I: construcción, arreglos, maternidad y engorda. 2016 a 2017.	36
Figura 12. SAR conformado por 12 unidades individuales con recirculación. Los tanques se cubrieron con una cúpula de malla sombra negra (retención de luz del 60%). Los tanques, sedimentadores, bionitrificadores y mineralizadores fueron	

fabricados con fibra de vidrio, recubierta con pintura epóxica de alta calidad color azul.	37
Figura 13. Sistema individual conformado por: a) 1 tanque de 1 m ³ , b) un sedimentador de 156 L, c) un fraccionador de espuma 5 L, d) un bionitrificador 339 L, e) un tanque cónico de mineralización 89 L y, f) una bomba 60 W. Las flechas negras indican el flujo del agua dentro del sistema: 1-4 indican el flujo de la FL y 1, 2, 5 Indican el flujo de la FP. FL= fracción líquida, FP=fracción particulada.	37
Figura 14. Línea de tiempo del Experimento I. Dos etapas: maternidad y engorda de los organismos.	39
Figura 15. Implementación de la Ingesta Diaria de Proteína (IDP). BW = Peso corporal (g). IDP 1.4 =140%, IDP 1.2=120%, IDP 1.0 =100% a diferentes tallas (IDP = -3.818 LN (BW) + 30.158 ecuación estimada para este trabajo), ecuaciones estimadas para distintas temperaturas (IDP = -3.997 LN (BW) + 29.79, para 30°C, IDP= -3.965 LN (peso) + 29.305 para 28° C, y IDP = -3.902 LN (BW) + 28.334 para 24°C.	39
Figura 16. Cronología de la construcción de TBF e invernadero hidropónico. Periodo. 2017 al 2019 (Fotos del autor).	40
Figura 17. Diseño y distribución del invernadero de TBF e hidroponía, a) sección TBF (15 tanques de 1 m ³), b) sección hidropónica A (12 camas hidropónicas de TFN, c) sección hidropónica B (15 camas hidropónicas en TFN).	41
Figura 18. Experimento II TBF; a) Inoculación de tratamientos tiempo inicial = t ₀ ; b) Tratamientos preparados; c) <i>C. sorokiniana</i> -2714 (CV); d) <i>C. sorokiniana</i> -2805 (CS); e) <i>C. spp.</i> (M); f) muestras de la fracción líquida, de izquierda a derecha Q, H, M, CV, CS y g) Muestras en conos Imhoff de izquierda a derecha <i>C. sorokiniana</i> -2714, <i>C. spp.</i> , <i>C. sorokiniana</i> -2805.	43
Figura 19. Proceso de inoculación de microalgas, a) solución nutricional fertiplus® para el crecimiento de microalgas, b) <i>C. sorokiniana</i> -2714 (CV); c) <i>C. spp.</i> (M); d) <i>C. sorokiniana</i> -2805 (CS).	44
Figura 20. Diagrama para el procesamiento de la FP obtenida en el EXP I y EXP II. Utilizando cinco métodos de mineralización: a) aeróbica, b) digestión ácida con HNO ₃ , c) incineración, d) digestión ácida con H ₂ SO ₄ , e) mineralización anaeróbica.	48
Figura 21. Distribución de las plantas en las camas hidropónicas, en la imagen se ejemplifican las seis hileras de tubos y los orificios con las plantas correspondiente la línea inferior indica línea 1, la superior indica línea 6. Se sembraron cinco especies de plantas diferentes en cada cama: línea 1 y 6 <i>Lactuca sativa</i> (lechuga verde) y <i>Eruca sativa</i> ; líneas 2 y 5, <i>Lactuca sativa</i> (lechuga verde) y <i>Lactuca sativa</i> (lechuga roja); línea 3 y 4, <i>Brassica rapa</i> subsp. <i>Chinensis</i> (pak-choi) y <i>Ocimum Basilicum</i> (albahaca). (Imagen diseñada por Dr. David Vega García).	52
Figura 22. Modificaciones en SAR a) tanque de sedimentación, b) recirculación tanques, c) y d) modificaciones en el sedimentador, e) bio-nitrificador, f) modificaciones en el flujo del agua entre el tanque y el sedimentador.	55
Figura 23. Crecimiento de <i>O. niloticus</i> durante la maternidad, implementando un sistema Biofloc C/N1:13.	56

Figura 24. Las muestras para los análisis de agua (NH_4 , NO_2 , NO_3 y PO_4) se tomaron cada dos semanas durante todo el experimento. Ninguna letra en un punto indica que no hay diferencias significativas entre los tratamientos ($p > 0.05$). Las flechas en el gráfico indican la colecta de agua en las semanas 18 y 25 (experimento hidropónico- datos no mostrados)..... 58

Figura 25. Crecimiento promedio de *O. niloticus* tiempo durante 34 semanas utilizando diferentes niveles de IDP (1.4, 1.2, 1.0) en tres estaciones. Después de la semana 13 (asterisco), IDP 1.4 y 1.2 ($p > 0.05$) difieren significativamente de IDP 1.0 ($p < 0.05$). Implementación de los diferentes valores de ingesta diaria de proteínas (IDP), IDP 1,0 a 100% ($\text{IDP} = -3.818 \ln(\text{BW}) + 30.158$), IDP 1.2 = 120% ($\text{IDP} = -4.582 \ln(\text{BW}) + 36,19$) y IDP 1.4=140% ($\text{IDP} = -5.345 \ln(\text{BW}) + 42.221$)..... 61

Figura 26. Relación con la Longitud Estándar y el Peso Promedio durante el tiempo de cultivo. Implementación de los diferentes valores de ingesta diaria de proteínas (IDP), IDP 1.0 = 100% ($\text{IDP} = -3.818 \ln(\text{BW}) + 30.158$), IDP 1.2 = 120% ($\text{IDP} = -4.582 \ln(\text{BW}) + 36,19$) y IDP 1.4=140% ($\text{IDP} = -5.345 \ln(\text{BW}) + 42.221$)..... 62

Figura 27. Relación del Índice Fulton y el Peso Promedio (g) durante todo el período de cultivo (34 semanas). Implementación de los diferentes valores de ingesta diaria de proteínas (IDP), IDP 1.0 = 100% ($\text{IDP} = -3.818 \ln(\text{BW}) + 30.158$), IDP 1.2 = 120% ($\text{IDP} = -4.582 \ln(\text{BW}) + 36,19$) y IDP 1.4=140% ($\text{IDP} = -5.345 \ln(\text{BW}) + 42.221$). 62

Figura 28. Relación del FCA con el peso (g) durante 34 semanas en IDP 1.4, IDP 1.2 e IDP 1.0. Implementación de los diferentes valores de ingesta diaria de proteínas (IDP), IDP 1.0 = 100% ($\text{IDP} = -3.818 \ln(\text{BW}) + 30.158$), IDP 1.2 = 120% ($\text{IDP} = -4.582 \ln(\text{BW}) + 36,19$) y IDP 1.4=140% ($\text{IDP} = -5.345 \ln(\text{BW}) + 42.221$). 63

Figura 29. Los símbolos representan los niveles de IDP (g proteína/kg biomasa de pescado) relacionados con el peso corporal de los peces (BW) aplicados en diferentes trabajos de investigación utilizando la alimentación de saciedad; círculos indican el tiempo inicial con el porcentaje de peso corporal fijo (BW%), los triángulos indican el tiempo final con el BW% fijo, los cuadrados indican la variable inicial BW%, y los cruces indican la variable final BW% durante los diferentes experimentos reportados en 49 documentos de investigación (tabla 6). Las líneas representan las funciones matemáticas de IDP: IDP 1.0 = 100 % ($\text{IDP} = -3.818 \ln(\text{BW}) + 30.158$), IDP 1.2 = 120% ($\text{IDP} = -4.582 \ln(\text{BW}) + 36,19$) y IDP 1.4=140% ($\text{IDP} = -5.345 \ln(\text{BW}) + 42.221$). Se evaluaron diferentes temperaturas ($\text{IDP} = -3.997 \ln(\text{BW}) + 29.79$ para 30°C, $\text{IDP} = -3.965 \ln(\text{BW}) + 29.305$ para 28°C, y $\text{IDP} = -3.902 \ln(\text{BW}) + 28.334$ para 24°C; recomendado por la Agencia de Pesca de Japón, 1995). $\text{IDP} = -2.807 \cdot \text{LN}(\text{BW}) + 21.259$ para 28°C ($R^2 = 0.9725$) utilizando los datos originales de Van Trung *et al.* (2011). 76

Figura 30. Descripción de la calidad del agua durante el período experimental (40 semanas). (a) amoníaco; (b) nitritos; (c) nitratos y (d) fosfatos. La línea gris vertical en el centro de cada parcela separa los datos en dos fases: maternidad (1 -20 semanas) y engorda (21- 40 semanas), durante el cultivo de tilapia. Tratamiento quimioautotrófico=Q, heterotrófico=H, fotoautotrófico= M=*Chlorella* spp., CV=*C. sorokiniana*-2714 y CS=*C. sorokiniana*-2805..... 80

Figura 31. Crecimiento durante 20 semanas para la tilapia (*O. niloticus*) implementando cinco tratamientos en biofloc. El período se dividió en invierno y

verano. Primer período con alta densidad (180 peces/m³) y baja temperatura (1-20 semana), segundo período con baja densidad (55 peces/m³) y alta temperatura (semana 21-30)..... 81

Figura 32. Sólidos sedimentables durante la fase experimental determinados con conos Imhoff. a) Cantidad de sólidos sedimentables en el minuto 15; b) Cantidad de sólidos sedimentables en el minuto 30. Los asteriscos indican diferencias significativas ($p < 0.05$). La línea gris vertical en el centro separa los datos en dos fases: maternidad (1 -20 semanas) y engorda (21- 40 semanas), durante el cultivo de tilapia. Tratamiento quimioautotrófico=Q, heterotrófico=H, fotoautotrófico=M=*Chlorella* spp., CV=*C. sorokiniana*-2714 y CS=*C. sorokiniana*-2805. 83

Figura 33. Sólidos Disueltos Totales (TDS) durante la maternidad (1 -20 semanas) y engorda (21- 40 semanas) en el cultivo de *O. niloticus*. El asterisco indica diferencias significativas ($p < 0.05$). La línea gris vertical en el centro separa los datos en dos fases: maternidad (1 -20 semanas) y engorda (21- 40 semanas), durante el cultivo de tilapia. Tratamientos: Q= quimioautotrófico, H= heterotrófico de H, fotoautotróficos: M= *Chlorella* spp., CV=*C. sorokiniana*-2714 y CS= *C. sorokiniana*-2805. 84

Figura 34. Tamaño de las partículas de TBF en todos los tratamientos durante el período experimental (40 semanas). a) Datos obtenidos en la semana 10; b) 20; c) 30; d) 40. Nota: Cada valor representado en la media de SD. Valores en la misma fila con diferentes superíndices son significativamente diferentes ($p < 0.05$). Tratamientos: Q= quimioautotrófico, H= heterotrófico de H, fotoautotróficos: M= *Chlorella* spp., CV=*C. sorokiniana*-2714 y CS= *C. sorokiniana*-2805. 85

Figura 35. Relación entre lípidos y proteínas del cuerpo completo de *Oreochromis* spp. y los alimentos. Círculos= *Oreochromis niloticus* x *O. aureus* (mg lípidos/g proteína) (Lin, Cui, Hung, y Shiau, 1997), cuadros= *O. niloticus* x *O. mossambicus* (mg lípidos/g proteína) (De Silva *et al.*, 1991), rombos= *O. niloticus* (Abdel-Tawwab, 2012; Cavalheiro *et al.*, 2007; Diop *et al.*, 2013; Dongmeza *et al.*, 2006; Ergün *et al.*, 2009; Gaber, 2006; Lara-Flores *et al.*, 1995; Twibell y Brown, 1998; Yangthong *et al.*, 2014), los triángulos representan los datos obtenidos en la presente investigación cultivada bajo condiciones quimiotróficas, heterotróficas y fotoautotróficas en TBF..... 93

Figura 36. Relación entre los aminoácidos contenidos en el cuerpo completo de *O. niloticus* y el alimento y los aminoácidos contenidos en biofloc. a) La correlación de los aminoácidos en el cuerpo completo de *O. niloticus* y los aminoácidos en el alimento (100 mg/g); yb) la correlación de los aminoácidos en el cuerpo completo de *O. niloticus* y los aminoácidos en biofloc (100 mg/g), meth = metionina, thr = treonina, lys = lisina, tau = taurina, arg = arginina..... 94

Figura 37. Flujo de nutrientes durante el periodo de SAR (Experimento I). a) Flujo de N y P durante el Experimento I, b) flujo de K durante el experimento I..... 100

Figura 38. Descripción de la calidad del agua durante el período experimental (40 semanas). (a) relación NH₄-N: NO₃-N, (b) relación N:P = NT:PO₄-P. Rangos de concentración de N y P según varios autores: HO1 = Solución Hoagland 1, HO2 = Solución Hoagland 2 máximo y mínimo de datos de Hoagland utilizados en soluciones hidropónicas (1960), Hewitt - HE (1966), Solución Cooper 1 - CO, CO₂ -

Solución Cooper 2 (1979), Steiner S (1984) (Datos obtenidos en Trejo-Téllez y Gómez-Merino (2012) . La línea gris vertical en el centro de cada gráfica separa los datos en dos períodos: maternidad (1 -20 semanas) y engorda (21- 40 semanas), durante el cultivo de tilapia. Tratamientos: Q= quimioautotrófico, H= heterotrófico, M= fotoautotrófico *Chlorella* spp., CV = *C. sorokiniana*-2714, y CS= *C. sorokiniana*-2805 durante la etapa de maternidad y engorda..... 107

Figura 39. Evaporación (L) durante el período experimental; la línea negra vertical en el centro de cada gráfica separa los datos en dos períodos: maternidad (semanas) 1 -20 y engorda (semanas 21- 40) durante la cría de tilapia. Tratamientos: Q= quimioautotrófico, H= heterotrófico, M= fotoautotrófico *Chlorella* spp., CV = *C. sorokiniana*-2714, y CS= *C. sorokiniana*-2805 durante la etapa de maternidad y engorda. 108

Figura 40. Conductividad durante el cultivo de tilapia. Tratamientos: Q= quimioautotrófico, H= heterotrófico, M= fotoautotrófico *Chlorella* spp., CV = *C. sorokiniana*-2714, y CS= *C. sorokiniana*-2805 durante la etapa de maternidad y engorda. La línea gris vertical en el centro de cada gráfica separa los datos en dos períodos: maternidad (semanas 1 -20) y fase de engorda (semanas 21- 40) durante el cultivo de *Oreochromis niloticus* en TBF. La primera línea horizontal representa el rango de sensibilidad (0 -1.5 dS/m); la segunda línea representa moderadamente sensible (1.5 – 3.0 dS/m); la tercera línea representa moderadamente tolerante (3.0 a 6 dS/m). Los datos para el establecimiento de estas líneas se obtuvieron en Shannon y Grieve, 1998; Trejo-Tellez y Gómez-Merino, 2012. El nombre de las plantas indica la afinidad a la conductividad: lechuga (*L. sativa*) es una planta sensible; pak-choi (*B. rapa*) moderadamente sensible; espinaca (*S. oleracea*) moderadamente tolerante; y la arúgula (*E. sativa*) es tolerante (Shannon y Grieve, 1998)..... 108

Lista de tablas

Tabla I. Elementos macro y micro analizados en las dietas, en los componentes biológicos y residuales del sistema y, con los que se analizó el flujo de nutrientes en el sistema SAR.....	46
Tabla II. Código, nombre común y nombre científico de las distintas especies utilizadas en los experimentos hidropónicos.....	51
Tabla III. Descripción de las soluciones nutritivas comerciales Hoagland y Steiner. Macro y micronutrientes necesarios para la nutrición vegetal.....	52
Tabla IV. Compendio del experimento realizado en la sección de Hidroponía. Se incluye una breve descripción de los tratamientos del experimento.	53
Tabla V. Parámetros biológicos obtenidos para <i>Oreochromis niloticus</i> durante 15 semanas de maternidad, con una densidad de 200 peces/m ³	57
Tabla VI. Temperaturas medias para cada estación de cada tanque y el promedio general de cada tratamiento.....	59
Tabla VII. Rendimiento de producción de tilapia, <i>Oreochromis niloticus</i> , a tres niveles de IDP (1.4, 1.2 y 1.0) con una densidad de 100 peces/m ³ durante 34 semanas.	60
Tabla VIII. Tiempo de cultivo (semanas), factor de conversión alimenticia (FCA) y supervivencia (S) necesaria para alcanzar los objetivos de peso de <i>O. niloticus</i> (350 g a 900 g).....	64
Tabla IX. Análisis proximal y elemental efectuado en los alimentos implementados en los experimentos con diferente porcentaje de proteína (35%, 40% y 44) durante el experimento SAR y TBF.....	64
Tabla X. Análisis de aminoácidos en los organismos de TBF tiempo cero y del alimento de 40% de proteína implementado durante el experimento de SAR y TBF.	66
Tabla XI. Análisis proximal del cuerpo completo y filete de <i>Oreochromis niloticus</i> con diferentes niveles de IDP a la mitad (17 semanas, solo cuerpo completo) y al final del cultivo (34 semanas, cuerpo completo y filete).	66
Tabla XII. Análisis elemental del cuerpo completo de <i>Oreochromis niloticus</i> con diferentes niveles de IDP a la mitad (17 semanas) y al final del cultivo (cuerpo completo y filete) (34 semanas).	68
Tabla XIII. Porcentaje de retención elemental en comparación con el contenido elemental en alimentos para el crecimiento de <i>Oreochromis niloticus</i> con diferentes niveles de IDP a la mitad (17 semanas) y al final del cultivo (34 semanas).....	69
Tabla XIV. Análisis del contenido macro y micronutriente en la fracción líquida, durante cinco meses en tres niveles de IDP 1.4, IDP 1.2 y IDP 1.0.....	70
Tabla XV. Resultados de los análisis de diferentes trabajos de investigación; estos datos muestran las diferentes estrategias de alimentación utilizadas en los experimentos de tilapia. 1. <i>Oreochromis niloticus</i> , 2. <i>O. niloticus</i> x <i>O. aureus</i> , 3. <i>O. niloticus</i> x <i>O. mossambicus</i> y 4. <i>O. aureus</i> . La IDP (g proteína/kg biomasa) se estimó en este trabajo con base en la información proporcionada por los diferentes autores.	72

tomate, fresa, pepino, chile y melón obtenida de los mineralizadores aeróbicos en SAR.....	102
Tabla XXXII. Macro elementos (N, Ca, K, Mg, Na, Si, P, S) y microelementos (B, Fe, Mn, Mo, Ni, Se, Zn) en la fracción líquida de los tratamientos: Q= quimioautotrófico, H= heterotrófico, M= fotoautotrófico <i>Chlorella</i> spp., CV = <i>C. sorokiniana</i> -2714, y CS= <i>C. sorokiniana</i> -2805 durante la etapa de maternidad y engorda.....	104
La relación entre NT y PO ₄ -P fue menor en los tratamientos fotoautotróficos (M, CS y CV) en la fase de maternidad y superior en Q y H. En la fase de engorda, la relación superó en todos los tratamientos con respecto a las soluciones hidropónicas (soluciones Hoagland, Steiner, Cooper, Hewitt) (Fig. 38b). La evaporación aumentó a lo largo del período experimental; El tratamiento H tuvo el nivel de evaporación más alto en la fase de maternidad ($p < 0.05$) (Fig. 39a), pero la evaporación total no mostró diferencias significativas entre los tratamientos ($p > 0.05$, Tabla XXXIII). La conductividad Q y H mostraron el nivel más bajo durante la fase de cría, y después de la semana 11 aumentaron al nivel más alto (> 6 dS/m nivel máximo) hasta la semana 21. En la fase de engorda, el nivel de todos los tratamientos disminuyó sin diferencias significativas hasta la semana 26, cuando los tratamientos fotoautotróficos obtuvieron el nivel más alto (Fig. 40).	106
Tabla XXXIII. Descripción de los parámetros del cultivo. (OD, pH, conductividad y salinidad) evaporación total y NH ₄ -N, NO ₂ -N, NO ₃ -N, PO ₄ -P por 40 semanas. El cultivo de <i>Oreochromis niloticus</i> en TBF se dividió en dos periodos, invierno y verano.	106
Tabla XXXIV. Técnica de flujo de nutrientes (TFN) en horticultura hidropónica, experimento con especies de plantas de hojas verdes durante 40 semanas. Crecimiento de plantas mediante el uso de la fracción líquida obtenida de cultivos biofloc. Los datos de crecimiento se muestran para los períodos medios y finales del período experimental.....	110

Abreviaturas

°C, Grado centígrado
µm, Micrómetro
AA, Aminoácidos
AC, Alimento Consumido
cm, centímetro
FCA, Factor de Conversión Alimenticia
FL, Fracción Líquida
FP, Fracción Particulada
FT, Fosforo Total
g, Gramo
h, hora
H₂SO₄, Ácido sulfúrico
HNO₃ Ácido nítrico
ICP-AES, Espectrofotometría óptica
IDP, Ingesta Diaria de Proteína
ln, Logaritmo natural
Kg, kilogramo
KOH, Cloruro de Potasio
L, litro
LT, Longitud Total
m, Metro
mg, Miligramo
min, Minuto
MJ, Mega Joule
ml, Mililitro
MR, Marca registrada
TFN, Técnica de flujo de nutrientes (Siglas en Inglés)
NT, Nitrógeno Total
OD, Oxígeno disuelto
Org, Organismos
P40, Alimento proteína 40%
S, Supervivencia
SAR, Sistema acuícola de Recirculación
Spp., Especies
TAN, Nitrógeno Amónico Total (siglas en Inglés)
TBF, Tecnología de biofloc
TEP, Tasa de Eficiencia Proteica

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Sistemas de producción

La seguridad alimentaria juega un papel relevante debido al crecimiento de la población, la cual excede los 7.2 mil millones y continúa en crecimiento (FAO, 2016). Las expectativas indican que para el 2050 seremos más de 9 mil millones de personas (Godfray *et al.*, 2010a). Por lo que los sistemas de producción de alimentos convencionales, incluida la producción animal intensiva tienen que cambiar (Godfray *et al.*, 2010b); debido al alza de los insumos, la energía, la contaminación, el cambio climático entre otros factores que limitan estos sistemas (Ahmed *et al.*, 2018).

Se espera que para el 2050 más del 70% de la población mundial viva en zonas urbanas (FAO, 2009a). La urbanización traerá cambios en los estilos de vida y en los patrones de consumo: lo cual puede impactar en un mayor consumo, contaminación y competencia por el espacio, especialmente en zonas urbanas (Hubacek *et al.*, 2007). En combinación con el crecimiento que se aproxima, vendrá también la diversificación en la dieta en los países desarrollados (FAO, 2009a). La proporción de granos y otros cultivos básicos disminuirá, aumentarán los de verduras, frutas, carne, lácteos y pescado, ya que la población urbana está en constante crecimiento, sin embargo, las áreas rurales han sido y continuaran como el hogar de la mayoría de los pobres y hambrientos durante bastante tiempo. Al vivir en lugares críticos de pobreza, a menudo en áreas ecológicamente frágiles, muchos de ellos tienen que lidiar con condiciones de alta presión demográfica y ecosistemas deteriorados (FAO, 2009b, 2009a), pero las actividades de producción sostenibles como la acuicultura continental podrían ser una solución para estas áreas, invertir en la producción acuícola permitirá fortalecer estas comunidades (Budzych-Tabor *et al.*, 2018).

La actividad productiva con mayor crecimiento en las últimas décadas ha sido la acuicultura (Froehlich *et al.*, 2018), al presentar un crecimiento anual del 5.8 % durante el periodo 2000 – 2018 (FAO, 2018), más rápido que otros segmentos de producción animal (Ganguly *et al.*, 2013), con más de 598 especies de cultivo, de ambientes dulceacuícolas, salobres y marinos (peces, crustáceos, moluscos, equinodermos, anfibios). Esta actividad representa una de las alternativas más viables para la producción de alimentos (Brooks y Conkle, 2019), debido al desarrollo de diversos modelos de producción, a la minimización del tiempo y al incremento en la producción, así como a factores negativos existentes en otras áreas productivas como: limitación de los suministros de agua dulce, la pérdida de tierras arables, la degradación y pérdida de nutrientes del suelo (Goddek *et al.*, 2015), los colapsos en las pesquerías (Hilborn *et al.*, 2005), entre otros.

Actualmente la acuicultura suple alrededor del 68% del pescado que se consume a nivel global y juega un papel primordial en los esfuerzos para eliminar el hambre y la desnutrición en el mundo (Béné *et al.*, 2016; FAO, 2018). Por lo tanto, el mercado ha tenido una gran influencia en los sistemas de producción; ya que genera una amplia diversificación en las especies que se cultivan y en la calidad con la que se producen (Natale *et al.*, 2013).

Dentro de las especies de relevancia en la acuicultura dulceacuícola se encuentran los ciclidos y los ciprinidos (tilapias y carpas), al representar el grupo de mayor producción piscícola en el mundo (FAO, 2014). Tilapia es el nombre común que se le da a tres géneros de la familia Cichlidae: *Oreochromis*, *Sarotherodon* y *Tilapia* (Wang y Lu, 2016). Las especies más importantes para la acuicultura están en el género *Oreochromis* y son: *O. mossambicus*, *O. aureus* y *O. niloticus*, esta última es la más cultivada (Moura *et al.*, 2016), al representar el 80% de las tilapias cultivadas a nivel mundial (Santos *et al.*, 2019).

La expansión de la producción acuícola, especialmente para especies como la tilapia, es evidente en las tasas de crecimiento relativo del consumo per cápita de diferentes grupos de especie en los últimos años (FAO, 2018). El interés por esta especie comenzó en la década de 1980. Kumar y Engle (2016), describen tres periodos importantes para el crecimiento de la producción de tilapia: (1) fase inicial (1981–1990), (2) fase de crecimiento temprano (1991–2000) y (3) fase de crecimiento rápido (2001-2012).

Oreochromis niloticus es la sexta especie más importante del mundo en términos de valor, pero la tercera más importante de las comercializadas internacionalmente, después del camarón y el salmón del Atlántico. En términos de cantidad producida, la tilapia es más importante que el salmón y el camarón (Kumar y Engle, 2016). La tilapia se diferencia del camarón y el salmón porque se cultiva como producto de subsistencia en muchos países en desarrollo alrededor del mundo (Kumar y Engle, 2016), pero también se produce como cultivo de alto valor para los mercados urbanos domésticos (Egipto y Brasil) y para exportación; la demanda de la tilapia existe dentro de un mercado altamente diverso; mercados occidentales altamente desarrollados y las comunidades más pobres de los países en desarrollo (Norman-López y Bjørndal, 2009) y cada vez en sistemas de producción más diversos, es una buena especie modelo para nuevos sistemas de producción.

El éxito de esta especie se debe a las líneas genéticas existentes, las cuales tienen un buen desempeño en su crecimiento (Mamun *et al.*, 2007), con un mayor rendimiento en la alimentación y la adaptación a diversas fuentes de proteína (El-Sayed y Tacon, 1997), a diversas técnicas de cultivo: extensivas, semi-intensivas, intensivas, así como a diversos modelos de producción (Santos *et al.*, 2019), también muestran una mayor tolerancia a rangos amplios de pH, salinidad, temperatura y al oxígeno disuelto (Mjoun *et al.*, 2010). Su producción elevada y su aceptación en el mercado (Wang y Lu, 2016) también han sido factores que han jugado a su favor.

La producción de tilapia está ampliamente distribuida en todo el mundo (Fitzsimmons, 2000). Se cultiva en más de 85 países, con métodos de producción que van desde operaciones artesanales a intensivas (Norman-López y Bjørndal, 2009). El cultivo de tilapia varía desde una subsistencia rural (prácticas extensivas, de bajos insumos, no comerciales y para consumo familiar) hasta un nivel a gran escala (intensivo en capital, con fines comerciales y orientado por el mercado), en dependencia de la intensidad de la gestión empleada (Gupta y Acosta, 2014). En Asia, Filipinas fue el pionero del cultivo en jaulas en lagos y embalses de la región y de los cultivos semiintensivos e intensivos (Guerrero, 2002). En México, los sistemas de cultivo en jaulas incluyen jaulas flotantes, corrales de red que usan lados estacados y descansan en el fondo, y corrales de madera que encierran porciones de una laguna (Fitzsimmons, 2000).

El cultivo semiintensivo en estanques de tilapia es típicamente integrado con actividades agrícolas o de cría de animales, en el cual se realiza la fertilización de estanques con fertilizantes orgánicos (por ejemplo, residuos de cultivos o estiércol) esto promueve la productividad natural del estanque además de ser consumida directamente por la tilapia (Watanabe *et al.*, 2002). El policultivo de tilapia con otros peces nativos en estanques de agua dulce también está ampliamente integrado con la agricultura y la ganadería en el sudeste asiático; particularmente en Indonesia, Tailandia, Vietnam, Camboya y Myanmar (Gupta y Acosta, 2014). La mayoría de los productores de tilapia en estanques cultivan tilapias bajo el sistema de monocultivo. Los métodos de cultivo seguidos dependen de la naturaleza de las tierras de cultivo y la capacidad de inversión de los agricultores (Gupta y Acosta, 2014).

En América todavía se practica el cultivo extensivo de estanques en algunas áreas, como México, República Dominicana y Jamaica, donde las familias generalmente consumen la mayor parte del producto y venden una pequeña porción (Watanabe

et al., 2002). También se han implementado cultivos intensivos en raceways y tanques redondos con sistemas de recirculación dentro de invernaderos o edificios aislados para mantener el calor en los EE. UU., Canadá, Brasil y México (Watanabe *et al.*, 2002). En Canadá y Estados Unidos, se ha demostrado que el cultivo de tilapia en raceways que utilizan el sistema de acuaponía es técnicamente factible y económicamente posible (Fitzsimmons, 2000), pero los países de América son mercados y productores relativamente pequeños en comparación con China y otros países asiáticos (Watanabe *et al.*, 2002).

1.2 Sistemas productivos acuícolas: Sistemas de Recirculación (SAR) y de Tecnología de Biofloc (TBF)

La mayoría de los sistemas acuícolas recientes son intensivos (Subasinghe *et al.*, 2009) debido a la necesidad de incrementar la producción mundial de alimentos del 25 al 70% (Hunter *et al.*, 2017), por lo que es necesario que éstos sean más eficientes y sustentables (Campbell *et al.*, 2014; Diana *et al.*, 2013; Edwards, 2015).

Para dar respuesta a las necesidades en la producción sostenible, en las últimas décadas se han implementado sistemas de producción más eficaces, como: los Sistemas Acuícolas de Recirculación (SAR) y los sistemas con Tecnología de Biofloculación (TBF), los cuales pueden integrarse a sistemas de producción vegetal (Sistemas hidropónicos).

El principal objetivo de estos dos sistemas consiste en elevar la producción de organismos acuáticos a la vez que se implementa una importante reducción en la generación de residuales, lo que permite optimizar el ciclo de nutrientes, el flujo de energía, el uso y manejo del agua, la materia prima, el espacio, la materia orgánica, y el manejo de nutrientes lo cual evita los riesgos de eutrofización (Choo y Caipang, 2015; Crab *et al.*, 2012; Emerenciano *et al.*, 2013.; Endo y Takeuchi, 2009; Fleckenstein *et al.*, 2018; Gallardo-Collí *et al.*, 2019a; Liu *et al.*, 2014; Losordo *et al.*, 1999; Riche y Garling, 2003; Zhang *et al.*, 2011). Los residuales pueden ser usados

para la producción de varias especies vegetales lo que permite obtener un mayor beneficio para la producción de alimentos.

1.2.1 SAR

Los sistemas de recirculación acuícola (SAR) surgen como una demanda de sistemas más eficientes (FAO, 2016; Goddek *et al.*, 2019) que permiten una producción de materia residual más baja (Subasinghe *et al.*, 2009). En la última década se han establecido dos modelos de producción. El primero se encuentra en granjas intensivas y semiintensivas con rendimientos medios a altos y el segundo en granjas familiares o cooperativas con rendimientos medios a bajos (Naylor *et al.*, 2009). Sin embargo, la expansión y el desarrollo dependen de la aplicación de tecnologías para maximizar los recursos, intensificar la producción, maximizar el uso de agua, nutrientes y minimizar los impactos ambientales, por lo que la implementación de sistemas de recirculación cerrados o de menor intercambio de agua es una necesidad predominante (Béné *et al.*, 2016; Sapkota *et al.*, 2008; Turcios y Papenbrock, 2014; Verdegem *et al.*, 2006) (Fig. 1).

SAR ha permitido el desarrollo de modelos sostenibles al sentar las bases para lograr la producción con menores requerimientos de agua (reemplazo nulo) con cultivos intensivos, también al promover el desarrollo de actividades de acuicultura en áreas donde el agua es escasa (Piedrahita, 2003; Rurangwa y Verdegem, 2015). Al requerir 250-1000 L de agua por kg de pescado (Shnel *et al.*, 2002), esto favoreció la expansión de estos sistemas productivos en áreas no costeras (Klinger y Naylor, 2012; Martins *et al.*, 2010). Si bien la implementación de SAR requiere una gran inversión debido a los altos costos de los componentes del sistema, se compensa con las densidades de cultivo que maneja (Rurangwa y Verdegem, 2015); además, también elimina la descarga residual al medio ambiente (Martins *et al.*, 2010); mitiga la contaminación de las áreas que rodean los cultivos (Zhang *et al.*, 2011); permite el reciclaje de nutrientes, cultivos más higiénicos, mejor manejo de enfermedades

(FAO, 2017; Piedrahita, 2003; van Rijn, 1996) y favorece el mantenimiento de condiciones estables de los tanques de cultivo (Masser *et al.*, 1999) (Fig. 2).

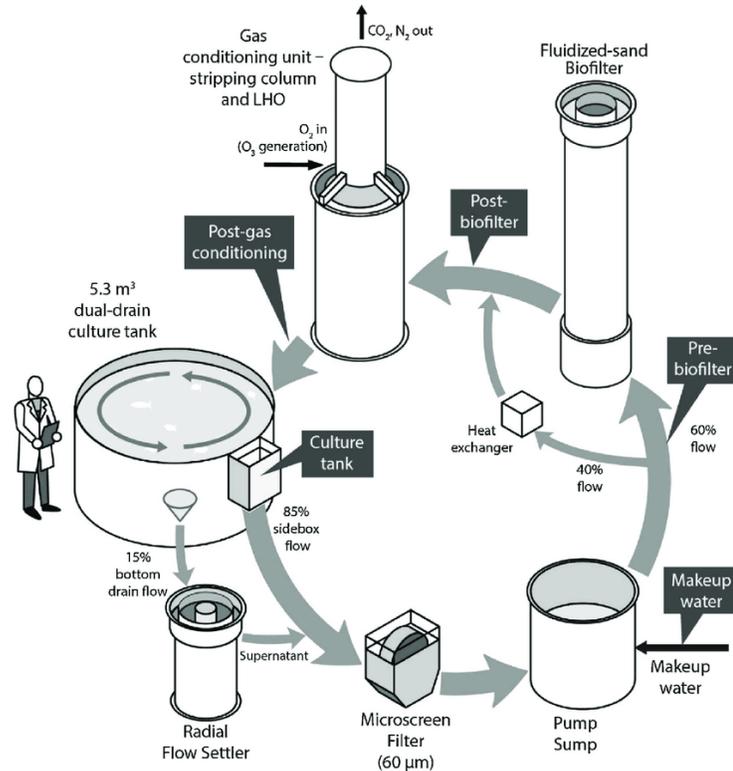


Figura 1. Ejemplificación de un sistema recirculación acuícola comercial (SAR). Las flechas indican el flujo del proceso de SAR a escala experimental individual (imagen obtenida de: Goddek *et al.*, 2019). Los componentes en SAR pueden variar en dependencia de la densidad del cultivo y en general de las necesidades de las especies a cultivar.

El interés en el uso de estos sistemas ha aumentado (Losordo *et al.*, 1999) la modernización de este modelo ha permitido el cultivo de diversas especies generalmente de alto valor, como el salmón (Midilli *et al.*, 2012; Sun *et al.*, 2016a) y la trucha. Sin embargo, el cultivo de tilapia en SAR comenzó hace más de dos décadas con éxito (Chen *et al.*, 1994; Losordo *et al.*, 1999; Masser *et al.*, 1999; Riche y Garling, 2003; Suresh y Lin, 1992) debido a la alta densidad de cultivo obtenida y su alto consumo en las áreas productivas de esta especie, lo que permitió tener el producto al alcance del mercado (Schnell y Seebacher, 2008). No solo se

ha utilizado para la engorda de organismos, sino también para las etapas de cría, alevines y juveniles (Gullian-Klanian y Aramburu-Adame, 2013; Gullian-Klanian *et al.*, 2013; Martins *et al.*, 2010).

Debido a que SAR ha sido considerado el método más sostenible para la producción de pescado (Badiola *et al.*, 2012), varios países han intentado desarrollar este sistema, pero a un costo menor (simplificando los componentes, Fig. 2) (Watanabe *et al.*, 2002) y México no es una excepción (Soto-Zarazua *et al.*, 2010). Uno de los desafíos a superar es la producción de materia orgánica dentro del sistema (Shnel *et al.*, 2002; van Rijn, 1996, 2013) como ocurre en México (Soto-Zarazua *et al.*, 2010).

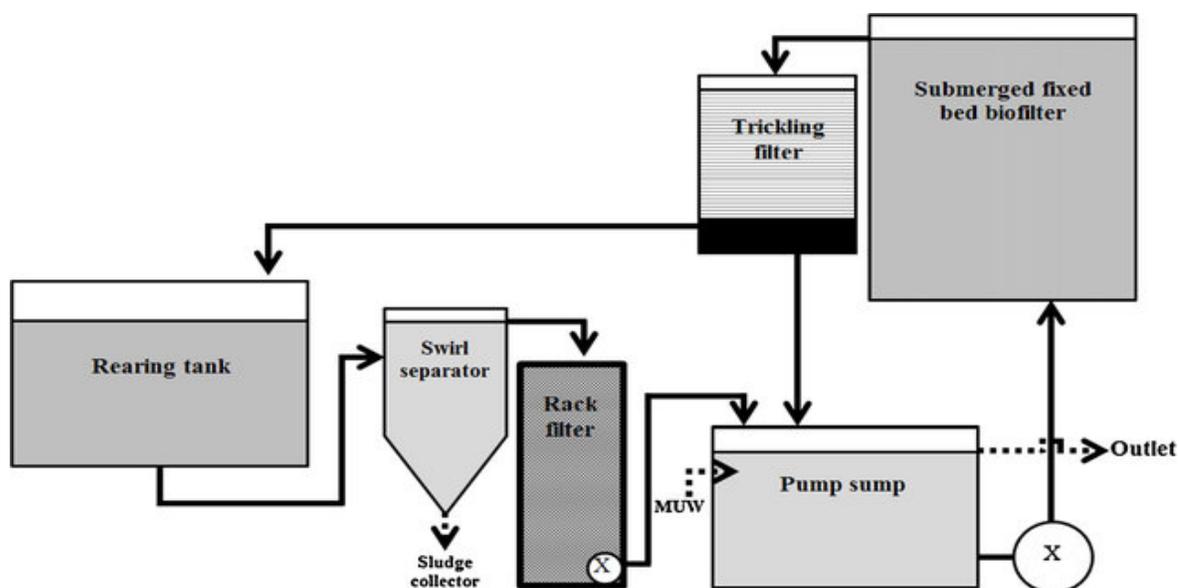


Figura 2. Sistema acuícola de recirculación (SAR). Este esquema explica de manera general los componentes más comunes de SAR. Las flechas negras indican el flujo de agua. Imagen obtenida de: (Fernandes *et al.*, 2015).

1.2.2 TBF

La Tecnología de Biofloc (TBF) es un sistema de producción con bajo o nulo recambio de agua (Azim y Little, 2008). Esta tecnología permite reciclar el alimento no consumido y los desechos producidos por los organismos en flóculos, que

quedan disponibles para los organismos de cultivo (Fig. 3a) (Avnimelech, 2003). La base son los microorganismos que habitan en el sistema y colonizan estos flóculos, quienes generan un aporte proteico importante y forman parte en los procesos para el reciclamiento de nutrientes (ciclo del nitrógeno) a través de comunidades microbiológicas autótrofas y heterótrofas, que incluyen bacterias, hongos, microalgas y zooplancton (una comunidad microeucariota) (Fig. 4) (Ebeling *et al.*, 2006; Gallardo-Collí *et al.*, 2019b, 2019a; Martínez-Córdova *et al.*, 2015). Estos microorganismos juegan tres roles importantes dentro del sistema: a) mantener la calidad del agua al tomar compuestos nitrogenados y generar proteínas, b) incrementar la nutrición por el aporte extra, c) reducir patógenos dentro del sistema (Emerenciano *et al.*, 2017; Martínez-Córdova *et al.*, 2015). Otra base importante es la relación C/N (Avnimelech, 2003), que es necesaria para mantener una fuente de carbono en las comunidades heterotróficas (Fig. 3b). Dentro de las más comunes es la melaza, el azúcar o el glicerol entre otros (Ekasari *et al.*, 2010), se puede mantener una relación de C/N=12-20:1 (Emerenciano *et al.*, 2017). Este tipo de cultivos es favorable para reciclar proteína, reducir el FCA (Factor de Conversión Alimenticia), incrementar el crecimiento en cultivos de altas densidades (De Schryver *et al.*, 2008).

TBF surge como un sistema alternativo para el tratamiento residual y por la restricción del intercambio de agua debido a los costos y regulaciones ambientales (Fig. 3a). Sus inicios datan de la década de 1970 con diferentes especies de camarones. Luego, en la década de 1980, se desarrolló un programa Ecotron; En la década de 1990, países como los Estados Unidos de América (EE. UU.) e Israel comenzaron a usar TBF con tilapia y camarones. Desde entonces, varios países han implementado esta tecnología (Emerenciano *et al.*, 2013). Uno de los precursores de TBF es (Avnimelech, 1999), quien desarrolló una guía práctica para su uso e implementación.

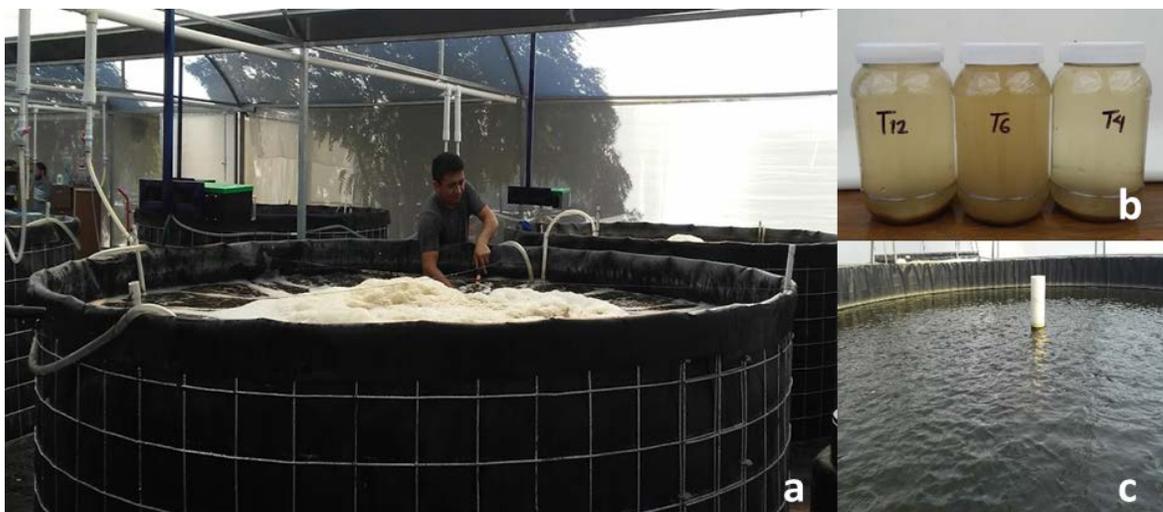


Figura 3. Sistema de biofloc, A) cultivo de biofloc de tilapia, B) muestras de agua de biofloc heterotrófico, C) tanque de biofloc. (Fotos del autor).

Esta tecnología ha tenido mucho éxito en la cría de tilapia con aumentos de 112 a 128% en el aumento de peso y crecimiento específico en comparación con SAR (Luo *et al.*, 2014) por lo tanto, se ha aplicado en varias etapas desde alevines, juveniles, engorda y reproducción de tilapia (Crab *et al.*, 2009; Day *et al.*, 2016; Ekasari *et al.*, 2015b, 2015a; Fleckenstein *et al.*, 2018; García-Ríos *et al.*, 2019; Luo *et al.*, 2014). TBF favorece el crecimiento de *Oreochromis niloticus*, la actividad enzimática, la respuesta inmune (Day *et al.*, 2016; Long *et al.*, 2015; Luo *et al.*, 2014; Pérez-Fuentes *et al.*, 2018); también reduce la ingesta de proteínas, los niveles tolerables de estrés en los organismos cultivados y mejora el crecimiento (Azim y Little, 2008; Luo *et al.*, 2014).

Se ha propuesto el uso de TBF como sustituto de la harina de pescado (Ogello *et al.*, 2014). Este sistema de producción ha sido altamente reconocido debido al alcance que ha tenido para reducir la FCA, aumentar el crecimiento, aprovechar los residuos, suministrar alimentos con menor contenido de proteínas, reciclaje y disposición constante de alimento para los organismos (Becerril-Cortés *et al.*, 2018; Crab *et al.*, 2012; De Schryver *et al.*, 2008; Gallardo-Collí *et al.*, 2019a, 2019b; Hargreaves, 2013; Pinho *et al.*, 2017).

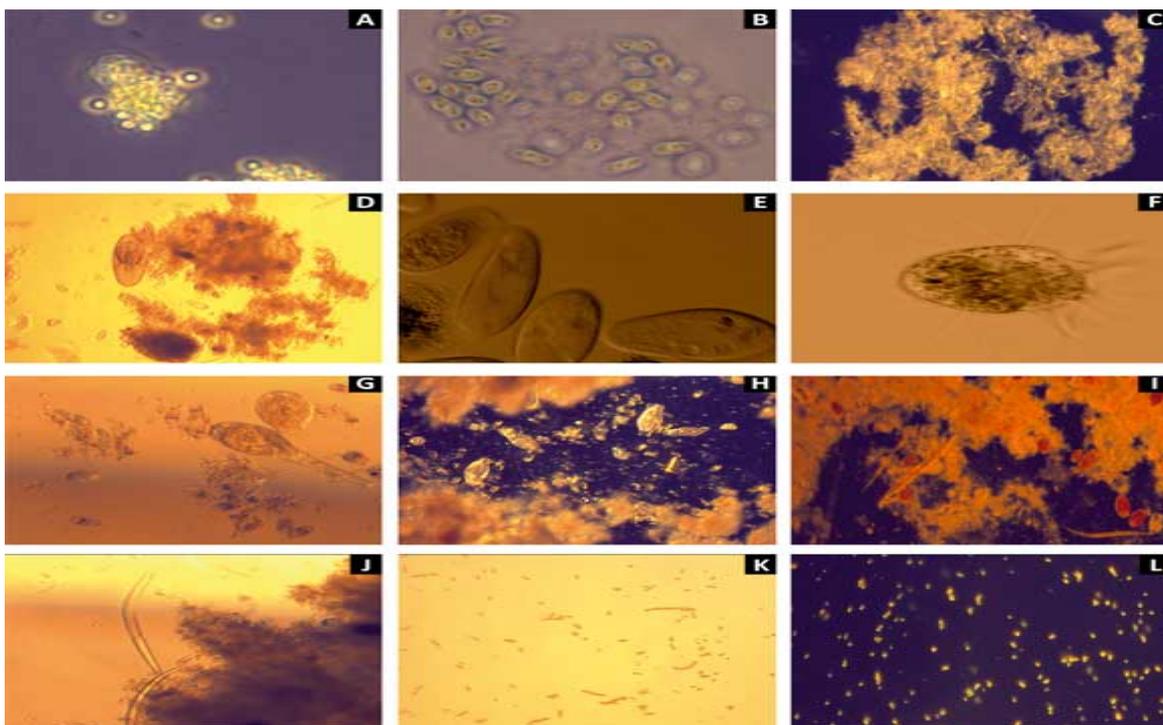


Figura 4. Diversidad de la comunidad que convive en el floc. A) algas clorofitas (40x); B) Cianobacterias (40x); C) Diatomeas (10x); D) Ciliado del genero *Paramecium* (40x); E) Ciliado del genero *Colpidium* (100x); F) Ciliado del genero *Halteria* (100x); G) Rotíferos y ciliados (40x); H) Rotíferos del género *Philodina* (40x); I) Rotíferos y nematodos unidos a los flóculos bacterianos (40x); J) nematodos (40x); K) *Vibrio* sp. (40x); L) Levadura *Rhodotorula* sp. (40x). Foto y datos obtenidos de: Monroy-Dosta *et al.* (2013).

Una de las características importantes de TBF es la interacción llevada a cabo por los microorganismos y el tanque de cultivo, lo que permite que se mantengan las condiciones estables (Fig. 3b y c) (Avnimelech, 2007; Martínez-Córdova *et al.*, 2017; Martínez-Porchas y Vargas-Albores, 2017). Los microorganismos que habitan en el sistema cumplen tres funciones importantes: (i) mantenimiento de la calidad del agua por absorción de compuestos de nitrógeno que genera proteína microbiana "*in situ*"; (ii) nutrición que aumenta la viabilidad del cultivo al reducir el FCA y disminuir los costos al utilizar menos alimento; y (iii) competencia de patógenos (Emerenciano *et al.*, 2017). TBF, visto desde un punto de vista ambiental, tiene la

ventaja principal de minimizar la liberación de agua que contiene materia orgánica residual en ríos, lagos y estuarios (Emerenciano *et al.*, 2013).

1.3 La alimentación y los nutrientes residuales

Los alimentos representan aproximadamente el 50-70% de los costos de producción (Valente *et al.*, 2011). En dependencia del tipo de alimento, su desperdicio puede oscilar entre el 1-38%, así también por las prácticas de alimentación, los métodos de cultivo y la especie utilizada; además es una de las fuentes más importantes que contribuyen a la carga orgánica y de nutrientes (responsable de los impactos ambientales) (Cho y Bureau, 2001; Wu *et al.*, 1995).

La proteína es el mayor componente orgánico en el tejido de los peces, constituye del 45-75% del total del cuerpo en base a la materia seca (El-dahhar, 2007), por lo tanto es la primer limitante para formular dietas costo-efectivas debido a su alto precio en el mercado (Guimarães *et al.*, 2008). En este sentido, el cultivo intensivo de tilapia requiere de la formulación de alimentos eficientes con la capacidad de satisfacer sus requerimientos de proteína durante el periodo de crecimiento (Ahmad *et al.*, 2004). Para juveniles el requerimiento es de 30-40%, para los adultos de 20-30%, para los reproductores del 35-45% de proteína, con estos valores se tiene una óptima reproducción, eficiencia de desove, crecimiento y supervivencia de las larvas (El-Sayed, 2004), sin embargo, por tradición el nivel de alimentación se ajusta de acuerdo con las tablas de alimentación estándar desarrolladas para cada especie (Cho y Bureau, 1997) y debe detenerse cerca de la saciedad (bajo estrecha supervisión).

Por lo que el determinar los requerimientos de proteína, energía y la disponibilidad de datos confiables para lograr el nivel de alimentación adecuado de los peces en un sistema integrado, podría ser un factor clave para reducir los costos de producción, incrementar la rentabilidad del cultivo (El-dahhar, 2007) y garantizar el éxito de la acuicultura (Ahmad *et al.*, 2004; Koch *et al.*, 2016). Hoy en día, la

acuicultura tiene una necesidad crucial: mejorar los alimentos utilizados y reducir los nutrientes excretados en el agua (Fournier *et al.*, 2003).

El nitrógeno (N) y el fósforo (P) son los principales productos residuales de la carga de peces, y pueden afectar no solo el agua de cultivo, sino también el medio ambiente en general (Lazzari y Baldisserotto, 2008). Osti *et al.* (2018) en un cultivo de *O. niloticus* descubrieron que 26% de NT (nitrógeno total) y 45% de PT (fósforo total) se retienen en la biomasa de los peces, 62% de NT y 40% de PT fueron retenidos en el estanque de peces, y el 12% de NT y el 15% de PT se exportaron a través de efluentes. La producción de desechos metabólicos de N y P por los peces fue determinada por numerosos factores endógenos y exógenos como la genética, la etapa de la vida, el tamaño, el sistema de cultivo, la dieta (Lazzari y Baldisserotto, 2008). Comenzar a comprender la relación con el equilibrio de componentes en las dietas y los compuestos residuales en el agua, es muy significativo para el manejo de los residuos en la acuicultura. Es importante reconocer que varios factores contribuyen a esta relación, tales como: el tamaño de los organismos de cultivo, las especies de cultivo, las prácticas, el manejo alimentario y las características de los alimentos.

Los residuales producidos por la acuicultura pueden dividirse en sólidos (fracción sólida) y disueltos (fracción líquida) (Cripps y Bergheim, 2000). Los residuales sólidos pueden clasificarse en sedimentables y suspendidos, procedentes del alimento no consumido o de las heces (Chávez-Crooker y Obreque-Contreras, 2010; Cripps y Bergheim, 2000). Los residuales disueltos provienen de metabolitos excretados por los peces (a través de las branquias o la orina). Otra parte de los residuos disueltos se originan de la desintegración/suspensión de nutrientes residuales de los sólidos presentes en el sistema (Amirkolaie, 2011).

El nitrógeno está asociado a la proteína, la cual es la mayor fuente de este elemento para los peces de cultivo (Valente *et al.*, 2011). En los sistemas acuícolas, solo el 25% del nitrógeno que entra al sistema es cosechado a través de la biomasa de

peces y más del 70% se excreta en forma de amonio (NH_4^+), que al acumularse puede ser tóxico (Hargreaves, 1998; Milstein *et al.*, 2002). Dentro de los sistemas productivos se utilizan tres vías para el procesamiento del amonio: a) consorcio de bacterias autotróficas nitrificantes, b) por consorcios de bacterias heterotróficas donde se requiere una fuente de carbono, para convertir el amonio directamente a biomasa microbiana, c) la remoción por algas a través de procesos fotoautotróficos (Emerenciano *et al.*, 2017). En el primer caso, el amonio se convierte en nitrito dentro del sistema ($\text{NO}_2\text{-N}$) debido a la actividad de las nitroso-bacterias (*Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*, *Nitrospira*, *Nitrosolobus*, y *Nitrosovibrio*), antes de ser transformado en nitrato ($\text{NO}_3\text{-N}$) por las nitro-bacterias (*Nitrobacter*, *Nitrococcus*, *Nitrospira*, y *Nitrospina*) (Ahn, 2006; Hagopian y Riley, 1998). El producto final de esta conversión bacteriana es el nitrato, principal fuente de nitrógeno para el crecimiento de las plantas en sistemas acuapónicos (Bergheim, *et al.*, 1993, 1998).

Alrededor del 7-32% del NT (nitrógeno total) y 30-84% del FT(fósforo total) están en la fracción particulada (FP) (Bergheim *et al.*, 1993), los principales componentes son el alimento no consumido y las heces. Esta fracción requiere separación para un manejo eficiente de la calidad del agua de cultivo, por lo que, el manejo de los residuales sólidos es el proceso más crítico (van Rijn, 2013). La descomposición de sólidos puede degradar la calidad del agua del sistema y de los efluentes, lo cual afecta de manera directa e indirecta la salud de los organismos de cultivo, así como la calidad y trazabilidad del agua descargada del sistema (Summerfelt *et al.*, 1999, 2001).

La eliminación de sólidos también es el objetivo primario del tratamiento de los efluentes de la acuicultura, ya que éstos pueden afectar el medio ambiente acuático y deben ser interceptados y retirados lo más minuciosamente posible antes de ser liberados (Bergheim *et al.*, 1998; Chen *et al.*, 1997; Cripps y Bergheim, 2000; Summerfelt *et al.*, 1999).

Los tratamientos de aguas residuales suelen ser procesos físicos, que incluyen filtros de arena y sistemas mecánicos. Existen también procesos biológicos que utilizan biofiltros sumergidos, filtros de goteo, contactores biológicos rotativos y reactores de lecho fluidizado que se emplean para la oxidación de materia orgánica, nitrificación o desnitrificación (van Rijn, 1996), aunque las desventajas de estos tratamientos son que producen sólidos, requieren mucha más energía y dependen de un mantenimiento frecuente. Por lo tanto, el desarrollo de un tratamiento efectivo y de bajo costo es imprescindible para la expansión actual de la acuicultura (Muga y Mihelcic, 2008).

Una de las estrategias más interesantes para intensificar la producción y al mismo tiempo reducir el desperdicio es el desarrollo de SAR (Badiola *et al.*, 2012). Este sistema está diseñado para recolectar y eliminar productos de desecho, alimentos no consumidos y materia orgánica residual a través de procesos microbiológicos y/o mecánicos en biofiltros, que permiten que los efluentes sean tratados y luego recirculados al sistema (Fig. 2) (Hutchinson *et al.*, 2004; Summerfelt *et al.*, 1999). También ofrece la posibilidad de una producción sostenible a gran escala al reducir en gran medida el uso del espacio, el agua (10% de reemplazo) (Verdegem *et al.*, 2006) y aumentar el control de enfermedades (Midilli *et al.*, 2012). Además, es relevante en áreas donde el suministro de agua y/o los efectos de las cargas nutricionales en los sistemas acuáticos circundantes limitan el alcance actual de la producción acuícola (Martins *et al.*, 2010; Piedrahita, 2003).

1.4 Integración acuícola y producción hortícola

Existen diversos modelos de sistemas integrados que incorporan sistemas SAR o TBF con cultivos vegetales (Hidroponía de cama flotante o la técnica de flujo de nutrientes (TFN) o NFT-Nutrient Film Technique, por sus siglas en Inglés (Okemwa, 2015; Rupasinghe y Kennedy, 2010; Trang *et al.*, 2010), entre ellos se pueden mencionar la acuaponía (producción acuícola + producción vegetal (Bosma *et al.*, 2017; Diver y Rinehart, 2010; Losordo *et al.*, 1999; Rakocy, 2007; Somerville *et al.*,

2014; Wardlow *et al.*, 2002), los policultivos y varios cultivos multitrofos (Barrington *et al.*, 2010; Chopin *et al.*, 2012; Robinson *et al.*, 2008). Entre las ventajas que ofrecen son: utilizar menos superficie, generar dos o más productos con alto rendimiento en un mismo sistema, reciclar los desechos y el agua, poca tasa de recambio, o recambio nulo y reciclamiento de materias primas (Schneider *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2011).

Las características más importantes es reutilizar el residuo que generan los sistemas de acuicultura comunes, en la fracción líquida y sólida. De manera general, la acuaponía podría clasificarse en cultivo acoplado (cerrado) o desacoplado (abierto). La acuaponía combina tres clases de organismos: 1) organismos acuáticos, 2) bacterias, 3) plantas que se benefician unas de otras en un cuerpo de agua recirculada (Fig. 5). El agua sirve como medio de transporte de nutrientes, principalmente de desechos orgánicos disueltos, que las bacterias convierten en nutrientes para el crecimiento de las plantas (Fig. 5). En un sistema de acuaponía, los volúmenes son críticamente importantes, i) la unidad de acuicultura, sistemas de recirculación acuícola (SAR), ii) el sustrato de crecimiento bacteriano y iii) el espacio para las plantas y la cantidad de plantas que se cultivarán. Juntos, forman la unidad de acuaponía (Goddek *et al.*, 2019).

Los sistemas desacoplados difieren de los sistemas acoplados en la medida en que separan los circuitos de agua y nutrientes de la unidad de acuicultura e hidroponía entre sí y, por lo tanto, proporcionan un control de la química del agua en ambos sistemas (Fig. 6) (Goddek *et al.*, 2019). El sistema más común es la incorporación de SAR y una unidad hidropónica, dispuesta en dos ciclos de agua individuales (Goddek *et al.*, 2016). Esto permite manipular los parámetros de la acuicultura e hidroponía, y mantener las características de cada uno de los sistemas (Fig. 6). La transferencia de minerales de la acuicultura a la hidroponía apoyan el reciclaje eficiente de nutrientes (Graber y Junge, 2009; Turcios y Papenbrock, 2014), la reducción de la contaminación, al eliminar la liberación de los efluentes de la

acuicultura a los ambientes acuáticos lo que permite evitar la eutrofización causada por la adición de materia orgánica (Brown *et al.*, 1999; Endo y Takeuchi, 2009).

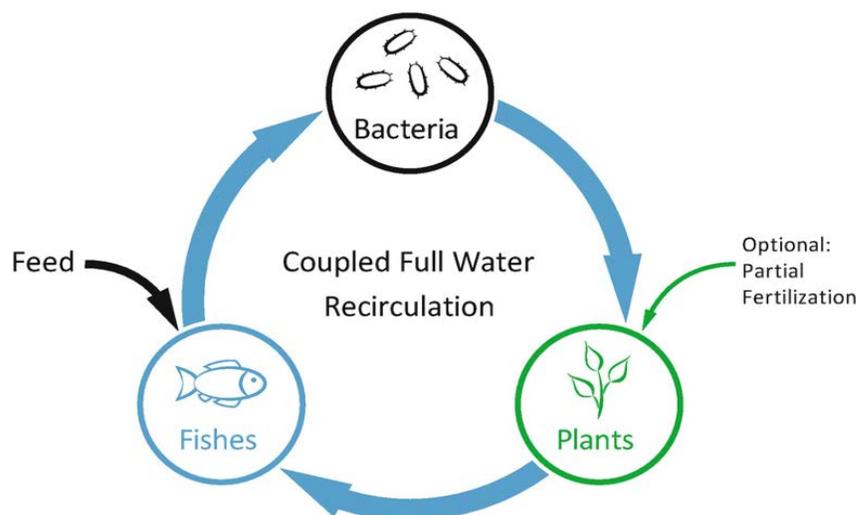


Figura 5. Descripción general de un sistema de acuaponía, con los tres componentes principales; 1) organismos acuáticos, b) agua residual (comunidad bacteriana), c) plantas. Figura obtenida de: Goddek *et al.* (2019).

Este modelo permite incorporar dos o más componentes al sistema, por ejemplo, el proceso de mineralización, o la recuperación de la fracción líquida de la acuicultura y el almacenamiento hasta que lo requiera la fase hidropónica, también permite la recuperación de la fracción sólida (Fig. 6). La fracción sólida puede procesarse mediante mineralización en un componente especial. En sistemas sin recirculación, la eliminación intermitente de cantidades considerables de agua rica en nutrientes conduce a un alto consumo de ésta, así como a su contaminación de las aguas superficiales y subterráneas (Goddek *et al.*, 2015). Por lo que la unificación y la implementación de técnicas que permitan la reutilización de la fracción líquida como la sólida, es una de las vías apremiantes para el desarrollo de sistemas integrados más ecoeficientes. Existen diversas vías posibles para la eliminación benéfica de los desechos orgánicos de la acuicultura, especialmente de la fracción particulada: aplicación en terrenos agrícolas, compostaje y la implementación en sistemas integrados como la acuaponía o hidroponía (Yeo *et al.*, 2004), sin embargo, no se han aplicado de manera permanente ni constante a los sistemas acuícolas.

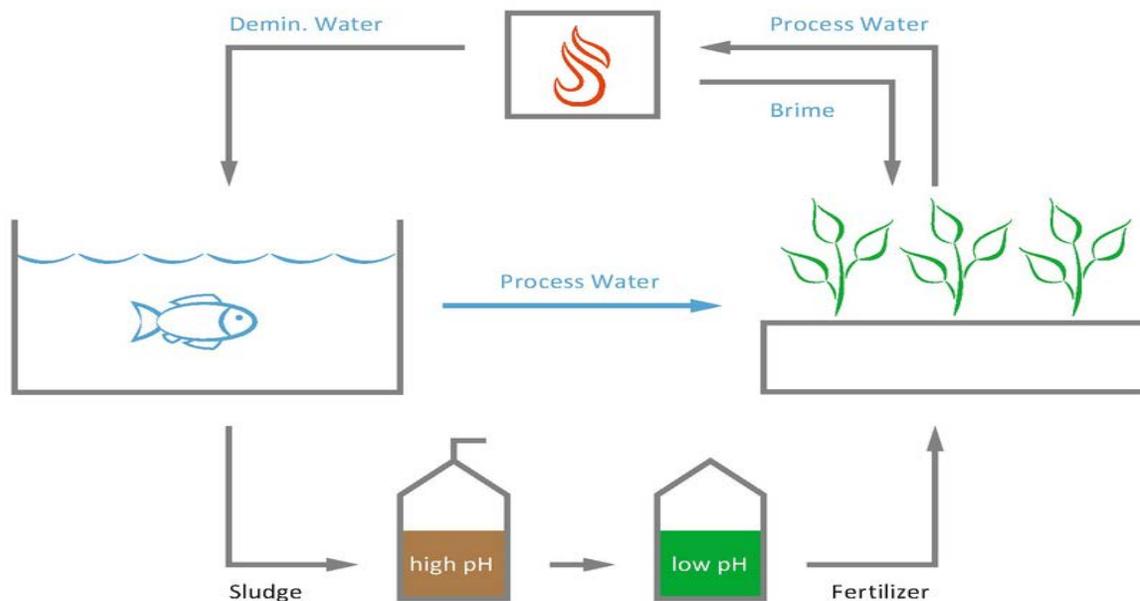


Figura 6. Sistema desacoplado de acuaponía, posee tres componentes principales; 1) organismos acuáticos, b) agua residual (comunidad bacteriana), c) plantas. Figura obtenida de: Goddek *et al.* (2019).

Las tasas de remoción de nutrientes y reutilización del agua en los sistemas hidropónicos varían ampliamente, en dependencia del medio utilizado para el cultivo de las plantas, del flujo y del tipo de planta. Por ejemplo, las tasas de eliminación de nitratos y fósforo oscilan entre el 9-93% y entre el 0-53%, respectivamente (Graber y Junge, 2009; Endut *et al.*, 2010). La incorporación de la fracción sólida la cual es rica en nutrientes como fósforo, potasio, calcio, nutrientes que son necesarios en el cultivo de plantas (Fimbres, 2015), constituye actualmente un problema. Debido a esto, en años recientes se han implementado métodos eficientes de mineralización en los sistemas de acuaponía (da Silva Cerozi, 2016) (procesos utilizados en el tratamiento de residuos municipales), al ser una metodología sencilla que permite darle tratamiento a los residuales sólidos, sin embargo, su incorporación en los sistemas de producción hortícola no es común.

En la actualidad, ha surgido una tendencia globalizada para empoderar a los sectores más vulnerables en el uso de sistemas integrados (sistemas acoplados o desacoplados) para mejorar la ingesta de alimentos ricos en proteínas (Naylor *et al.*, 2000). Por lo tanto, la implementación y el desarrollo de sistemas integrados promete ser un sector en crecimiento en las siguientes décadas (Barrington *et al.*, 2010; Béné *et al.*, 2016; Jhansi y Mishra, 2013; FAO, 2018).

2. ANTECEDENTES

2.1 Sistemas integrados: implementación de SAR y TBF con hidroponía

En los últimos años ha comenzado una revolución en el diseño e implementación de nuevos modelos de producción acuícola. El modelo convencional (RAS, TBF, hidroponía), se modifica para vincular estas ventajas y fortalecer las producciones. Goddek *et al.* (2019), describen varios sistemas nuevos: algaponía, aeroponía,

maraponía, haloponía, TBF y acuaponía vertical. Para los intereses de este trabajo, nos centraremos en el desarrollo de SAR-Hidroponía (Acuaponía) y TBF + Hidroponía.

En la década de 1950, SAR se implementó en regiones áridas, con el fin de tener un mejor uso del agua. Estos son sistemas complejos de producción acuática que involucran una variedad de interacciones físicas, químicas y biológicas (Goddek *et al.*, 2019). La tasa de reutilización del agua puede variar entre 80 y 99% y eso reduce el impacto ambiental de la acuicultura y el requerimiento de agua (Tidwell, 2012), pero la eliminación de la fracción particulada de dichos sistemas es problemática, lo que condujo al advenimiento de la acuaponía; que consiste en una combinación de SAR y un sistema hidropónico (Rakocy, 2007) en el que el reciclaje de nutrientes producidos por los peces es utilizado como fertilizante para las plantas. Este sistema demostró ser una solución innovadora para la descarga de desechos además de generar ventajas económicas, al producir un segundo producto comercializable (Fig. 7) (Goddek *et al.*, 2019).

A principios de la década de 1990, dos grupos que trabajaban independientemente en Israel en la Universidad Technion y en los Estados Unidos en el Centro de Maricultura de Waddell (WMC) comenzaron a publicar una serie de documentos sobre la aplicación de tecnologías de producción con intercambio de agua reducido y luego cero recambio para tilapia y camarón, respectivamente, aquí nació TBF (Ray, Leffler y Avnimelech en Tidwell, 2012).

TBF ha crecido en los últimos veinte años; actualmente se aplica en estanques, tanques o raceways de varias escalas (Ray, Leffler y Avnimelech en Tidwell, 2012). En general se ha expandido por éxito en la cría de camarones a gran escala en Asia, América Central y del Sur, así como en invernaderos a pequeña escala en los Estados Unidos, Europa y en México, Brasil, Ecuador y Perú con la fase de maternidad, y en México, Colombia e Israel para fines comerciales para el cultivo de tilapia a gran escala. La tilapia y el camarón son los modelos biológicos más

usados para aprovechar la productividad natural en los sistemas de acuicultura (Ray *et al.*, 2010).

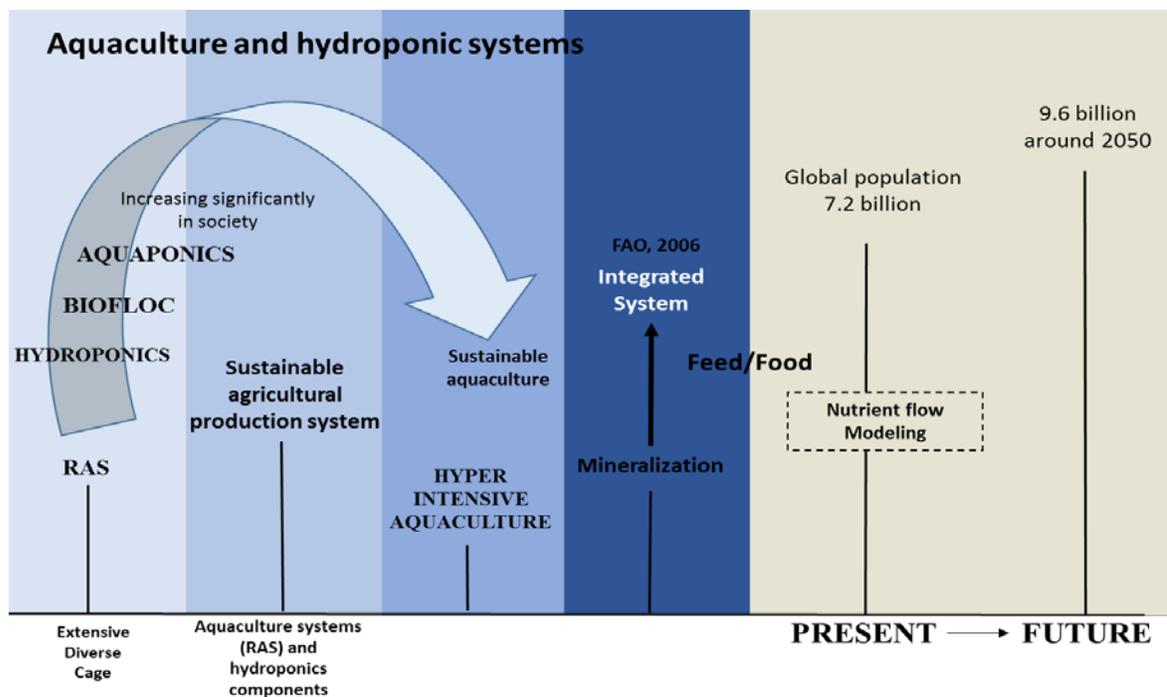


Figura 7. Esquema general de la evolución de los sistemas acuícolas. Incluye los métodos de mineralización (Esquema diseñado por el autor).

Los bioflocs son microambientes ricos en nutrientes integrados en el agua pobre en nutrientes. Estos sistemas pueden proporcionar una producción acuícola relativamente biosegura, más benigna para el medio ambiente y financieramente sostenible (Ray, Leffler y Avnimelech en Tidwell, 2012). Una nueva tendencia es la unificación TBF + hidroponía, donde dos procesos importantes que ocurren en TBF podrían ser la clave para la integración con la hidroponía: asimilación del exceso de nitrógeno en biomasa microbiana (las bacterias nitrificantes finalmente transforman el amoníaco tóxico en un compuesto de nitrato relativamente no tóxico) (Crab *et al.*, 2007), nutriente que tiene una alta afinidad con las plantas y su mineralización a través de procesos de nitrificación y desnitrificación (Goddek *et al.*, 2019).

Los primeros trabajos que implementan los efluentes de biofloc son: (Pinho *et al.*, 2017) que incorporo los efluentes de biofloc con cultivo de lechuga, (da Rocha *et al.*, 2017) que comparó la producción de lechuga entre acuaponía y biofloc con bagre plateado, Lenz *et al.* (2017) quienes describieron la producción de lechuga con efluentes de TBF con baja salinidad y Gallardo-Collí *et al.* (2019a) quienes reutilizaron los efluentes de biofloc para el cultivo de tilapia.

Algo que necesita llamar la atención al aumentar esta tendencia de unificación es la concentración de sólidos, que pueden afectar las raíces e impactar en la absorción de nutrientes y la disponibilidad de oxígeno. El manejo de sólidos es un tema importante para futuros estudios donde se debe considerar el impacto de los sólidos (fracción particulada y también fracción disuelta) en los sistemas de acuaponía cuando se aplica TBF (Goddek *et al.*, 2019) que puede conducir a un proceso anaeróbico en el sistema (Avnimelech, 2003).

2.2 Flujo de macro y micro nutrientes

Una técnica importante para el éxito de los sistemas integrados es el flujo de nutrientes y el equilibrio entre la producción y el consumo de nutrientes (Love *et al.*, 2015b); si alguno de estos componentes falla en el sistema, puede producirse un desequilibrio que impide mantener la producción; otro factor importante es la talla del cultivo, la densidad y las características biológicas de los organismos junto con los parámetros físicos (temperatura, OD, pH) (Love *et al.*, 2015a).

El flujo de nutrientes es una herramienta útil, pero solo el flujo de nutrientes N y P se ha descrito en acuaponía (Cerozi y Fitzsimmons, 2017; Yogev *et al.*, 2016, 2017), con menos énfasis en macro y micronutrientes de gran interés, como K, Ca, Mg, Mn, Co, como se informó en Ru *et al.* (2017). Entre los pocos estudios que describieron el flujo de macro y micronutrientes se encuentra Seawright *et al.* (1998) quienes detallaron el flujo de nutrientes en un sistema integrado por acuicultura e hidroponía y analizaron las concentraciones de Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, NO-N, Na, P y Zn en relación con el aumento de biomasa en un cultivo de tilapia y lechuga

(*Lactuca sativa longifolia*). Los autores destacaron las deficiencias en los nutrientes para cultivos hidropónicos; más tarde, Buzby y Lin (2014) indicaron la importancia del equilibrio de nutrientes en un sistema de acuaponía con lechuga y flores del género *Nasturtium* spp., modelos que les permitieron evaluar la eliminación de TAN y NO₃.

Para la descripción del flujo de nutrientes, se ha analizado su concentración, crecimiento y los efectos en los cultivos según el medio utilizado y cómo se utilizaron (Roosta y Afsharipoor, 2012; Roosta y Hamidpour, 2011). Endut *et al.* (2016), describieron el equilibrio de nutrientes en un sistema de acuaponía con recirculación con espinaca (*Iponema aquatica*), mostaza (*Brassica juncea*) y bagre africano (*Clarias Garierpinus*) y observaron que la mostaza absorbió mayor N, pero la espinaca mantuvo mejor calidad del agua. Rafiee y Saad (2005) analizaron el flujo de nutrientes y la producción de materia orgánica con 5 grupos de tilapia roja de diferentes tamaños y encontraron una correlación entre los nutrientes obtenidos en relación con el tamaño, con una absorción promedio de 11.46% Fe, 13.43% Zn, 6.81% Mn, 3.55% Cu, 26.81% Ca, 20.29% Mg, 32.53% N, 7.16% K y 15.98% P. Sin embargo, en estas descripciones la implementación de PF en sistemas de acuaponía ha sido nula. Previo al presente estudio, el contenido nutricional de la fracción particulada se ha descrito por Fimbres (2015) quien encontró altos valores de P, Mg y K; sin embargo, de manera general su aplicación se ha utilizado solo en humedales, con exclusión de los sistemas integrados (acuaponía, hidroponía).

2.3 Eficiencia en la alimentación

Existe una gran cantidad de datos referente a la alimentación de las especies de cultivo, debido a que esta actividad genera los mayores gastos de producción (El-Saidy y Gaber, 2005; Koch *et al.*, 2016; Ng *et al.*, 2013) ya que no solo es la dieta suministrada sino la cantidad de proteína que ésta debe contener. Abdel-Tawwab *et al.* (2010) analizaron distintas etapas de desarrollo con alimentos de 25, 35 y 45% de proteína en larvas (0.4-0.5 g), crías (17-22 g) y juveniles (37-43 g) de tilapia, y

encontraron una relación en el crecimiento, FCA y peso específico ganado; para los alevines el mejor alimento fue de 45% de proteína para las crías y juveniles fue el 35%. Otros elementos han sido estudiados como el concepto de proteína ideal (Furuya *et al.*, 2004), así también diversos métodos alimentación se han detectado en el cultivo de tilapia entre ellos: la saciedad (Kasper y Brown, 2003; Koch *et al.*, 2016; Lin y Luo, 2011; Trosvik *et al.*, 2013), alimentación alternada (Bolivar y Jimenez, 2006), alimentación con base en el % de peso fijo durante el experimento (Abdelghany y Ahmad, 2002; Azim y Little, 2008; Liu *et al.*, 2018; Nguyen *et al.*, 2009; Ogunji y Wirth, 2000; Sun *et al.*, 2016; Thompson *et al.*, 2012; Tran-Duy *et al.*, 2008), con variación del porcentaje desde el 2% al 16% en dependencia del peso del organismo (Fasakin *et al.*, 2005; Loum *et al.*, 2013), alimentación a través de crecimiento compensatorio (Mohanta *et al.*, 2016) y, alimentación utilizando g/kg (5 g de alimento por cada 100 g de peso del organismo) (Richter *et al.*, 2003).

A finales de los años 90, la agencia de Pesquerías de Japón diseñó un modelo de alimentación que fue aplicado por la Universidad de Tokio de Ciencias Marinas y Tecnología, dicho modelo proporciona una ecuación que permite racionar el alimento de acuerdo con el requerimiento diario de proteína, con lo que se evitó su desperdicio y brindó a los organismos de cultivo la cantidad adecuada de proteína sin importar su porcentaje contenido en el alimento (Fisheries Agency of Japan, 1995). En años recientes se han desarrollado modelos para definir la cantidad de proteína y energía (Belal, 2005). Van Trung *et al.* (2011) diseñaron un modelo factorial bioenergético, en donde analizaron gran cantidad de parámetros que permiten determinar las especificaciones óptimas de proteína y energía dietética para *O. niloticus*.

2.4 Efluentes de SAR Y TBF

La materia orgánica residual ha sido un problema en los sistemas de producción acuícola, por el impacto ambientales que generan al descargar importantes concentraciones de N y P (eutrofización, contaminación de la zona costera,

mortandad de la fauna aledaña, contaminación por antibióticos y residuos químicos, floraciones algales, entre otros) (Endo y Takeuchi, 2009; Michael-Kordatou *et al.*, 2015; Turcios y Papenbrock, 2014). En respuesta a ello, se han desarrollado sistemas de producción integrada ya sea por acuaponía, agricultura, fertirriego, o en SAR, en donde se aprovecha la fracción líquida, por su riqueza en componentes nitrogenados, donde el 25% del N contenido en el alimento es retenido por los peces con una liberación del 77%, del cual, el 62% se va en dicha fracción líquida (FL) y el 13% en la fracción particulada (FP) (Hargreaves, 1998). Los sistemas más comunes para tratar esta fracción es la implementación de biofiltros, que permiten convertir las sustancias tóxicas como el amonio en nitratos. Sin embargo, para un óptimo funcionamiento deben existir las condiciones adecuadas de temperatura, pH y OD, para que las comunidades bacterianas nitrificantes prevalezcan (Schneider *et al.*, 2005).

Dada la importancia de la FP se han implementado diversas técnicas para la eliminación o reducción de la materia orgánica residual; la digestión, deshidratación, el uso de bio-bolsas, los filtros de correa, reactores de membrana, ya sea individual o en conjunto, para lograr la coagulación o floculación de los sólidos suspendidos (van Rijn, 2013). El método más sencillo es la sedimentación, sin embargo, no retira la materia orgánica disuelta, por lo que la implementación y diseño de modelos para tratar estos residuos ha sido un tema de más de dos décadas, de esta forma ahora se tienen sistemas como TBF y de humedales (Lin *et al.*, 2002; Sindilariu *et al.*, 2007; Uggetti *et al.*, 2010) o incluso ha sido utilizada como fertilizante para plantas terrestres o reducido a fertilizante inorgánico para tierras de cultivo (Rafiee y Saad, 2005).

Otro proceso importante implementado en las plantas de tratamiento de aguas residuales es la mineralización (Lovley y Phillips, 1986; Parameswaran y Anderson, 2007; Tampio *et al.*, 2016; Trzcinski y Stuckey, 2009; Zech *et al.*, 1997), técnica que

en los últimos años se ha incorporado en los sistemas integrados (Cerozi y Fitzsimmons, 2017). Dentro de los procesos que se han descrito se encuentra la mineralización anaeróbica, ésta se lleva a cabo en la ausencia de oxígeno, donde las bacterias mineralizan los compuestos, liberan metano y dióxido de carbono (McKennedy y Sherlock, 2015), es un método muy utilizado para procesar la materia orgánica residual, producir energía en forma de biogás y residuales ricos en nutrientes “producto de biodigestor” (Garfí *et al.*, 2016; Lovley y Phillips, 1986). Estos residuales se han utilizado en la agricultura para incrementar la calidad del suelo, retención del agua, incrementos en la germinación por uso del producto de biodigestor, con los mismos o mejores resultados que con los fertilizantes químicos (Sattari *et al.*, 2012; Saveyn y Eder, 2014). Si bien los digestores aeróbicos son poco implementados para el tratamiento de la FP, su función es mineralizar esta fracción a través de la aireación, la cual debe ser continua (Fimbres, 2015). Los bioreactores anaeróbicos y aeróbicos, se han implementado para contrarrestar los factores negativos de ambos sistemas, cuando se trabajan de manera individual. En la actualidad existen cuatro tipos de bioreactores: 1) bioreactores integrados con separación física de la zona aeróbica - anaeróbica, 2) bioreactores integrados sin separación física de la zona aeróbica - anaeróbica, 3) secuencia de reactores anaeróbicos- aeróbicos, 4) combinación de cultivos aeróbicos – anaeróbicos (Chan *et al.*, 2009; Novak *et al.*, 2011; Parameswaran y Anderson, 2007).

Otra técnica es la deshidratación de la materia orgánica que permite su manipulación, traslado y procesamiento, una tecnología utilizada previa al compostaje, incineración o relleno (Uggetti *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2004), pero este proceso involucra técnicas mecánicas previas como: la centrifugación, filtración, u otros procesos como la evaporación, evapotranspiración y percolación. La implementación de humedales contiguos a las zonas de producción es una técnica que se ha implementado para el tratamiento de la FP residual de los cultivos acuícolas, que se ha usado en Europa desde los años 80's (Lin *et al.*, 2002; Sindilariu *et al.*, 2007; Uggetti *et al.*, 2010). A pesar de los avances en esta materia,

la preocupación por el incremento en las intensificaciones de los cultivos que viene ligada al incremento en la producción de materia orgánica residual (Buhmann y Papenbrock, 2013; Lin *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2011), ha llevado a abrir otras líneas de investigación para reducir la producción de materia orgánica en los cultivos a través de aumentar la digestibilidad en las dietas, implementar planes de alimentación más rigurosos, dietas más apegadas a las necesidades de las especies, implementación de mecanismos más sofisticados para retirar y tratar la materia orgánica residual (Essa *et al.*, 2010; Santos *et al.*, 2016, 2019; Standen *et al.*, 2016). Otros métodos que se han aplicado es la digestión enzimática e hidrólisis ácida, mediante el uso de ácido sulfúrico o ácido nítrico como precursor para la mineralización (Endo, 2012; Tahan *et al.*, 1993; Tampio *et al.*, 2016). De acuerdo con lo anterior, la propuesta del presente trabajo es el uso de la FP para cultivos hidropónicos.

2.5 Balance de masas y modelación del flujo de nutrientes

El balance de masas es una herramienta que se utiliza para cuantificar de manera teórica la producción de materia orgánica de desecho (Heinsbroek y Kamstra, 1990). El balance de masas puede incluir n cantidad de factores que intervienen en la producción; un aspecto importante es determinar la calidad del agua al inicio de la siembra para un balance de masas adecuado. El balance de masas se ha aplicado en los sistemas SAR como herramienta para cuantificar el funcionamiento, dimensionar el volumen de los componentes del sistema y, conocer qué tipo de nutrientes se generan (Hermoso *et al.*, 2016).

El balance de masas se ha aplicado a N y P por ser los nutrientes que más genera el sistema de cultivo. No solo ha sido analizado en SAR, Paéz-Osuna y colaboradores en 1997, caracterizaron el flujo de nutrientes y el balance de masas en un cultivo semi-intensivo de camarón, ellos describieron las entradas y salidas de N y P del sistema y destacaron que este tipo de estudios, permite entender los procesos asociados con el ambiente originado por la entrada de nutrientes, lo que

a su vez ha generado información importante para la toma de decisiones. Casillas-Hernández *et al.* (2006) describieron el flujo de nutrientes y el balance de masas de un cultivo de camarón con dos métodos de alimentación, en los que lograron cuantificar las ganancias y pérdidas de N y P del sistema utilizado.

Este tipo de herramientas ha permitido dilucidar la utilización y aprovechamiento del alimento, la eficiencia en su consumo y, la calidad del agua, así también entender con mayor precisión los procesos biogeoquímicos que se llevan a cabo en el sistema de cultivo (Casillas-Hernández *et al.*, 2006). Los flujos de N y P y sus retenciones se basan en el concepto: salida = entrada - retención. Esta retención puede expresarse como g/kg de alimento (peso húmedo) o como fracción del nutriente total administrado con el alimento (% de nutrientes en el alimento).

La retención de N y P, se estima con base en la composición proximal de los organismos del cultivo, las tasas de conversión alimenticia (FCA) y las tasas de producción (Schneider *et al.*, 2005). Los sistemas de SAR modernos, implementan programas computarizados para el balance de masas, para determinar las salidas y entradas, los cambios internos (conversiones y consumos) generados en el sistema de producción ya que esto permite visualizar los cambios que podrían darse y así mantener valores adecuados de TAN, NO₂, NO₃ y otros nutrientes (Fig. 8) (Hutchinson *et al.*, 2004).

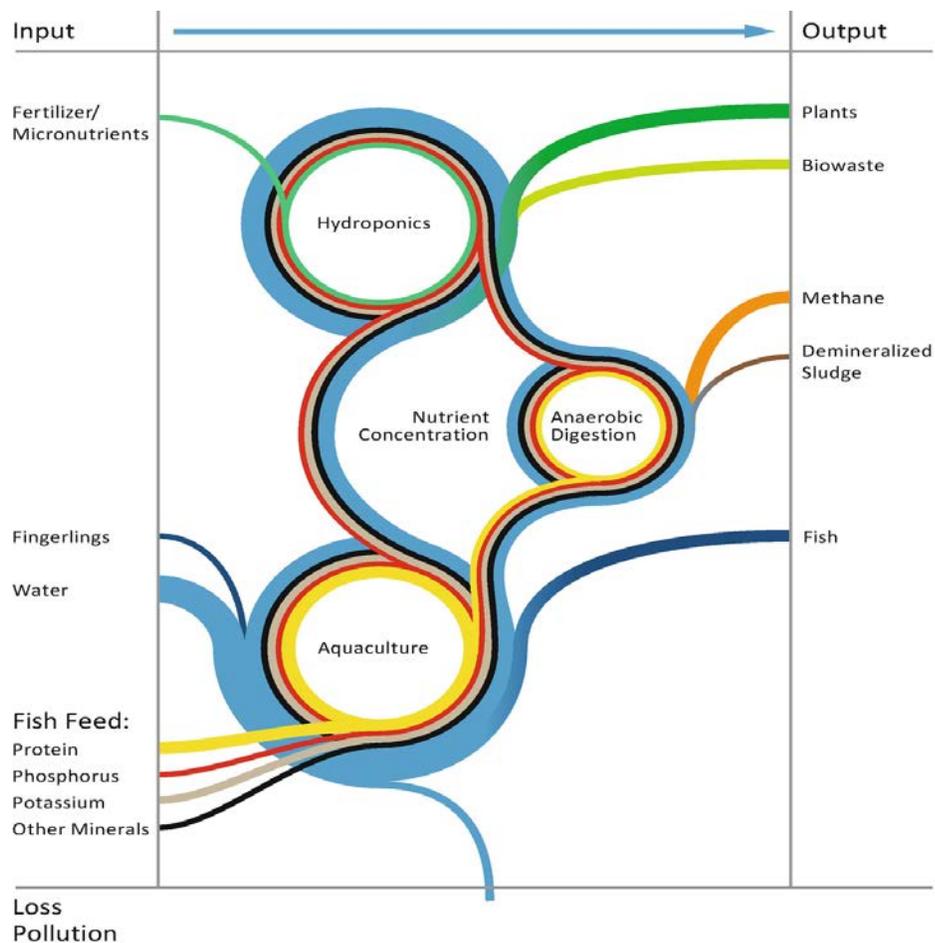


Figura 8. Esquema general que muestra todos los puntos que participan en el flujo de nutrientes en un sistema desacoplado. Figura obtenida de Goddek *et al.* (2019).

3. JUSTIFICACIÓN

3.1 Importancia Científica

La acuicultura intensiva sustentable es la modalidad a la que tenderán los sistemas de producción acuícola. Por lo que, para el desarrollo de sistemas más eficientes,

se requiere generar estrategias para la descripción, manejo e implementación de los residuales en cultivos asociados, para aumentar la producción con la reutilización de la materia prima y del agua.

3.2 Importancia Tecnológica

Desarrollar e implementar metodologías que favorezcan la reducción de la cantidad de materia orgánica que se desecha, a la vez que se optimiza el flujo de nutrientes y su modelación de acuerdo con las necesidades del sistema para las producciones intensivas.

3.3 Importancia para el desarrollo

La transferencia de modelos de producción que favorecen el establecimiento de dos cultivos intensivos en un mismo sistema, con el uso de metodologías que puedan ser implementadas para la recuperación y manejo de residuales dentro de los sistemas SAR o TBF y una fase hortícola.

3.3.1 Pertinencia económica

Al implementar un sistema de producción intensivo, donde se usen los residuales generados en una fase hortícola, se puede reducir la cantidad de insumos químicos requeridos con un menor impacto ambiental que los sistemas de producción convencionales.

3.3.2 Pertinencia ambiental

Cuando la fracción particulada de la materia orgánica residual se libera al ambiente, puede causar problemas de contaminación, eutrofización de la zona costera y desperdicio de nutrientes con alto valor económico y nutricional como el fósforo (nutriente finito de alto valor). El sistema desarrollado con la metodología utilizada permitirá recuperar la materia orgánica que actualmente se desperdicia, para usarla en un cultivo alterno intensivo que posibilite dos producciones y por ende mayor biomasa.

3.3.3 Pertinencia social

El objetivo final del proyecto es generar un prototipo de sistema de producción integrado que permita tener cultivos intensivos en ambas fases (acuícola e hidropónica), además de aprovechar todos los nutrientes que el sistema genere.

4. HIPÓTESIS

1. Si la ingesta de proteína en el cultivo SAR está relacionada con el crecimiento, el FCA y la producción de residuales (N y P) en el cultivo de *O. niloticus*, entonces la

implementación del método de ingesta diaria de proteína (IDP) (modelo matemático) para controlar la cantidad de proteína que *O. niloticus* recibe durante el cultivo podría mejorar el rendimiento de la producción, el FCA y la cantidad de residuos (N y P) que produce el sistema.

2. Si la comunidad heterotrófica y quimioautotrófica en TBF promueve la eficiencia en el ciclo del nitrógeno y mejora la nutrición en el cultivo de *O. niloticus* entonces implementación una fase fotoautotrófica con *Chlorella* spp., *C. sorokiniana-2805* y *C. sorokiniana-2714* podría aumentar la producción, supervivencia y nutrición en la fase de maternidad y engorda en *O. niloticus*.

3. Si los residuos líquidos y particulados de los sistemas de acuicultura (SAR y TBF) son ricos en nutrientes, entonces su recuperación, mineralización e implementación proporcionarán los nutrientes necesarios para un sistema integrado (TFN) con una fase hortícola.

5. OBJETIVOS

5.1 Objetivo general

- Caracterizar el flujo de macro y micro nutrientes en un sistema integrado por una fase acuícola en ambientes SAR y TBF y, una fase hortícola hidropónica en TFN.

5.2 Objetivos particulares

1. Conocer el flujo de macro y micro nutrientes en un sistema integrado por una fase acuícola en ambientes SAR y TBF, una fase de bioprocesos y una fase hortícola hidropónica en TFN.
2. Modelar el flujo de macro y micro nutrientes en un sistema integrado, en función de la ingesta diaria de proteína (IDP), factores de biofloculación (fase quimioautotrófica, heterótrofica y fotoautotrófica), biomineralización de residuales y complementación de nutrientes en horticultura hidropónica.
3. Estimar la producción vegetal en la fase hortícola a través de la implementación de los efluentes producidos por los procesos de biofloculación.

6. MATERIAL Y MÉTODOS

Los experimentos realizados se dividieron en cuatro áreas: 1) Fase acuícola en SAR, 2) Fase acuícola en TBF, 3) Procesos de mineralización, 4) Fase hortícola en TFN (Técnica de flujo de nutrientes) (Fig. 9), cada fase corresponde a un experimento.

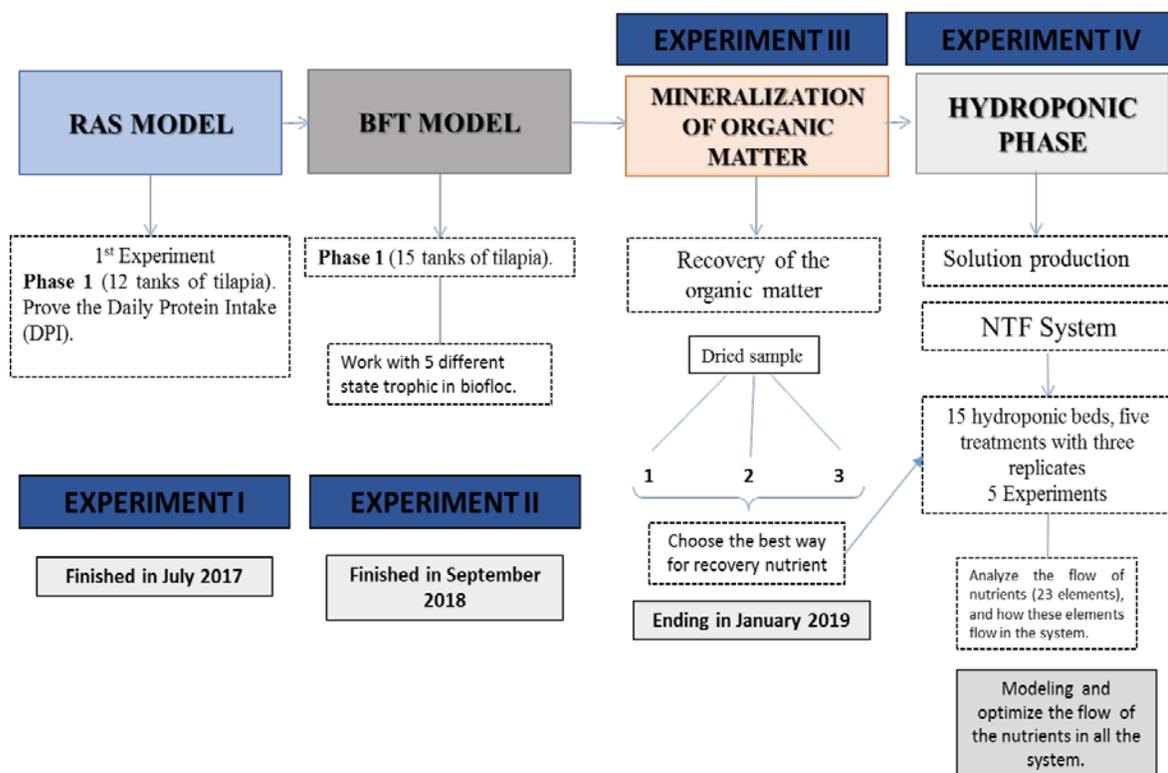


Figura 9. Diagrama con las características generales del experimento. I) Modelo SAR (Experimento I), II) Modelo TBF (Experimento II), III) Proceso de mineralización con la fracción sólida de SAR y TBF (Experimento III), IV) TFN hidropónico (Experimento IV). La línea de tiempo comienza en 2016 a 2019.

EXPERIMENTO I - SAR

6.1 Sistema Biológico para SAR

Se utilizaron organismos masculinizados de *Oreochromis niloticus* que se obtuvieron de la unidad UNCIBNOR ubicada en Nayarit, con tallas de 2.3 ± 0.8 g (n=90). Posterior a su desembarque se sometieron a un proceso de aclimatación y crecimiento (15 semanas) hasta alcanzar la talla para el primer experimento (70 g).

Durante este tiempo se suministró alimento Nutripec, Purina-Cargill® con 44% de proteína (IDP 1.0), 6 veces al día.



Figura 10. Invernadero Proyecto SATREPS, JICA-JST recubierto de plástico, malla antifidos y Luminet® con reducción del 20%. Dividido en tres áreas experimentales: 1^{ra} fase acuícola en SAR, 2^{da} fase hidropónica en cama flotante y 3^{ra} fase para cultivo en suelo por ferti-irrigación. El Experimento I, se llevó a cabo en la fase acuícola del invernadero.

6.1.1 Disposición del sistema SAR antes del Experimento I

El sistema fue entregado por la empresa constructora con una serie de irregularidades que impidieron la operación óptima del sistema. Las principales omisiones estaban en el tanque de sedimentación. Para el funcionamiento del sistema SAR, fue necesario trabajar en tres líneas, durante un mes: 1) la implementación de complementos para el tanque de sedimentación (clarificadores, accesorio para adición de partículas, y amortiguador de pH, 2) implementación de una flauta para optimizar el flujo y la caída de agua desde el tanque de nitrificación hasta el tanque de peces, 3) Instalación de la aireación en el tanque de mineralización (Fig.13).

6.1.2 Condiciones Preliminares Experimento SAR

El estudio se llevó a cabo en el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR - BIOHELIS) (Fig. 10) en la Paz, B.C.S., México, en donde se estableció un sistema compuesto por 12 tanques con capacidad de 1 m³ (Fig. 12). Cada unidad está conformada por un sedimentador cónico (156 L), un fraccionador de espuma

(5 L), un bio-nitrificador (339 L, con 0.1 m³ de biomedio (35 mm x 18 mm), una bomba sumergible (60 W, capacidad 500 GPH, EVANS®, Jalisco, México) y un mineralizador (89 L) (Fig. 13). El sistema se mantuvo con aireación a través de un blower de 1 Hp y en cada unidad se manejó una densidad de 100 org/m³. Se aplicaron tres tratamientos con cuatro réplicas.

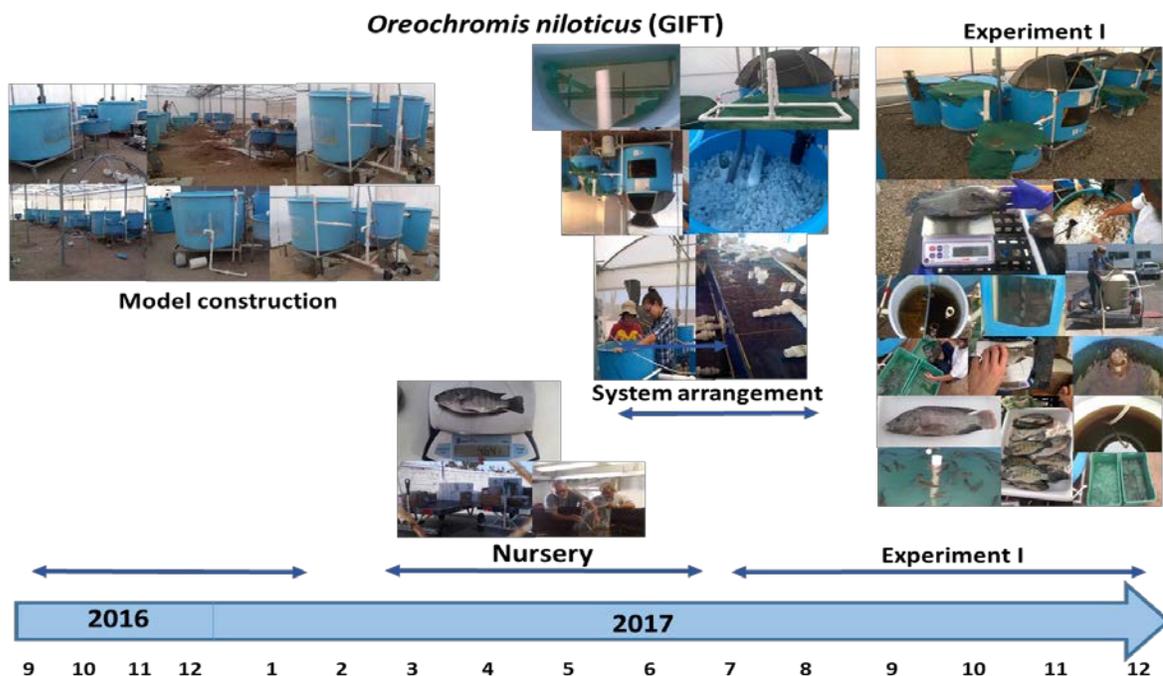


Figura 11. Cronología del Experimento I: construcción, arreglos, maternidad y engorda. 2016 a 2017.

La recirculación del agua en el sistema va del tanque de peces de 1 m³ al sedimentador (156 L); luego, se separa y se contiene la fracción particulada (PF). La fracción líquida (LF) para al fraccionar de espuma para eliminar los sedimentos finos y después al bionitrificador (339 L) donde posteriormente regresa al tanque de cultivo. Un ciclo completo de recirculación en el sistema SAR era cada 47.6 min (Fig. 13).



Figura 12. SAR conformado por 12 unidades individuales con recirculación. Los tanques se cubrieron con una cúpula de malla sombra negra (retención de luz del 60%). Los tanques, sedimentadores, bionitrificadores y mineralizadores fueron fabricados con fibra de vidrio, recubierta con pintura epóxica de alta calidad color azul.



Figura 13. Sistema individual conformado por: a) 1 tanque de 1 m³, b) un sedimentador de 156 L, c) un fraccionador de espuma 5 L, d) un bionitrificador 339 L, e) un tanque cónico de mineralización 89 L y, f) una bomba 60 W. Las flechas negras indican el flujo del agua dentro del sistema: 1-4 indican el flujo de la FL y 1, 2, 5 indican el flujo de la FP. FL= fracción líquida, FP=fracción particulada.

6.1.3 Diseño experimental SAR

El peso inicial de los organismos fue de 76.9 ± 3.94 g ($n=90$). De acuerdo con ello, se evaluó la ingesta diaria de proteína (IDP) al 140, 120 y 100%, con alimentos comerciales (Nutripec, Purina-Cargill®), con 40% de proteína (humedad $\geq 8.35 \pm 0.09\%$ lípidos $7.58 \pm 0.15\%$, fibra cruda $1.8 \pm 0.27\%$, cenizas $8.87 \pm 0.12\%$,

energía libre de nitrógeno 41.12 y, energía $4,698 \pm 5.83$ cal/g) (Fig. 14). La alimentación se proporcionó cada 3 horas, con horario de 6:00 am a 9:00 pm (6 raciones al día), 7 días a la semana, por 34 semanas, para lo cual se tomo como referencia la ecuación desarrollada por la Agencia de Pesquería de Japón (1995), con la cual se calculó la ingesta diaria de proteína (IDP), la cual fue ajustada a través de una regresión lineal. El resultado de la función es $IDP = -3.818 \ln(\text{peso}) + 30.158$, donde IDP es expresada en gramos por proteína/kg de biomasa, con la correlación de $R^2=0.9914$ (Fig. 15). De acuerdo con estos valores, se implementaron tres tratamientos (IDP 1.4, IDP 1.2, IDP 1.0), correspondientes al 140, 120 y 100%, con cuatro replicas. Los tanques dentro de los tratamientos fueron distribuidos por randomización. La ingesta fue ajustada semanalmente a través de biometrías para actualizar el peso de los organismos de cada tratamiento (30 org/tanque).

6.1.4 Análisis de estrategias de alimentación

Para definir con mayor precisión la estrategia de alimentación, se consultaron 49 artículos, que incluyeron tópicos referentes a las estrategias de alimentación, de esta forma, se obtuvieron datos generales del cultivo de tilapia: densidad, nivel de proteína en el alimento, peso inicial, biomasa inicial, peso final, biomasa final, estrategia de alimentación utilizada (saciedad, saciedad con tiempo, porcentaje fijo de biomasa, porcentaje variable de biomasa, peso específico g/kg), el factor de conversión alimenticia, las raciones dadas y el periodo de cultivo). Con base en esta información, se calculo la IDP, y se comparó con la IDP para las temperaturas (24°C, 26°C, 28°C).

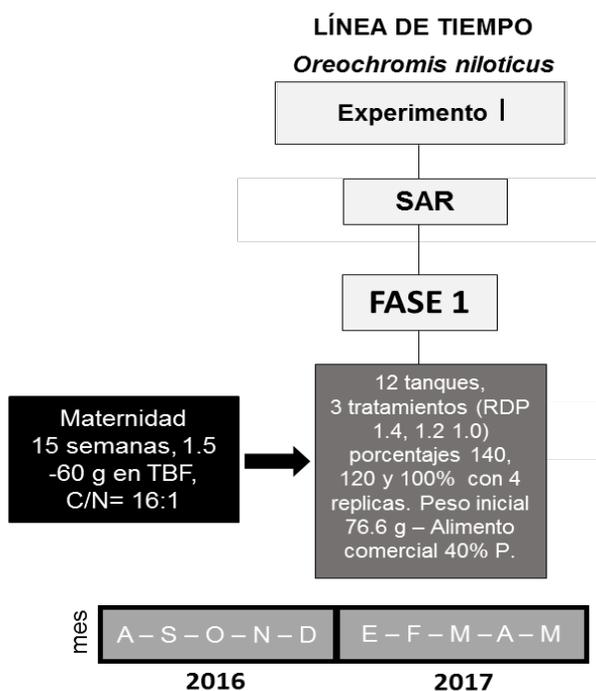


Figura 14. Línea de tiempo del Experimento I. Dos etapas: maternidad y engorda de los organismos.

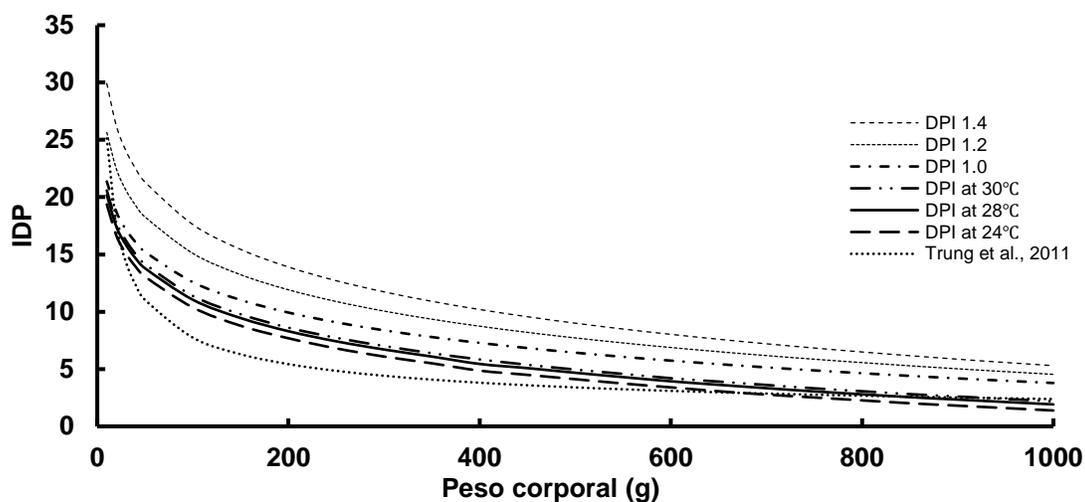


Figura 15. Implementación de la Ingesta Diaria de Proteína (IDP), BW= Peso corporal (g). IDP 1.4 =140%, IDP 1.2=120%, IDP 1.0 =100% a diferentes tallas (IDP = $-3.818 \text{ LN (BW)} + 30.158$ ecuación estimada para este trabajo), ecuaciones estimadas para distintas temperaturas (IDP = $-3.997 \text{ LN (BW)} + 29.79$, para 30°C, IDP = $-3.965 \text{ LN (BW)} + 29.305$ para 28° C, y IDP = $-3.902 \text{ LN (BW)} + 28.334$ para 24°C).

EXPERIMENTO II - TBF

6.2 Construcción del sistema TBF

Para el desarrollo del experimento II y IV fue necesario diseñar y construir un invernadero para unificar las técnicas de cultivo de *O. niloticus* en TBF y cultivos hortícolas en hidroponía de TFN. El diseño y construcción inicio a mediados del 2016, hasta marzo del 2017 (Figs. 16, 17).

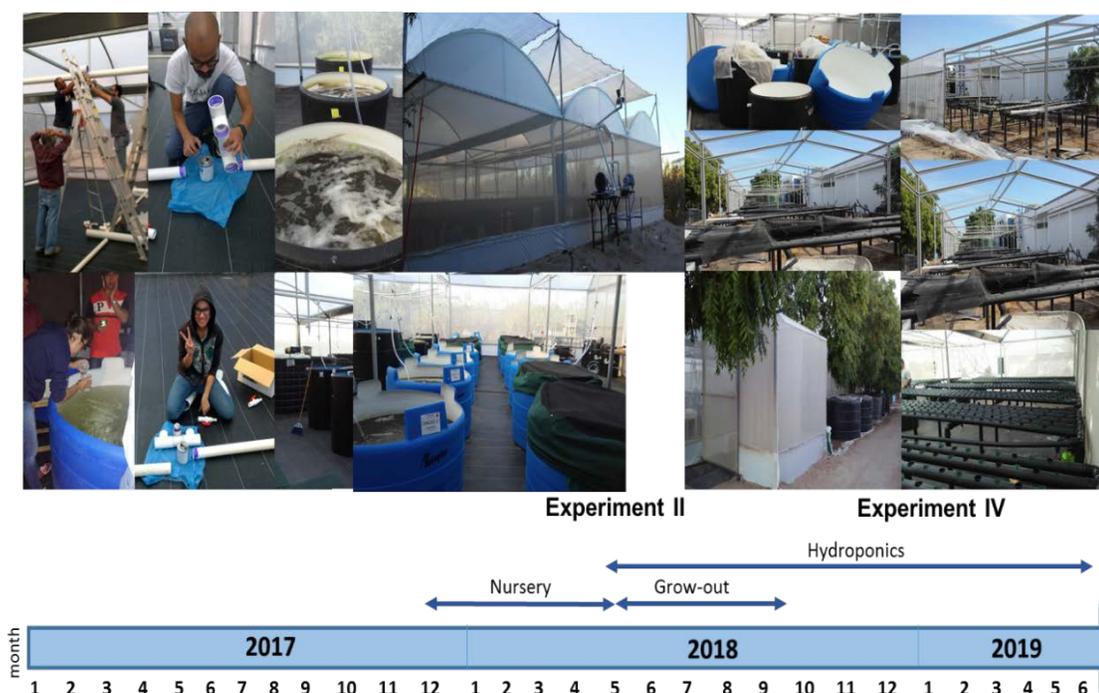


Figura 16. Cronología de la construcción de TBF e invernadero hidropónico. Periodo 2017 al 2019 (Fotos del autor).

6.3 Sistema biológico

Aproximadamente 3,000 organismos masculinizados de tilapia (*O. niloticus*) con peso inicial de 0.33 ± 0.14 g ($n=90$) arribaron del UNCIBNOR unidad de Tepic, Nayarit, México. El Experimento II fue dividido en dos etapas: 1^{ra} etapa (semana 1-20): maternidad con organismos de 0.33 ± 0.14 g a 60 g, con una densidad de siembra de 180 org/m^3 , 2^{da} etapa de engorda (semana 21-40) con organismos de 60 g a 500 g con baja densidad (55 org/m^3). El método de cultivo fue TBF con cinco tratamientos distribuidos por randomización, con tres replicas cada uno. Q=

quimioautotrófico, H = heterotrófico, y tres tratamientos fotoautotróficos que corresponden a: CV = *Chlorella sorokiniana*-2714, CS = *C. sorokiniana*-2805, M = *C. spp.* Los organismos fueron alimentados con alimento comercial Nutripec, Purina-Cargill® con 44% de proteína, de acuerdo con la función IDP 1.2 (Fig.15), cinco veces al día, cada tres horas de 8 am - 8 pm. Para monitorear el crecimiento y ajustar la IDP se realizaron biometrías semanales (30 org/tanque).

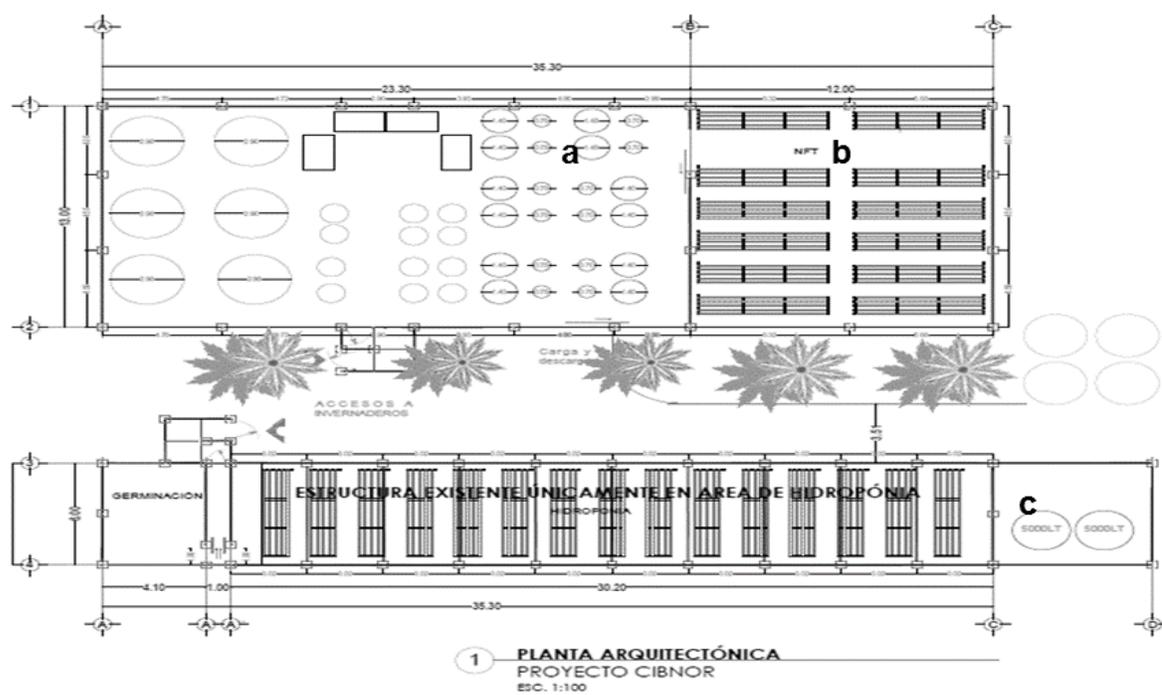


Figura 17. Diseño y distribución del invernadero de TBF e hidroponía, a) sección TBF (15 tanques de 1 m³), b) sección hidropónica A (12 camas hidropónicas de TFN), c) sección hidropónica B (15 camas hidropónicas en TFN).

6.3.1 Condiciones preliminares TBF

El estudio se llevó a cabo en el CIBNOR en la Paz, B.C.S., México. En un invernadero instalado en el parque tecnológico del CIBNOR, (35.3 m x 13 m) cubierto de plástico y malla sombra con retención de luz del 20%, se establecieron 15 tanques de cultivo de 1 m³ (1.39 m x 0.74m) (Fig. 17), provistos de aireación por un blower 1 Hp. La base de estos tanques se cubrió con un anillo de manguera difusora con diámetro de 1 pulgada, para suministrar aireación constante, que

permite mantener la fracción sólida suspendida, además de generar suficiente aireación en el sistema ($> 6 \text{ mg/L, O}_2$). La duración del experimento fue de 40 semanas.

6.3.2 Diseño experimental

6.3.2.1 Tratamiento quimioautotrófico

La inoculación del tratamiento Q= quimioautotrófico se obtuvo de los bionitrificadores del SAR, 3 kg de microbeads (biomedio) de cada bionitrificador (12 bionitrificadores con 339 L con 0.1 m^3 de biomedio (35 mmx 18 mm) (Fig. 13b), una vez mezclados se colocaron en dos tanques de 1 m^3 , en la oscuridad e inoculados cada tercer día con una solución de urea y fósforo (Ebeling *et al.*, 2006), la proporción usada fue remplazada por agua clara. Este tratamiento usa compuestos inorgánicos como fuente de energía en donde las bacterias nitrificantes crecen en ausencia de luz (Veuger *et al.*, 2013). Los tanques de este tratamiento estuvieron cubiertos por malla sombra color verde (90% de retención de luz) (Fig. 18b).

6.3.2.2 Tratamiento heterotrófico

El tratamiento H=heterotrófico también se cubrió con malla sombra verde (90 % retención de luz) (Fig. 18b). Cada tanque se inoculó con 100 L de agua de los bionitrificadores de SAR y diariamente se les agregó una fuente de carbono (azúcar comercial) para mantener una relación C/N=13:1. El azúcar se agregó junto con la primera ración de alimento de acuerdo con (Avnimelech, 1999).

6.3.2.3 Tratamiento fotoautotrófico

Se utilizaron nueve tanques sin cubierta de malla para este tratamiento, en su momento se inocularon de acuerdo con cada una de las especies utilizadas (Fig. 18c-d).

6.3.2.3.1 Inoculación

Se usaron tres especies de microalgas *Chlorella sorokiniana*-2714, *C. sorokiniana*-2805 y *C. spp.* provenientes del grupo de Microbiología Ambiental del CIBNOR para la inoculación a una concentración de 10^7 células/L por tratamiento (Fig. 19b-d). Las microalgas se mantuvieron en una solución mineral sintética (C30) y bajo condiciones de iluminación en matraces Erlenmeyer por 15 días, después se colocaron en cilindros de 20 L por otros 15 días a temperatura ambiente (23 ± 1 °C), bajo condiciones de iluminación fluorescente ($60 \mu\text{mol/s/m}^2$) y, aireadas mediante el uso de una bomba de acuario comercial de 12 V - 3.20 LPM (AQUA 12W, EVANS®, Jalisco, México). Pasado este tiempo se transportaron al invernadero TBF y se colocaron en los tanques de escalamiento respectivo (nivel de cultivo 200 L) (Fig. 19b-d). Cada tratamiento tenía su tanque A y tanque B de escalamiento (cosechas alternadas) (6 tanques de 1 m^3). Cabe mencionar que la nutrición de las microalgas se hizo con Fertiplus® (Fig. 19a). Cada semana se cosecharon 200 L de microalga y se colocaron en los tanques correspondientes CN, CV, CS (3 tanques por tratamiento).

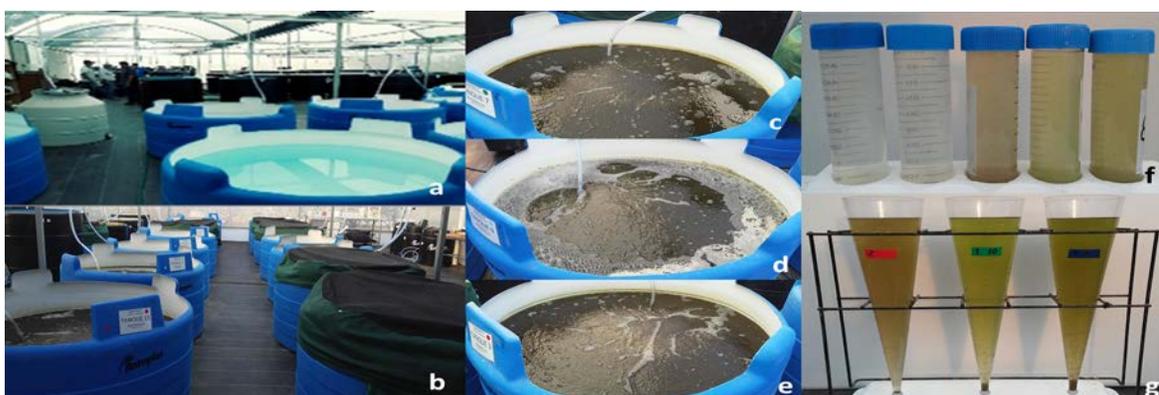


Figura 18. Experimento II TBF; a) Inoculación de tratamientos tiempo inicial = t_0 ; b) Tratamientos preparados; c) *C. sorokiniana*-2714 (CV); d) *C. sorokiniana*-2805 (CS); e) *C. spp.* (M); f) muestras de la fracción líquida, de izquierda a derecha Q, H, M, CV, CS y g) Muestras en conos Imhoff de izquierda a derecha *C. sorokiniana*-2714, *C. spp.*, *C. sorokiniana*-2805.

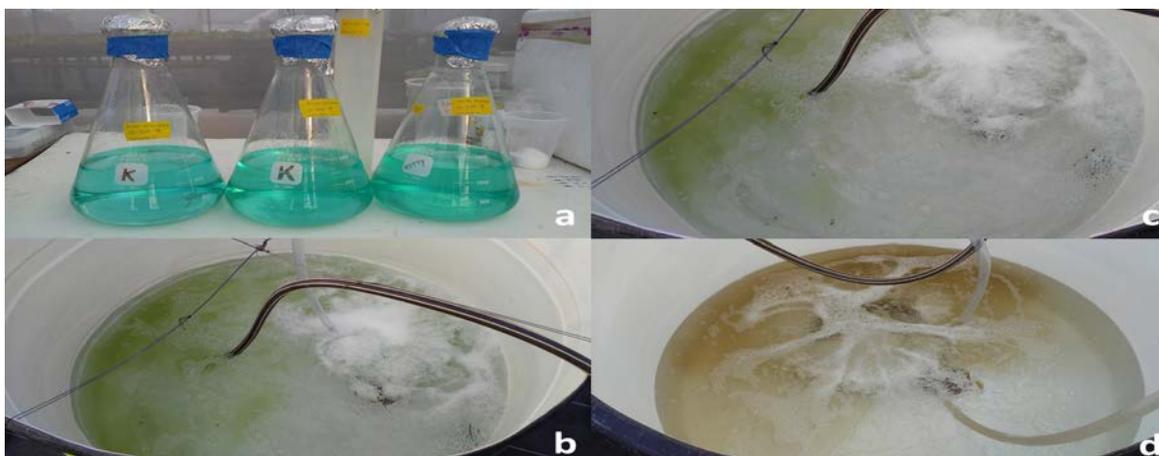


Figura 19. Proceso de inoculación de microalgas, a) solución nutricional fertiplus® para el crecimiento de microalgas, b) *C. sorokiniana*-2714 (CV); c) *C. spp.* (M); d) *C. sorokiniana*-2805 (CS).

6.4 Evaluación de los organismos

6.4.1 Parámetros de crecimiento

Se realizaron biometrías semanales para ajustar la ingesta de alimentos en los organismos (SAR y TBF). Para ello, primero se anestesiaron con Eugenol al 0.2mL/L en 40 L de agua clara (NOM-051-ZOO-1995), (NOM-062-ZOO-1999), (NOM-033-ZOO-1995), luego se obtuvo la longitud total (LT), longitud parcial (LP), peso (P), lo que permitió obtener datos para calcular la supervivencia (S), factor de conversión alimenticia (FCA), crecimiento específico (CES), porcentaje de peso diario (%PG), alimento consumido (AC) y, tasa de eficiencia proteica (TEP).

$$S = (\%) = (\text{número final de organismos} / \text{número inicial de organismos}) * 100 \quad (1)$$

$$FCA = (\text{Alimento seco proporcionado (g)} / \text{peso húmedo ganado (g)}) \quad (2)$$

$$CES = [(\ln \text{ peso final} - \ln \text{ peso inicial}) / \text{No. días}] * 100 \quad (3)$$

$$\% \text{ PG} = [(\text{peso final} - \text{peso inicial}) / (\text{peso inicial})] * 100 \quad (4)$$

$$AC = 100 * \text{alimentos consumido (g)} / (\text{biomasa promedio (g)} * \text{días}) \quad (5)$$

$$TEP = \text{Biomasa ganada (g)} / \text{Proteína consumida (g)} \quad (6)$$

6.4.2 Preparación de muestras para análisis nutricionales

Se obtuvieron 3 organismos de cada tanque (Exp. I) y (Exp. II), se sacrificaron en anestesia profunda. En fresco se disectaron y secaron en horno horizontal de ventilación (VWR International Cornelius®, OR, USA) a 60°C/24 hrs. La muestra fue triturada con un molino eléctrico de café (Krupps ®, modelo GX4100, 200 W) y homogeneizada, posteriormente se utilizó para análisis proximal, elemental y aminoácidos.

6.4.2.1 Análisis químico proximal

La composición proximal se efectuó de acuerdo a procedimientos de AOAC (Horwitz y Latimer, 2005). La humedad se determinó por medio del método de pérdida de peso (100°C/24hrs), de acuerdo con (Clave: 930.15 AOAC - Horwitz y Latimer, 2005). La proteína cruda se llevó a cabo por el método de combustión directa DUMAS (Clave: 976.05 AOAC - Horwitz y Latimer, 2005) mediante el uso del equipo LECO® FP-528. Para el extracto etéreo se utilizó el método Foss Soxtec ® Avanti, (Foss, Hogans, Sweden), mediante el uso de éter como solvente extractor. Para la fibra cruda se utilizó el método de hidrolisis sucesiva (ácido/base) (Clave: 798.10 AOAC - Horwitz y Latimer, 2005). Para obtener el nivel de cenizas, se incineraron 2 g de muestra (material biológico) en un horno de combustión Thermolyne 6000 (Barnstead Thermolyne, Dubuque, Iowa, USA) a 600°C/5hrs. El extracto libre de nitrógeno se calculó por diferencia: $100 - (\% \text{ Proteínas} + \% \text{ Lípidos} + \% \text{ Fibra cruda} + \% \text{ Cenizas})$, asimismo, la energía libre fue calculada mediante un calorímetro adiabático automático (Parr Instruments, modelo 1261, Moline, IL, USA).

6.4.2.3 Análisis elemental

Para el análisis elemental 2.5 g de muestra de FP, cuerpo completo (3 por tanque), se digirieron con base en el método APHA 3050, la solución se filtró con filtros whatman® (5 µm), el extracto fue analizado mediante el uso de un espectrofotómetro óptico (ICP- AES VARIAN model Liberty II; Mulgrave, Australia).

El N se determinó por método Kjeldahl y el resto de los elementos por lectura directa en ICP-AES (Tabla I).

Tabla I. Elementos macro y micro analizados en las dietas, en los componentes biológicos y residuales del sistema y, con los que se analizó el flujo de nutrientes en el sistema SAR.

ELEMENTOS ANALIZADOS¹		
Nitrógeno (N)	Fósforo (P)	Calcio (Ca)
Selenio (Se)	Potasio (K)	Magnesio (Mg)
Boro (B)	Cobre (Cu)	Fierro (Fe)
Molibdeno (Mo)	Manganeso (Mn)	Zinc (Zn)
Cobalto (Co)	Azufre (S)	Sodio (Na)

Notas:¹ Elementos esenciales requeridos por las plantas para un óptimo desarrollo. Se dividen en macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S) y micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn, Mo, Zn).

6.4.2.4 Análisis de aminoácidos

Para el análisis de aminoácidos, se tomaron muestras de 3 µg de FP y del cuerpo completo de los organismos de cada tanque (Exp. I y Exp. II), una vez que las muestras se secaron y pulverizaron en el CIBNOR. El análisis se efectuó en la Universidad de Tokio de Ciencias Marinas y Tecnología (TUMSAT, por sus siglas en Inglés), donde fueron determinados de acuerdo al método de (Simpson *et al.*, 1976), usado para el auto analizador de aminoácidos (JCL-500V; JEOL, Tokio, Japón).

6.5 Evaluación de los parámetros

Los parámetros fueron monitoreados 1 vez al día (8:00 am), durante todo el experimento con un equipo YSI-550 para obtener la temperatura (°C), oxígeno disuelto (OD) (mg/L), pH (rango), conductividad (dS/m), salinidad (ppt). Dentro de cada tanque de peces y en el invernadero (uno en cada esquina) se colocaron sensores (HOBO Pendant ® Temperature/Light, Bourne, Massachusetts, USA) de temperatura e intensidad lumínica HOBO pendant ®; éstos se programaron para obtener mediciones cada 5 minutos durante todo el experimento I.

6.6 Análisis químico de los efluentes

6.6.1 Fracción líquida

Para el análisis de la fracción líquida (FL), se colectaron muestras por duplicado en tubos falcom® de 50 mL cada semana (Fig. 18f), de cada tanque durante los experimentos I y II. Se analizó el amonio (N-NH₄), nitritos (N-NO₂), nitratos (N-NO₃), fosfatos (P-PO₄) con un autoanalizador (Lachats's QuickChem® 8500, Serie 2 FIAS, Loveland, CO, USA) reportado por Métodos estándar para el examen de agua y aguas residuales (Siglas en Inglés SMWW). Las muestras se tomaron en todos los casos antes de alimentar.

6.6.2 Fracción particulada

La FP para Exp. I se obtuvo a través de cosechas del sedimentador de cada tanque cada semana (durante las 34 semanas) (60 muestras). Para el Exp. II las muestras se obtuvieron por sifoneo a partir de la semana 10 hasta la semana 40 (45 muestras). Una vez obtenidas éstas, se cuantificaron los sedimentos. La muestra total de cada tanque se dividió en dos partes iguales: la 1^{ra} parte se colocó en el mineralizar aeróbico (Exp. I), donde se acumularon todas las cosechas del sistema con aireación constante (mineralización aeróbica), este se mantuvo a temperatura ambiente (Fig. 13b). En el Exp. II las cosechas se colocaron en un reservorio de polietileno de baja densidad de 1,100 L con tapadera de rosca (Rotoplas®, Expel), sin aireación (mineralizador anaeróbico). La 2^{da} parte de ambos sistemas se secó en un horno de ventilación (Stabil-Therm) a 80°C/24 hrs y, se pulverizó con un molino eléctrico de café (Krupps®, modelo GX4100, 200 W). La colección de muestras se utilizó en el experimento de mineralización (Exp. III) (Fig. 20).

EXPERIMENTO III - Mineralización

6.7 Mineralización de la fracción particulada

La colección de muestras obtenidas en el apartado 6.6.2, se dividió en tres partes iguales para ser procesadas por alguno de los siguientes métodos: incineración,

digestión ácida con HNO_3 o digestión ácida con H_2SO_4 (Fig. 20). Se llevaron a cabo análisis proximales, elementales y aminoácidos (Apartado 6.4.2.1 al 6.4.2.4).

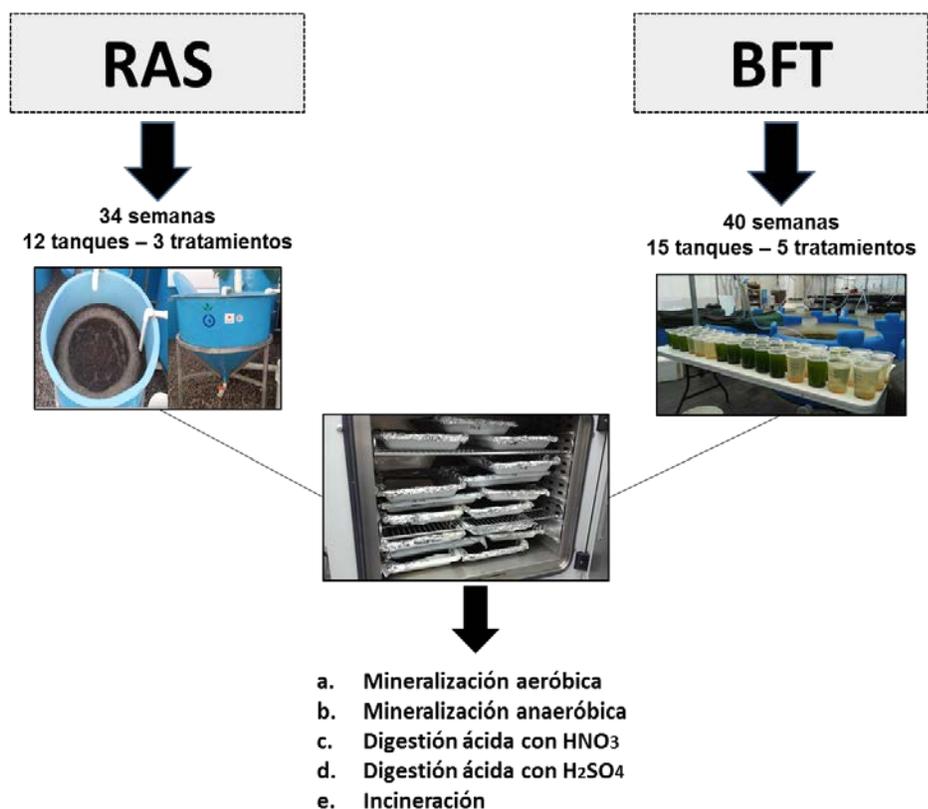


Figura 20. Diagrama para el procesamiento de la FP obtenida en el Exp. I y Exp. II. Mediante el uso de cinco métodos de mineralización: a) aeróbica, b) digestión ácida con HNO_3 , c) incineración, d) digestión ácida con H_2SO_4 , e) mineralización anaeróbica.

6.7.1 Digestión aeróbica

Las cosechas de la FP del Exp. I, se colocaron en un mineralizador cónico (con capacidad de 89 L) (Fig. 13e), con aireación constante (manguera difusora) (Delaide *et al.*, 2018). La aireación fue generada por un blower de 1 Hp, el mineralizador se mantuvo tapado con malla sombra de uso rudo, para exteriores con 90% de protección. Para las cosechas de FP, se apagaba la aireación, se mezclaba la FP y se dejaba reposar por 2 horas, después se tomaba la muestra. El almacenaje de la FP se llevó a cabo durante las 34 semanas.

6.7.2 Digestión ácida con HNO₃

La digestión ácida con HNO₃ se llevó a cabo por el proceso (EPA-3050B). Se colocaron 2 g de muestra seca en un matraz Erlenmeyer, se agregaron 5 mL de ácido nítrico (HNO₃- concentrado), se colocó en una parrilla eléctrica a 95±5 °C hasta que la digestión termino (cambio de color, evaporación de la sustancia), se dejó enfriar, se agregó 3 mL de peróxido de hidrogeno H₂O₂ (30%) (agua oxigenada) y se colocó en una parrilla eléctrica a 95±5 °C hasta que la efervescencia termino. La muestra se aforo a 50 mL con agua desionizada, se filtró con filtro whatman® de 50 µm y se recuperó la solución.

6.7.3 Incineración

Para la incineración se colocaron 50 g de muestra seca en un horno de combustión Thermolyne ®6000 (Barnstead Thermolyne, Dubuque, Iowa, USA), a 600°C/5 hrs, terminado el proceso se dejó enfriar la muestra en un desecador por 40 minutos, las cenizas fueron recuperadas, re-suspendidas y homogeneizadas en agua desionizada, después se filtró con un filtro whatman® de 50 µm, para recuperar la solución.

6.7.4 Digestión ácida con H₂SO₄

La digestión ácida con H₂SO₄ se llevó a cabo mediante la técnica propuesta por (Endo y Takeuchi, 2009). En un recipiente de teflón, se agregaron 40 mmol H₂O₂ por cada gramo de FP y 6 mL de H₂SO₄, por la técnica de microondas a 175 °C durante 15 minutos. Este análisis se llevó a cabo en la Universidad de Tokio de Ciencias Marinas y Tecnología (TUMSAT por sus siglas en Inglés).

6.7.5 Digestión anaeróbica

La FP obtenida Exp. II se acumuló en reservorios de polietileno de baja densidad de 1,100 L con tapadera de rosca (Rotoplas®, Expel) (un tinaco por cada tratamiento), sin aireación, en oscuridad, a temperatura ambiente, durante 90 días (Fig. 18). Terminado el tiempo se mezclaron los sedimentos, se dejaron reposar

durante 2 horas y se tomaron muestras (Mirzoyan *et al.*, 2012; Nguyen y Fricke, 2015).

EXPERIMENTO IV – Hidroponía

6.8 Condiciones preliminares del experimento de hidroponía

El experimento de hidroponía se llevó a cabo en el área B de los invernaderos descritos en la figura 17, los cuales están compuestos por una estructura de metal recubierta con plástico blanco de polietileno y malla antiafidos, la cual retiene el 20% de luz. En el área B se encuentran 12 camas hidropónicas con 34 orificios por tubo, seis tubos por cama (204 orificios total), en el área C se dispone de 15 camas con 16 orificios por tubo, con seis tubos por cama (96 total) (los tubos son de polietileno de alta densidad, orificio de 1 pulgada) (Fig. 17). Cada cama tiene un tinaco de polietileno de 250 L (Tamboplas – Rotoplas ®), el cual contiene la solución hidropónica. La recirculación se lleva a cabo por una bomba de acuario de 12 V - 3.20 LPM (AQUA 12W, EVANS®, Jalisco, México). El sistema hidropónico se diseñó con base en la técnica en TFN (Técnica de flujo de nutrientes) descrita por Azad *et al.* (2013).

6.8.1 Siembra y germinación

Las semillas fueron colocadas en sustrato de cultivo inerte (SOGEMIX PG-M®, 108 L), previamente humedecido y pasteurizado para evitar problemas fitosanitarios en horno de ventilación (Stabil-Therm) a 80°C/36 hrs. La siembra se realizó en charolas de germinación de polipropileno con 200 celdas, (L x A x A= 54 x 28 x 4.3 cm - Tlalnepantla, México). Se colocaron alrededor de tres semillas por celda y se cubrieron con polietileno negro para mantener la humedad y temperatura apropiada, cuando se observaron plántulas bien definidas se sacaron las charolas de las bolsas negras, se colocaron sobre las camas y se aplicaron riegos diarios con solución de Hoagland al 60% (Hoagland y Arnon, 1950).

6.9 Experimento hidropónico

Las plantas utilizadas fueron *Lactuca sativa* (lechuga orejona), *Brassica rapa* subsp. *chinensis* (pak-choi), *Eruca sativa* (arugula) y *Ocimum basilicum* (albahaca) (Tabla II).

6.9.1 Tratamientos

Seis tratamientos con dos replicas fueron desarrollados (Sección B). T1= control (Hoagland), T2= biofloc heterotrófico (H), T3= biofloc quimioautotrófico (Q), T4= biofloc fotoautotrófico (*C. sorokiniana*-2805) (CS), T5 = *C. sorokiniana*-2714 (CV) y T6= *C. spp* (M). El agua de cada tratamiento fue colectada en un tanque de 1 m³ (un tanque por tratamiento), 300 L por tanque del cultivo de biofloc, 900 L por tratamiento. Cosechada el agua, se dejó sedimentar durante 24 horas para retirar la FP, se filtró con una bolsa de nylon de 5 µm y se complementaron con micronutrientes de Hoagland (Jones, 2004, descripción solución Hoagland, Tabla III). Los nutrientes de Hoagland se prepararon en tres sets (A= macronutrientes (N, K, Ca, S), B= magnesio (Mg) y fosforo (P), C= micronutrientes (Fe, Mn, B, Zn, Cu, Mo). En cada cama se colocaron las cinco especies de cultivo: Línea 1 y 6 con *Lactuca sativa* (lechuga orejona) y *Eruca sativa* (arugula), línea 2 y 5 con *Lactuca sativa* (lechuga orejona), línea 3 y 4 *Brassica rapa* subsp. *chinensis* (pak-choi) y *Ocimum basilicum* (albahaca) (Fig. 21).

Tabla II. Código, nombre común y nombre científico de las distintas especies utilizadas en los experimentos hidropónicos.

Código	Nombre común¹	Nombre científico
AL	Albahaca	<i>Ocimum basilicum</i> .
AR	Arugula	<i>Eruca sativa</i>
ES	Espinaca	<i>Spinacea oleracea</i>
LO	Lechuga orejona	<i>Lactuca sativa (green)</i>
PC	Pack choy	<i>Brassica rapa subsp. chinensis</i>

Notas: ¹ El nombre común puede variar entre regiones.

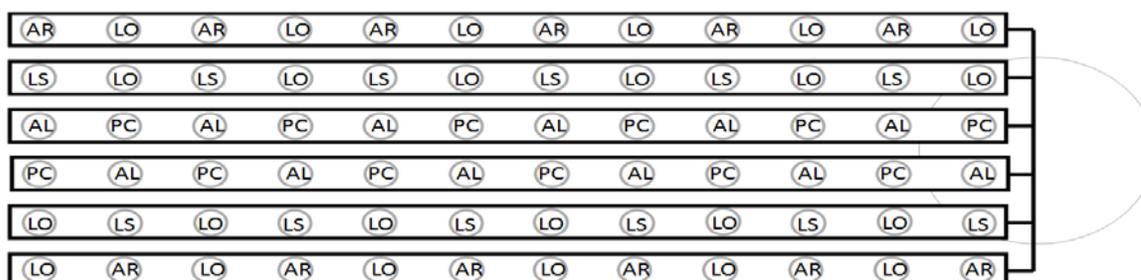


Figura 21. Distribución de las plantas en las camas hidropónicas, en la imagen se ejemplifican las seis hileras de tubos y los orificios con las plantas correspondiente la línea inferior indica línea 1, la superior indica línea 6. Se sembraron cinco especies de plantas diferentes en cada cama: línea 1 y 6 *Lactuca sativa* (lechuga orejona) y *Eruca sativa* (arúgula); líneas 2 y 5, *Lactuca sativa* (lechuga orejona); línea 3 y 4, *Brassica rapa* subsp. *Chinensis* (pak-choi) y *Ocimum Basilicum* (albahaca). (Imagen diseñada por Dr. David Vega García).

Tabla III. Descripción de las soluciones nutritivas comerciales Hoagland y Steiner. Macro y micronutrientes necesarios para la nutrición vegetal.

Nutrientes (mg/L)		Hoagland (100%) ¹	Steiner (100%) ¹
Macronutrientes (mg/L)	N	242	170
	P	31	50
	K	232	320
	Ca	224	183
	Mg	49	50
	S	113	148
Micronutrientes (mg/L)	Fe	7	3 - 4
	Mn	0.5	1 - 2
	B	0.45	1 - 2
	Zn	0.48	0.2
	Cu	0.02	0.1 - 0.5
	Mo	0.01	0.1

Notas: ¹ Valores obtenidos de Jones, (2004), Hoagland pág. 83, Steiner pág. 87, soluciones preparadas al 100%. Macronutrientes aquellas que se requieren en grandes proporciones, micronutrientes aquellos que se requieren en pequeña proporción.

Tabla IV. Compendio del experimento realizado en la sección de Hidroponía. Se incluye una breve descripción de los tratamientos del experimento.

T ¹	E1 ²
1	Hoagland (Control) ³
2	Heterotrófico+ complemento
3	Quimioautotrófico+ complemento
4	<i>C. sorokiniana</i> -2714 +complemento
5	<i>C. sorokiniana</i> -2805 +complemento
6	<i>C. spp.</i> + complemento

Notas: ¹ T= tratamientos:1 – 6. ² E1 = Experimento 1, ³ Hoagland se refiere a la solución química hidropónica descritas en la Tabla III. Esta solución fue utilizada como control.

6.10 Biometría

Se llevaron a cabo biometrías: inicial, media y final de las plantas obtenidas. Para estimar el peso inicial de éstas, se tomaron 12 ejemplares por especie vegetal. Se pesó la planta completa, previamente seca y limpia, se etiqueto y coloco en bolsas de papel (previamente pesadas). Después se secaron en un horno de ventilación (Stabil-Therm) a 70°C/48 hrs y luego, se pesaron las bolsas para obtener el peso seco de cada planta.

6.11 Análisis de parámetros y toma de muestras.

Los parámetros se tomaron una vez al día (8:00 am), temperatura, OD, pH, REDOX, salinidad, conductividad, alcalinidad con un equipo (YSI 500). Las muestras líquidas fueron colocadas en tubos de 50 mL, para evaluar NO₂-N, NO₃-N, NH₄-N, PO₄-P (Fig. 18f), de acuerdo al proceso descrito en el apartado (6.6.1).

6.12 Análisis de plantas

Diariamente se revisó la fenología de las plantas y su estado fitosanitario de forma visual, con énfasis en su coloración (Jones, 2004); asimismo, se hizo un registro del tamaño, color, apariencia de las hojas para detectar posibles patologías como necrosis, clorosis o algún síntoma en las hojas de las plantas.

6.13 Análisis estadísticos

Una vez verificada la normalidad (Kolmogorov-Smirnov test) y la homogeneidad de varianzas (Levene test), se realizaron ANOVA de una vía y la prueba Tukey (0.05) para detectar diferencias significativas mediante el uso de Minitab 17 Statistical Software (2010). En los parámetros de crecimiento del Exp I., Exp. II, Exp. IV, se consideraron parámetros fisicoquímicos, parámetros nutricionales, calidad de agua. En el Exp. III se analizó la diferencia entre tratamientos con la aplicación de los procesos de mineralización. Para el Exp. II se realizaron ANOVA de dos vías para definir posibles diferencias significativas entre los tratamientos a lo largo del experimento, se usó Sigma Stat 3.5.

7. RESULTADOS

7.1 Preliminares SAR

Con las modificaciones realizadas, se logró generar un sedimentador con fase adhesión de partículas, amortiguador de pH y retención de la fracción particulada de mayor densidad (Fig. 22).

EXPERIMENTO I -SAR

7.1.1 Datos obtenidos durante el Experimento SAR

El período del experimento fue de 34 semanas en el cual se implementaron diferentes valores de Ingesta Diaria de Proteína (IDP), $IDP 1,0 = 100 \% (IDP = -3.818 \ln (BW) + 30.158)$, $IDP 1.2 = 120 \% (IDP = -4.582 \ln (BW) + 36.19)$ y $IDP 1.4 = 140 \% (IDP = -5.345 \ln (BW) + 42.221)$, con base en el modelo matemático desarrollado en conjunto con TUMSAT (Universidad de Tokio de Ciencias Marinas y Tecnología).

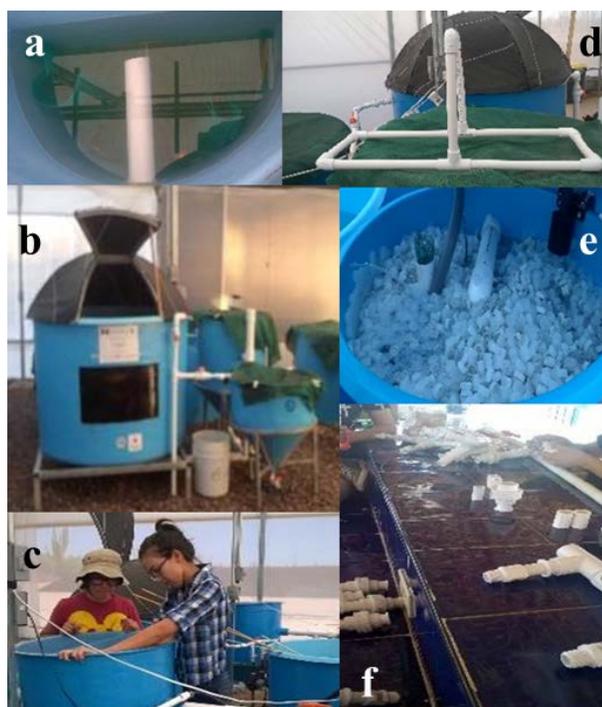


Figura 22. Modificaciones en SAR a) tanque de sedimentación, b) recirculación tanques, c) y d) modificaciones en el sedimentador, e) bio-nitrificador, f) modificaciones en el flujo del agua entre el tanque y el sedimentador.

7.1.2 Crecimiento de 2.4 a 70 g de juveniles (período de maternidad)

El crecimiento de *O. niloticus* no presentó diferencia entre tanques en el período de maternidad (Fig. 23), los parámetros se mantuvieron estables durante todo el experimento, el biofloc se conservó a una densidad <30 mL/L. Los parámetros físicos no presentaron diferencia significativa ($p > 0.05$). La supervivencia, el crecimiento final y la Tasa de Crecimiento Específica (TCE) entre los diferentes tanques obtuvieron diferencias significativas ($p < 0.05$), donde el mejor tanque fue T1. La longitud corporal y el peso se midieron a partir de la semana 5, el peso inicial promedio fue de 10.2 para T1 y 7.7 g para T2 (Tabla V).

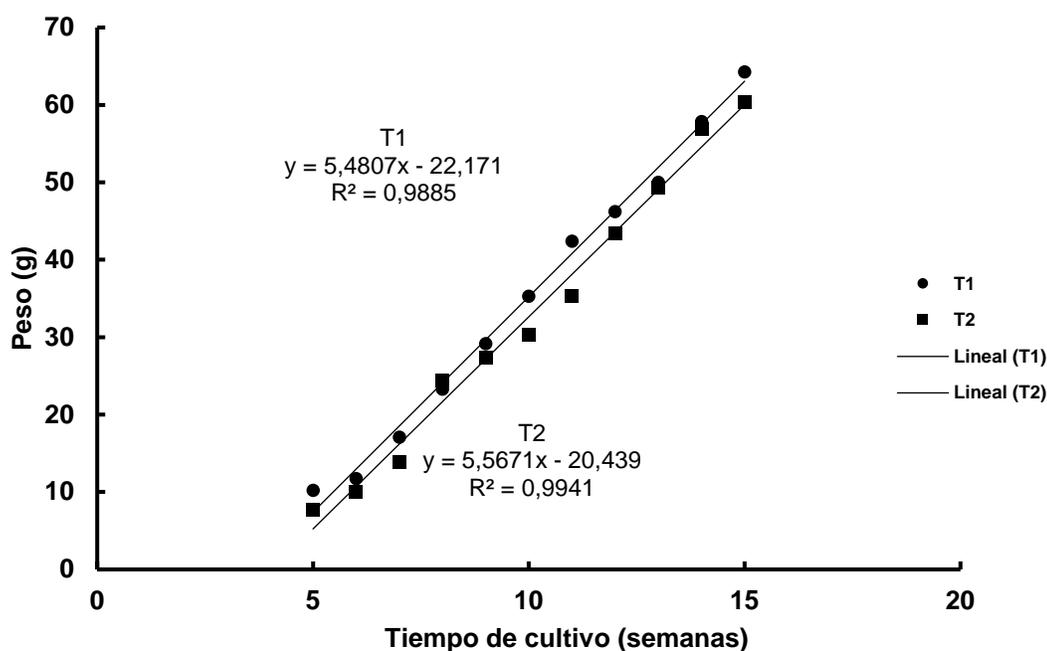


Figura 23. Crecimiento de *O. niloticus* durante la maternidad, mediante un sistema de Biofloc con relación C/N1:13.

7.1.3 Parámetros físicos en SAR

La tabla VI presenta los valores promedio estacionales de los parámetros físicos durante las 34 semanas del experimento. La temperatura fluctuó durante las diferentes estaciones, pero no presentó diferencias significativas ($p > 0.05$) dentro de los tratamientos durante el experimento. El nivel de OD disminuyó, mientras que

la salinidad y conductividad aumentaron gradualmente a lo largo del período experimental. El pH fluctuó con una tendencia hacia la acidificación con el aumento de la biomasa en los tres tratamientos. La temperatura del invernadero fluctuó durante todos los experimentos (Tabla VI).

Tabla V. Parámetros biológicos obtenidos para *Oreochromis niloticus* durante 15 semanas de maternidad, con una densidad de 200 peces/m³.

Tanque	1	2
Temperatura (° C)	23±0.3	25± 3.1
OD (mg/L)	7.5±1.0	7.6±1.0
pH	7.9±0.9	7.9±0.9
Biofloc C:N	13:1	13:1
Tiempo (días)	105	105
Densidad (pez/m ³)	200	200
Promedio peso inicial (g/pez)	2.3	2.3
Promedio peso final (g/pez)	60.2 ^b	64.3 ^a
Biomasa inicial (kg/m ³)	0.5	0.5
Biomasa final (kg/m ³)	10.8 ^b	12.4 ^a
Peso total (kg/m ³)	10.3 ^b	11.9 ^a
S (%) ¹	90 ^a	88 ^b
TCE (%/día) ²	23.9 ^b	25.7 ^a
FCA ³	0.4 ^b	0.6 ^a

Notas: ¹ S = Supervivencia, ² TCE=tasa de crecimiento específica, ³ FCA = factor de conversión alimenticia. La temperatura promedio se muestra en la tabla, y también se presentan los valores máximo y mínimo. Ninguna letra de una fila indica que no hay diferencias significativas entre los grupos ($p > 0.05$).

Se obtuvieron temperaturas por encima de 51.0°C en verano y otoño, con temperaturas mínimas de 21.0-22.0°C en verano y de 15.0-16.0°C en otoño; la temperatura invernal fue superior a 46.7°C, con temperaturas mínimas de 13.0-14.3°C (Tabla VI).

La concentración de NH₄-N fue superior a 30 mg/L después de la semana 4 y mayor que 50 mg/L después de la semana 10, con diferencia significativa ($p < 0.05$) en las semanas 7, 9, 15 y 27. Las diferencias de concentración de NO₂-N fueron significativas en las semanas 13, 21 y 25 ($p < 0.05$) y, la transferencia de agua al sistema hidropónico de SAR, ayudó a reducir los residuos de nitrógeno. La concentración de PO₄-P no presentó diferencias entre los tratamientos ($p > 0.05$) sólo en las semanas 29 y 33 (Fig. 24).

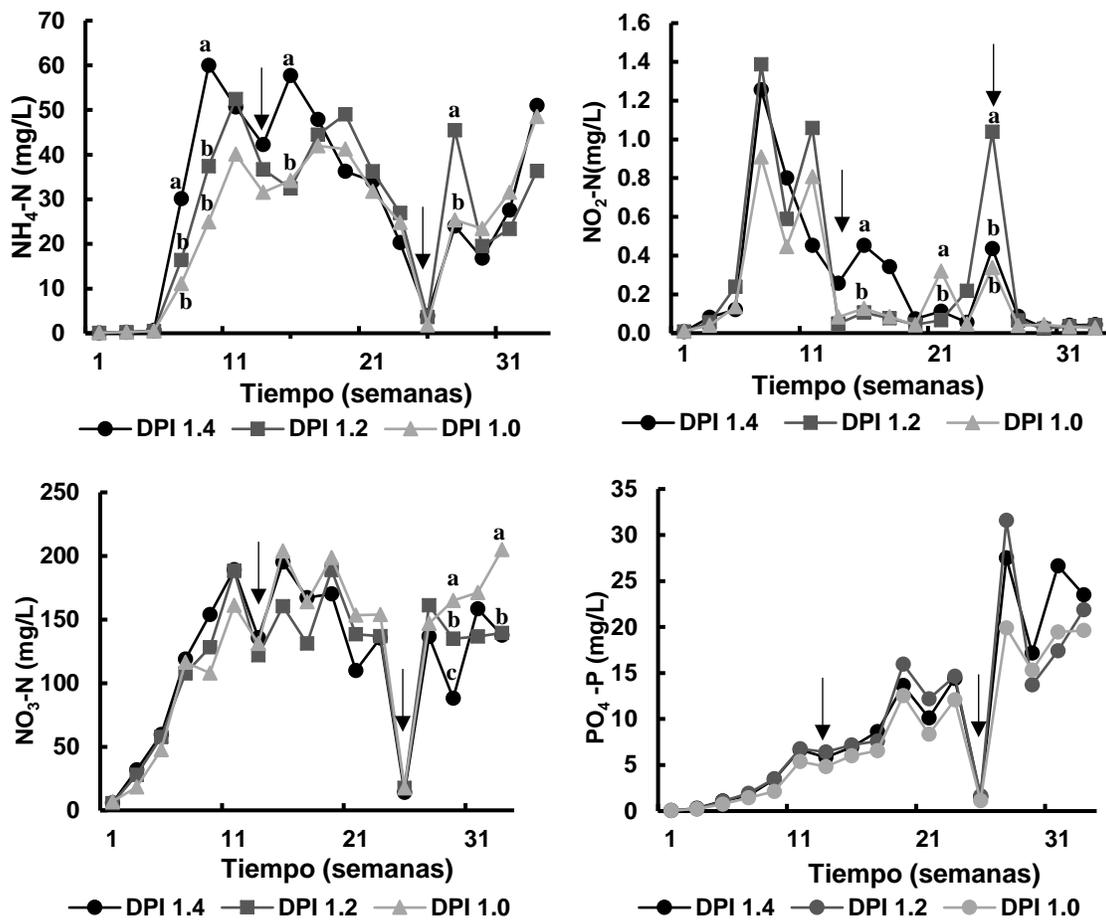


Figura 24. Las muestras para los análisis de agua (NH_4 , NO_2 , NO_3 y PO_4) se tomaron cada dos semanas durante todo el experimento. Ninguna letra en un punto indica que no hay diferencias significativas entre los tratamientos ($p > 0.05$). Las flechas en el gráfico indican la colecta de agua en las semanas 18 y 25 (experimento hidropónico- datos no mostrados).

Tabla VI. Temperaturas medias para cada estación de cada tanque y el promedio general de cada tratamiento.

	PARÁMETROS INTERNOS								
	VERANO			OTOÑO			INVIERNO		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Temperatura promedio (°C)	32.5±0.4	31.7±2.2	33.2±1.5	28.3±0.2	28.3±0.6	28.8±0.9	26.5±1.7	26.3±2.5	28.0±0.7
Máximo	39.3±6.2	41.6±3.0	37.5±2.9	32.4±1.0	32.7±1.0	33.2±1.9	29.7±1.5	29.5±3.6	31.0±0.7
Mínimo	27.7±0.3	27.5±0.6	27.9±0.5	23.8±0.8	23.4±2.1	24.1±1.1	22.8±1.9	22.7±2.1	24.4±1.0
OD (mg/L)	6.1±0.7	6.2±0.9	6.1±0.4	5.6±0.8	5.5±0.8	5.5±0.5	5.2±0.8	5.3±0.9	5.2±0.8
Salinidad inicial (ppt)	0.9±0.2	0.9±0.1	0.8±0.1	2.4±0.2	2.4±0.3	2.0±0.3	4.5±0.2	4.5±0.0	4.2±0.1
Salinidad final (ppt)	2.4±0.2	2.4±0.3	2.0±0.3	4.5±0.3	4.5±0.1	4.2±0.1	5.2±0.3	5.4±0.3	5.1±0.2
pH	6.7±0.2	6.7±0.2	6.6±0.1	6.07±0.1	6.0±0.0	6.0±0.1	5.8±0.5	5.6±0.4	5.7±0.5
Conductividad Initial (mS)	1.9±0.4	2.0±0.3	1.7±0.2	5.3±0.4	5.3±0.7	4.4±0.57	8.2±0.5	7.6±0.4	6.9±0.8
Conductividad final (mS)	5.3±0.2	5.2±0.6	4.3±0.6	8.1±0.6	7.5±0.4	6.9±0.9	10.5±0.3	10.3±0.2	9.5±0.2

	PARÁMETROS EXTERNOS								
	VERANO			OTOÑO			INVIERNO		
	T °C	max	Min	T °C	max	min	T °C	max	min
E1¹	33.6±7.9	52.08	21.39	30.0±7.9	52.58	15.6	24.7±8.0	46.72	13.36
E2¹	33.9±8.6	52.88	21.09	29.0±7.0	51.57	16.4	24.9±7.5	44.95	14.32
E3¹	34.5±8.20	51.01	22.04	29.5±7.3	50.31	15.1	23.8±7.4	45.57	13.17
E4¹	34.1±8.67	52.43	22.04	29.4±7.6	50.87	15.3	24.7±8.7	48.42	12.98

Notas:¹ E= sensores externos colocado en cada una de las esquinas del invernadero. La temperatura media se muestra en la tabla (DE), se presentan los valores máximo y mínimo. Ninguna letra en las filas indica que no hay diferencias significativas entre los tratamientos ($p > 0.05$).

7.1.4 Parámetros biológicos en SAR

Se registró un mayor crecimiento en los tratamientos IDP 1.4 y IDP 1.2 que en el tratamiento IDP 1.0. El tamaño de *O. niloticus* en la última semana fue de 908.0 ± 57.9 g (IDP 1.4), 887.0 ± 113.5 g (IDP 1.2) y 702.2 ± 38.1 g (IDP 1,0). La mayor biomasa, la TCE y el aumento de peso promedio se obtuvieron en IDP 1.4 y IDP 1.2. El FCA en el tiempo final (Semana 34) y la supervivencia no presentaron diferencias significativas ($p > 0.05$) entre los tratamientos IDP 1.4 y IDP 1.2 (Tabla VII).

Tabla VII. Rendimiento de producción de tilapia, *Oreochromis niloticus*, a tres niveles de IDP (1.4, 1.2 y 1.0) con una densidad de 100 peces/m³ durante 34 semanas.

Parámetro	Nivel IDP		
	1.4	1.2	1.0
Densidad (pez/m ³)	100	100	100
Peso inicial (g/pez)	79.2±5.1	76.5±3.9	74.9±1.7
Longitud total inicial (cm)	15.9±0.2	15.8±0.3	15.6±0.1
Longitud std inicial (cm)	12.8±0.2	12.7±0.2	12.6±0.1
Peso final (g/pez)	908±57.9 ^a	887.7±113.5 ^a	702.2±38.1 ^b
Longitud total final (cm)	32.6±0.6 ^a	32.3±1.4 ^a	30.5±0.3 ^b
Longitud std final (cm)	27.2±0.5 ^a	27.2±1.2 ^a	25.4±0.4 ^b
Biomasa (kg)	74.61±4.9 ^a	73.0±10.2 ^a	56.45±3.5 ^b
Promedio peso ganado (g pez/ semana)	24.54±1.7 ^a	23.78±3.3 ^a	18.37±1.1 ^b
TCE (%/día) ¹	0.43±0.01 ^a	0.43±0.02 ^a	0.39±0.01 ^b
S (%) (tiempo final) ²	98.6±1.04 ^a	98.3±1.9 ^a	98.3±0.6 ^a
FCA (g alimento/g pez) (tiempo final) ³	2.4±0.2 ^a	2.4±0.3 ^a	2.1±0.1 ^a
% DW ⁴	3.98±0.2 ^a	4.04±0.6 ^a	3.01±0.2 ^b
Energía utilizada (kW/kg pez) ⁵	4.44±0.3 ^b	4.60±0.6 ^b	5.76±0.3 ^a

Notas: ¹TCE = tasa de crecimiento específica, ²S = supervivencia, ³FCA = factor de conversión alimenticia, FGR = tasa de ganancia de alimentos, y ⁴% DW = porcentaje de peso diario; ⁵el consumo de energía kW/kg de pescado. Los valores de la misma fila con diferentes letras de superíndice son diferentes significativamente ($p < 0.05$). Ninguna letra en las filas indica que no hay diferencias significativas entre los grupos ($p > 0.05$).

La prueba aplicada a los tratamientos indicó que no había diferencias significativas ($p > 0.05$) en los parámetros de crecimiento entre IDP 1.4 y IDP 1.2; sólo IDP 1.0 fue significativamente menor ($p < 0.05$) (Fig. 25). La diferencia en el crecimiento promedio entre los tratamientos IDP 1.2 y IDP 1.0 fue de 185 g y, el crecimiento en IDP 1.0 no alcanzó los 800 g. La longitud estándar y el peso promedio no presentaron diferencias significativas ($p > 0.05$) entre los tratamientos en todo el período de cultivo (Fig. 26).

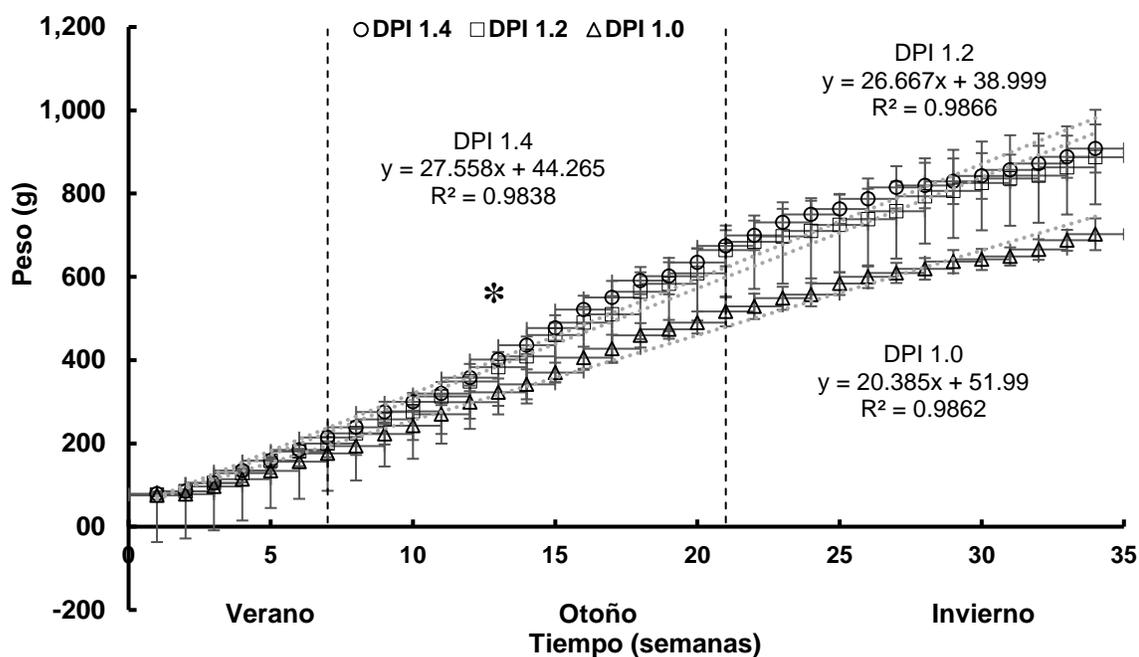


Figura 25. Crecimiento promedio de *Oreochromis niloticus* durante 34 semanas con tres niveles diferentes de IDP (1.4, 1.2, 1.0) en tres estaciones. BW= peso corporal (g). Después de la semana 13 (asterisco), IDP 1.4 y 1.2 ($p > 0.05$) difieren significativamente de IDP 1.0 ($p < 0.05$). Implementación de los diferentes valores de ingesta diaria de proteínas (IDP), IDP 1,0 a 100% ($IDP = -3.818 \ln(BW) + 30.158$), IDP 1.2 = 120% ($IDP = -4.582 \ln(BW) + 36,19$) y IDP 1.4=140% ($IDP = -5.345 \ln(BW) + 42.221$).

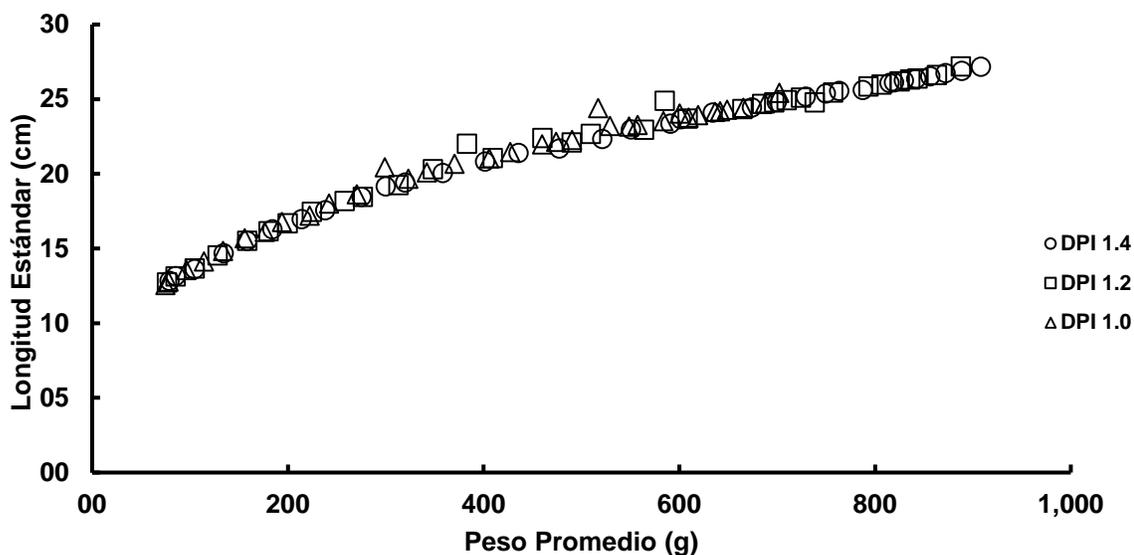


Figura 26. Relación con la Longitud Estándar y el Peso Promedio durante el tiempo de cultivo. BW= peso corporal (g). Implementación de los diferentes valores de ingesta diaria de proteínas (IDP), IDP 1.0 = 100% ($IDP = -3.818 \ln (BW) + 30.158$), IDP 1.2 = 120% ($IDP = -4.582 \ln (BW) + 36,19$) y IDP 1.4=140% ($IDP = -5.345 \ln (BW) + 42.221$).

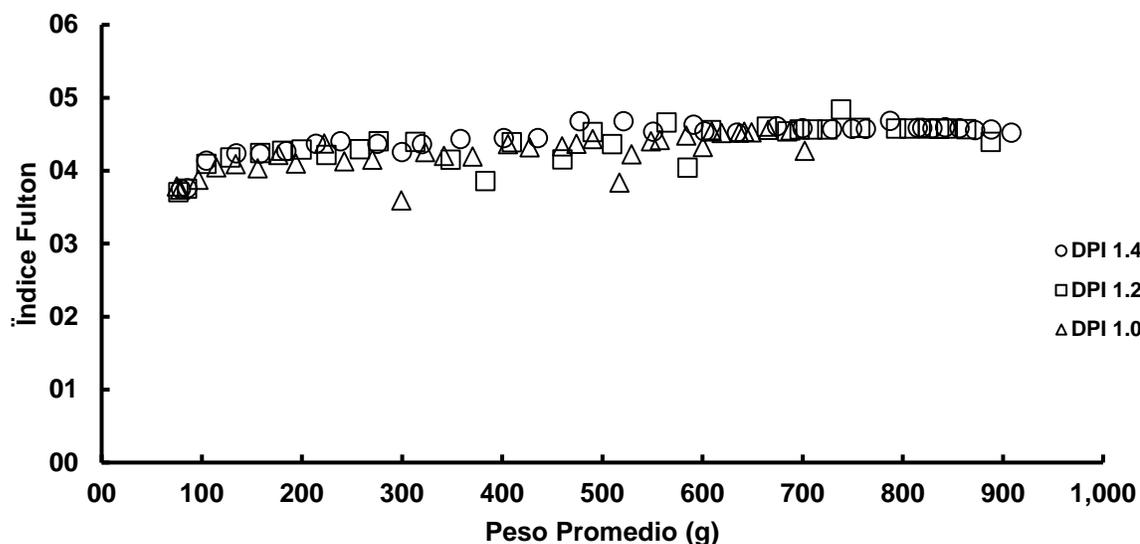


Figura 27. Relación del Índice Fulton y el Peso Promedio (g) durante todo el período de cultivo (34 semanas). BW= peso corporal (g). Implementación de los diferentes valores de ingesta diaria de proteínas (IDP), IDP 1.0 = 100% ($IDP = -3.818 \ln (BW) + 30.158$), IDP 1.2 = 120% ($IDP = -4.582 \ln (BW) + 36,19$) y IDP 1.4=140% ($IDP = -5.345 \ln (BW) + 42.221$).

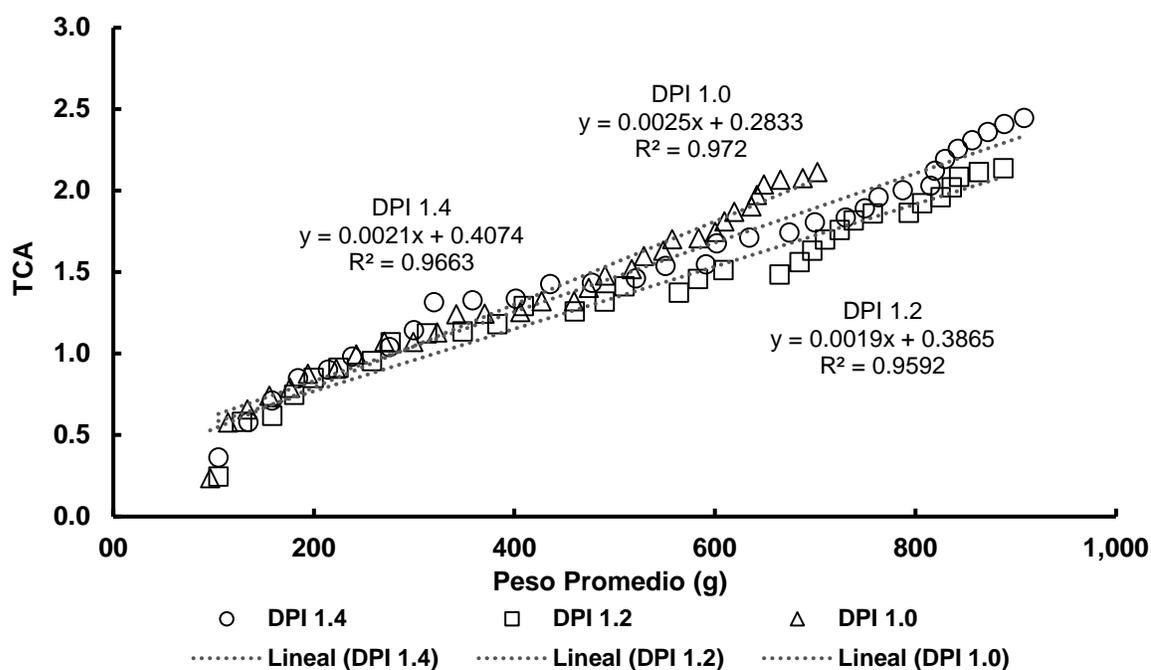


Figura 28. Relación del FCA con el peso (g) durante 34 semanas en IDP 1.4, IDP 1.2 e IDP 1.0. Implementación de los diferentes valores de ingesta diaria de proteínas (IDP), IDP 1.0 = 100% ($IDP = -3.818 \ln(BW) + 30.158$), IDP 1.2 = 120% ($IDP = -4.582 \ln(BW) + 36,19$) y IDP 1.4=140% ($IDP = -5.345 \ln(BW) + 42.221$).

El índice de Fulton presentó variación entre los tratamientos, sin diferencia entre IDP 1.4 y IDP 1.2, sólo con IDP 1.0 (Fig. 27). El FCA aumentó durante el experimento (Fig. 28), con diferencias significativas en las semanas 13, 18 y 19 ($p > 0.05$) en IDP 1.4, IDP 1.2, y IDP 1.0 (b, ab, a respectivamente). IDP 1.4 y IDP 1.2 alcanzó en menos tiempo el tamaño comercial de 350 g a 900 g (Tabla VIII).

El FCA presentó el mismo comportamiento. Después de que *O. niloticus* alcanzó los 700 g, no se encontró ninguna diferencia significativa en los tratamientos IDP 1.4 y IDP 1.2. La supervivencia no presentó diferencias significativas entre los tratamientos en todo el período de cultivo (Tabla VIII).

Tabla VIII. Tiempo de cultivo (semanas), factor de conversión alimenticia (FCA) y supervivencia (S) necesaria para alcanzar los objetivos de peso de *O. niloticus* (350 g a 900 g).

Peso (g)	Semanas para alcanzar peso(g)			TCA para alcanzar peso (g)			Supervivencia (%)		
	IDP 1.4	IDP 1.2	IDP 1.0 ¹	IDP 1.4	IDP 1.2	IDP 1.0	IDP 1.4	IDP 1.2	IDP 1.0
350	11.8 ± 0.5 ^b	12 ± 0.4 ^{ab}	14 ± 1.7 ^a	1.3 ± 0.1	1.1 ± 0	1.2 ± 0.2	99.7±0.5	99.7±0.5	99.2±1.0
500	15.8 ± 1.3 ^b	16.9 ± 1 ^b	20.5 ± 1.3 ^a	1.4 ± 0.2	1.3 ± 0.1	1.5 ± 0.2	99.4±0.6	99.7±0.5	98.9±0.8
600	18.8 ± 1.5 ^b	20 ± 1.4 ^b	26.6 ± 1.8 ^a	1.6 ± 0.3 ^{ab}	1.5 ± 0.2 ^b	1.8 ± 0.2 ^a	99.4±0.6	99.7±0.5	98.9±0.8
700	22 ± 1.4 ^b	24 ± 2.9 ^b	32 ± 0.0 ^a	1.8 ± 0.2 ^b	1.7 ± 0.2 ^c	2.1 ± 0.1 ^a	99.4±0.6	99.7±0.5	98.9±0.6
800	26.9 ± 2.5	28.2 ± 4.5		2 ± 0.3	1.9 ± 0.3		99.4±0.6	99.7±0.5	
900	31.5 ± 0.7	31 ± 2.8		2.3 ± 0.1	2.0 ± 0.2		99.4±0.6	99.7±0.5	

Notas: Cada valor representa la media de la desviación estándar (DE). Los valores de la misma fila con diferentes letras de superíndice son significativamente diferentes ($p < 0.05$). ¹*O. niloticus* en IDP 1.0 no superó los 800 g.

Tabla IX. Análisis proximal y elemental efectuado en los alimentos implementados en los experimentos con diferente porcentaje de proteína (35%, 40% y 44) durante el experimento SAR y TBF.

Código	Humedad (%)	Proteína (%)	Nitrógeno (%)	Lípido (%)	Fibra cruda(%)	Ceniza (%)	ENF (%)	Energía (cal/g)
P40²	8.50±0.05	44.47±0.05	7.12±0.01	4.88±0.03	1.93±0.06	9.16±0.03	39.56	4713.84±02.74
Macronutrientes mg/L ⁴								
	N	P	K	Ca	Mg	S	Na	
P35¹	5.5	10434.6	9326.9	17470.3	4659.5	1505.1	nd	
P40²	6.3	10867.4	9825.3	27240.9	4908.5	1747.3	nd	
P44³	7.5	8965.3	7456.4	14451.5	3725.1	1946.8	1.5	
Micronutrientes mg/L ⁴								
	B	Fe	Mn	Mo	Zn	Cu	Co	Ni
P35¹	31.2	172.9	2476.1	41.0	154.4	17.1	nd	2459.8
P40²	36.3	327.8	2864.2	48.4	255.4	23.1	nd	3704.0
P44³	26.8	306.9	1725.6	46.8	122.6	9.4	nd	4253.7

Notas: ¹ P35= 35% la proteína en la alimentación, ² P40=40% la proteína en la alimentación y ³ P44= 44% la proteína en la alimentación. ⁴ Análisis elementales de 16 elementos; macro y micronutrientes, obtenidos con espectrofotometría equipo de plasma de acoplamiento inductivo (ICP siglas en Inglés).

7.1.5 Análisis de nutrientes en alimentos

El alimento comercial con 40% de proteína (P40), presento un menor nivel de lípidos y un mayor nivel de proteína. Con el mismo alimento se obtuvo el nivel más alto de casi todos los elementos excepto Ni y S. P40 tuvo el mayor valor de Cu y Na. El alimento utilizado durante el periodo de SAR y TBF fue P40, para los proximales presento: 40.6% de proteína; 7.6% lípidos, 1.8% fibra (Tabla IX). Los aminoácidos que se encontraron en mayor cantidad fueron el glutamato, aspartato y leucina (Tabla X). Para el análisis del cuerpo completo en tiempo cero los valores de proteína fueron 59.8%, lípidos de 5.6% y cenizas de 29.3% (Tabla X). Los aminoácidos que se encontraron en mayor cantidad fueron arginina, leucina, lisina, alamina, aspartato y glutamato.

7.1.6 Análisis de nutrientes en peces

El análisis proximal del cuerpo completo de los peces en la semana 17 indicó que la humedad, los lípidos, las cenizas, el nitrógeno libre de energía y energía presentan valores diferentes entre los tratamientos ($p < 0.05$). La IDP 1.2 y la IDP 1.0 presentaron el nivel más alto de proteína con un 53.8 % y un 53.9 %, pero en la IDP 1.0 disminuyó el nivel de lípidos, al nivel más bajo del 20.7%, la IDP 1.4 tuvo el nivel más alto con un 26.2 %. En el tiempo final (34 semanas), todos los componentes fueron diferentes entre los tratamientos ($p < 0.05$). La IDP 1.2 presentó un nivel significativamente más alto de energía y de nitrógeno, y la IDP 1.0 presentó el nivel más alto de proteína, pero los niveles más bajos de lípidos y energía, asimismo, presentó el nivel más alto de ceniza. En los filetes, el nivel de proteína y el nivel de nitrógeno fueron más altos en la IDP 1.2, pero el tratamiento tuvo un nivel significativamente menor de lípidos y fibra, aunque el mayor contenido de energía (Tabla XI).

Tabla X. Análisis de aminoácidos en los organismos de TBF tiempo cero y del alimento de 40% de proteína implementado durante el experimento de SAR y TBF.

	Amino ácidos (g/100 g)							
	Esenciales AA		No esenciales AA				Condicionales AA	
	T0 ¹	P40 ²	T0 ¹	P4 ²	T0 ¹	P4 ²		
Arginina	3.4	2.0	Alanina	3.9	1.6	Cisteína	0.1	0.4
Histidina	0.8	0.7	Asparaguina	-	-	Glutamina	-	-
Isoleucina	1.4	0.9	Aspartato	4.7	3.0	Hidroxiprolina	0.8	0.3
Leucina	3.3	2.3	Glutamato	7.3	5.5	Prolina	3.7	1.8
Lisina	3.5	1.7	Glicina	5.6	1.6	Taurina	1.3	-
Metionina	0.9	0.2	Serina	2.5	1.6	mg lípidos/g proteína	186.6	
Fenilalanina	1.8	1.4	Tirosina	1.5	1.1			
Treonina	2.3	1.2						
Triptófano	-	-						
Valina	1.9	1.1						

Notas: ¹T0= *O. niloticus* en tiempo cero, antes de iniciar el experimento de 40 semanas de TBF, ² Alimento comercial, P40= 40% de proteína.

Tabla XI. Análisis proximal del cuerpo completo y filete de *Oreochromis niloticus* con diferentes niveles de IDP a la mitad (17 semanas, solo cuerpo completo) y al final del cultivo (34 semanas, cuerpo completo y filete).

	Tiempo medio (incluye cuerpo completo)			Tiempo final (incluye cuerpo completo)			Tiempo final (solo filete)		
	IDP 1.4	IDP 1.2	IDP 1.0	IDP 1.4	IDP 1.2	IDP 1.0	IDP 1.4	IDP 1.2	IDP 1.0
Humedad (%)	63.4±0.1 ^c	70.8±0.2 ^b	72.7±0.1 ^a	67.0±0.1 ^c	67.8±0.01 ^b	74.8±0.01 ^a	77.8±0.2 ^b	78.0±0.1 ^b	78.4±0.1 ^a
Proteína cruda (%)	48.5±0.3 ^b	53.8±0.3 ^a	53.9±0.1 ^a	51.9±0.3 ^b	51.0±0.2 ^c	60.6±0.2 ^a	80.6±0.1 ^c	87.0±0.1 ^a	82.4±0.2 ^b
Lípido crudo (%)	26.2±0.1 ^a	22.8±0.1 ^b	20.7±0.1 ^c	28.2±0.01 ^a	27.6±0.2 ^b	8.8±0.1 ^c	3.6±0.1 ^b	3.3±0.1 ^c	3.9±0.1 ^a
Fibra cruda (%)	0.2±0.0	0.3±0.1	0.2±0.1	0.1±0.01	0.1±0.1	0.2±0.1	0.4±0.1	0.2±0.1	0.3±0.1
Ceniza (%)	13.8±0.1 ^b	11.7±0.1 ^c	14.7±0.1 ^a	15.6±0.3 ^b	10.9±0.1 ^c	24.7±0.1 ^a	5.2±0.1 ^b	5.2±0.02 ^b	5.3±0.03 ^a
NLE (%)	11.4±0.01 ^b	11.4±0.01 ^a	10.5±0.01 ^c	4.2±0.01 ^c	10.3±0.01 ^a	5.8±0.01 ^b	10.3±0.01 ^a	4.3±0.01 ^c	8.1±0.001 ^b
Energía(cal/g)	5289.2±5.4 ^a	5139.3±7.8 ^b	4925.2±3.6 ^c	5338.5±12.3 ^b	5468.5±8.0 ^a	3999.2±7.8 ^c	4787.3±4.4 ^c	5010.5±1.4 ^a	4896.8±4.9 ^b
Lípido (mg/g proteína)¹	540.7±2.1 ^a	424.3±0.1 ^b	384.9±1.5 ^c	543.6±2.6 ^a	541.4±1.8 ^a	144.4±1.2 ^b	44.2±0.01 ^b	37.5±0.01 ^c	47.5±0.01 ^a
DP:DE (g/MJ)²	20.4±0.04 ^c	22.7±0.01 ^b	23.6±0.1 ^a	21.5±0.1 ^c	20.6±0.03 ^b	32.2±0.08 ^a	36.2±0.0 ^c	38.4±0.1 ^a	36.7±0.04 ^b

Notas: Las medias en cada columna seguidas de letras diferentes son significativamente diferentes en $p < 0.05$. ¹Había 186.6 mg de lípido/g de proteína en la alimentación (alimentación comercial con 40% de proteína). ²El DP:DE (g/MJ) se calculó con los siguientes valores: proteínas 5.65 cal/g, lípidos 9.45 cal/g, carbohidratos 4.11 y fibra 4.5 cal/g (NRC, 1993).

En el cuerpo completo de los peces, P y Ca aumentaron en el tiempo final, en comparación con el tiempo inicial en IDP 1.4 y 1.0. S, Na, Fe, aumentaron en todos los tratamientos. En el tiempo final de IDP 1.4, disminuyeron K, Mg, B, Mn, Mo, Zn, Cu y Ni; en IDP 1.2, hubo reducción de P, K, Ca, Mg, B, Mn, Zn, Cu y Ni. En IDP 1.0 de K, Mg, B, Mn, Mo, Zn y Ni (Tabla XII). En el filete los elementos que disminuyeron comparando con respecto al cuerpo completo de los peces en el tiempo inicial fueron P, Ca, Na, Mn, Zn y Cu en todos los tratamientos, en IDP 1.0 hubo disminución en el filete de todos los microelementos (Tabla XII).

En el tiempo medio (semana 17) IDP 1.4 retuvo el nivel más alto de P y Ni, IDP 1.2 de K, Mg, S, Fe, Mn, Mo, Zn, Cu y IDP 1.0 de N, Ca, Mg, B, Mn, Mo. Para el tiempo final en el cuerpo completo IDP 1.4, hubo retención de los valores más altos de N y S, para IDP 1.2 K, B, Fe y, IDP 1.0 de P, Ca, Mg, Na, Mn, Mo, Zn, Cu y Ni. En el tiempo final (semana 34), el tratamiento que retuvo el nivel más alto de los elementos fue el filete depurado con P, Ca, B, Fe, Mn y Zn (Tabla XIII).

7.1.7 Flujo de nutrientes en líquido en SAR

La cantidad de macro y micro elementos retenidos en la fracción líquida no presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos, sólo P en septiembre y S en octubre y diciembre (Tabla XIV). La acumulación de S y P se produjo en septiembre, con todos los macro nutrientes que se acumularon durante el tiempo. Los micronutrientes presentaron variación en el transcurso del cultivo.

Tabla XII. Análisis elemental del cuerpo completo de *Oreochromis niloticus* con diferentes niveles de IDP a la mitad (17 semanas) y al final del cultivo (cuerpo completo y filete) (34 semanas).

	Tiempo medio (cuerpo completo)			Tiempo final (cuerpo completo)			Tiempo final (solo filete)			Depurado ³
	IDP 1.4	IDP 1.2	IDP 1.0	IDP 1.4	IDP 1.2	IDP 1.0	IDP 1.4	IDP 1.2	IDP 1.0	
N, %	6.7	8.3	9.5	9.7	8.4	9.2	11.6	12.5	13.9	12.7
P	19816.6	20135.9	21126.6	25832.7	18826.3	42181.7	7816.2	7532.1	7673.0	8147.4
K	8308.5	9481.8	8364.0	3725.8	4254.4	4838.1	5618.7	7967.6	6582.1	2890.0
Ca	30957.3	30808.1	35294.4	47538.3	30662.9	79076.4	1579.1	1132.0	980.0	1444.2
Mg	4150.8	4736.9	4178.5	1506.6	1305.6	2059.7	1258.2	1322.6	1400.9	1416.6
S	1766.1	1973.3	1890.5	4895.2	5834.8	5643.1	8506.1	7865.0	8693.7	8566.7
Na	nd	nd	nd	3596.2	3679.0	8171.8	2670.5	1327.7	1520.1	1330.3
B	27.0	23.3	24.0	14.9	19.6	21.2	17.6	17.2	14.6	15.5
Fe	50.8	67.3	74.2	63.5	125.1	116.8	73.7	178.1	55.1	93.6
Mn	1380.8	1359.9	1519.0	3.0	2.7	6.1	0.6	0.3	0.3	0.4
Mo	4.2	3.0	4.1	nd	3.4	1.0	nd	nd	0.9	nd
Zn	49.0	62.5	70.3	42.3	39.6	60.6	27.1	24.3	24.1	24.1
Cu	8.2	10.4	8.5	7.6	4.4	11.2	0.3	1.5	0.7	0.9
Co⁴	nd	nd	nd	nd	2.1	nd	nd	1.4	nd	2.4
Ni⁴	4305.6	3941.8	3891.2	nd	2.0	3.7	1.6	nd	2.1	nd

Notas: nd=no detectado, ¹ Macroelementos (N, Ca, K, Mg, Na, Si, P, S) y ² microelementos (B, Fe, Mn, Mo, Ni, Se, Zn). ³Depurados = antes de ser sacrificados los peces fueron depurados en agua limpia durante 15 días, ⁴ no son nutrientes esenciales.

Tabla XIII. Porcentaje de retención elemental en comparación con el contenido elemental en alimentos para el crecimiento de *Oreochromis niloticus* con diferentes niveles de IDP a la mitad (17 semanas) y al final del cultivo (34 semanas).

	Alimento mg/kg	Tiempo medio (incluye cuerpo completo)			Tiempo final (incluye cuerpo completo)			Tiempo final (solo filete)				
		IDP 1.4	IDP 1.2	IDP 1.0	IDP 1.4	IDP 1.2	IDP 1.0	IDP 1.4	IDP 1.2	IDP 1.0	Depurado ³	
	N, %	6.3	6.7	8.3	9.5	9.7	8.4	9.2	11.6	12.5	13.9	12.7
* Macronutrientes (mg/L) ¹	P	10867.4	182.3	101.6	104.9	122.3	72.9	224	18.5	96.4	101.8	106.8
	K	9825.3	84.6	114.1	88.2	44.5	114.2	113.7	116.1	141.8	82.6	43.9
	Ca	27240.9	113.6	99.5	114.6	134.7	64.5	257.8	2	71.7	86.6	147.4
	Mg	4908.5	84.5	114.1	88.2	36	86.7	157.8	61	105.1	105.9	101.1
	S	1747.3	101	111.7	95.8	258.9	119.2	96.7	150.7	92.4	110.5	98.5
	Na	0	nd	nd	nd	nd	102.3	222.1	32.7	49.7	114.9	87.5
	B	36.3	74.4	86.3	103	62	131.5	108.2	83	97.7	84.8	106.2
* Micronutrientes (mg/L) ²	Fe	327.8	15.5	132.4	110.3	85.6	197	93.4	63.1	241.7	30.9	169.9
	Mn	2864.2	48.2	98.5	111.7	0.2	90	226	9.8	50	100	133.3
	Mo	48.4	8.7	71.4	136.7	nd	nd	29.4	nd	nd	nd	nd
	Zn	255.4	19.2	127.5	112.5	60.2	93.6	153	44.7	89.7	99.2	100
	Cu	23.1	35.5	126.8	81.7	81.4	57.9	254.5	2.7	500	46.7	128.6
	Co⁴	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	Ni⁴	3704	116.2	91.5	98.7	nd	nd	185	43.2	nd	nd	nd

Notas: nd=no detectado, ¹ Macroelementos (N, Ca, K, Mg, Na, Si, P, S) y ² microelementos (B, Fe, Mn, Mo, Ni, Se, Zn). ³Depurados = antes de ser sacrificados los peces fueron depurados en agua limpia durante 15 días, ⁴ no son nutrientes esenciales.

Tabla XIV. Análisis del contenido macro y micronutriente en la fracción líquida, durante cinco meses en tres niveles de IDP 1.4, IDP 1.2 y IDP 1.0.

Mes	Tratamiento	N	P	K	Ca	Mg	S	Na
	Tiempo 0	20.2	nd	1.9	63.5	30.9	nd	37.2
Agosto	IDP 1.4	17.7±8.6	nd	4.8±2.5	71.4±21.9	35.6±14.1	nd	81.7±39.2
	IDP 1.2	14.7±9.4	nd	4.5±0.7	64.9±7.4	34.2±4.2	nd	76.4±6.5
	IDP 1.0	14±5.1	nd	5.0±1.9	72.5±19.3	36.0±11.0	1.3±1.0	95.5±28.5
Septiembre	IDP 1.4	132.1±39.0	1.9±0.3 ^a	24.9±6.7	164.8±35.5	54.3±13.6	6.9±1.8	168.5±44.8
	IDP 1.2	114.0±23.5	1.9±0.3 ^a	23.1±6.6	163.7±50.8	55.4±15.3	6.7±2.6	176.5±44.7
	IDP 1.0	107.8±19.5	1.2±0.2 ^b	19.1±4.8	163.2±35.4	54.8±14.7	6.1±2.1	168.1±61.6
Octubre	IDP 1.4	226.9±85.1	5.05±0.8	68.4±15.6	250.2±45.8	88.0±25.2	19.2±2.5 ^a	293.9±97.0
	IDP 1.2	202.7±46.2	5.3±1.5	65.5±7.0	269.8±19.7	93.4±7.7	18.7±0.9 ^{ab}	303.7±21.2
	IDP 1.0	207.1±65.0	3.7±0.3	46.8±12.7	249.0±67.3	77.8±24.5	14.4±3.0 ^b	247.4±93.8
Noviembre	IDP 1.4	207.8±36.9	8.4±1.1	107.2±22.6	276.4±51.0	116.9±36.2	25.5±2.3	405.4±141.9
	IDP 1.2	232.3±96.1	7.8±1.9	81.9±28.4	248.3±78.5	95.3±31.9	19.1±6.1	326.1±113.0
	IDP 1.0	168.9±74.8	6.5±2.6	85.3±32.0	303.1±83.7	115.2±30.6	20.7±6.4	410.8±94.0
Diciembre	IDP 1.4	196.1±67.2	15.8±2.3	165.8±29.7	331.8±30.9	149.5±25.2	35.8±1.5 ^a	487.5±89.6
	IDP 1.2	233.7±107.1	15.2±5.0	119.1±34.9	311.3±56.2	127.8±19.3	29.2±5.4 ^{ab}	432.9±44.0
	IDP 1.0	239.1±141.2	12.3±5.3	108.3±37.6	321±67.0	121.0±23.0	24.8±5.7 ^b	413.2±79.3
Mes	Tratamiento	B	Fe	Mn	Mo	Zn	Co	Ni
	Tiempo 0	0.1	nd	nd	nd	0.1	0.0	nd
Agosto	IDP 1.4	0.2±0.1	nd	nd	0.04±0.03	0.1±0.04	0.01±0.01	0.02±0.01
	IDP 1.2	0.4±0.1	0.03±0.01	0.1±0.03	0.04±0.03	0.1±0.04	0.02±0.01	0.04±0.01
	IDP 1.0	0.6±0.1	0.1±0.02	0.2±0.09	0.1±0.05	0.1±0.03	0.01±0.01	0.03±0.01
Septiembre	IDP 1.4	0.9±0.2	0.1±0.01	0.2±0.06	0.1±0.03	0.1±0.03	0.02±0.01	0.02±0.01
	IDP 1.2	1.0±0.1	0.2±0.05	0.3±0.06	0.1±0.05	0.2±0.04	0.01±0.01	0.04±0.04
	IDP 1.0	0.2±0.03	nd	nd	nd	0.1±0.04	0.01±0.004	0.01±0.01
Octubre	IDP 1.4	0.4±0.1	0.03±0.01	0.1±0.03	0.1±0.03	0.1±0.01	0.02±0.01	0.03±0.02
	IDP 1.2	0.6±0.02	0.1±0.02	0.2±0.02	0.1±0.02	0.1±0.04	0.02±0.02	0.02±0.02
	IDP 1.0	0.7±0.2	0.1±0.02	0.2±0.07	0.1±0.03	0.2±0.03	0.02±0.01	0.03±0.01
Noviembre	IDP 1.4	0.9±0.1	0.1±0.05	0.3±0.1	0.1±0.05	0.2±0.08	0.02±0.01	0.04±0.02
	IDP 1.2	0.2±0.1	nd	nd	0.006±0.003	0.1±0.03	nd	0.03±0.03
	IDP 1.0	0.4±0.1	0.04±0.02	0.05±0.02	0.05±0.02	0.1±0.02	0.01±0.01	0.03±0.01
Diciembre	IDP 1.4	0.5±0.1	0.06±0.03	0.2±0.04	0.1±0.1	0.1±0.03	0.02±0.004	0.03±0.02
	IDP 1.2	0.8±0.2	0.1±0.04	0.2±0.1	0.1±0.01	0.1±0.05	0.01±0.004	0.03±0.02
	IDP 1.0	0.8±0.1	0.1±0.07	0.3±0.1	0.04±0.01	0.2±0.06	0.02±0.006	0.03±0.01

Notas: nd=no detectado, Macroelementos (N, Ca, K, Mg, Na, Si, P, S) y microelementos (B, Fe, Mn, Mo, Zn, Co, Ni)

7.1.8 Comparación de las diferentes estrategias para alimentar a *O. niloticus* y la implementación de la ingesta diaria de proteínas (IDP).

La mayoría de los análisis de datos en las diferentes estrategias de alimentación (por ejemplo, saciedad, saciedad con el tiempo, porcentaje de peso corporal fijo, porcentaje de peso corporal variable, utilizando un g/kg específico), mostraron una subalimentación, independientemente del tamaño o la estrategia implementadas, también algunos datos indicaron que el organismo fue sobrealimentado en comparación con los datos obtenidos con el IDP en el experimento, a diferentes temperaturas (24°C, 26°C y 28°C) (Tabla XV).

Al analizar y comparar las diferentes estrategias de alimentación de cuarenta y nueve trabajos de investigación, se encontró que en la mayoría de los casos hubo subalimentación tanto de alevines como juveniles de tilapia, en comparación con todas las estrategias de la IDP, con inclusión de la IDP a diferentes temperaturas: 24°C, 28°C y 32°C (Fig. 29).

Tabla XV. Resultados de los análisis de diferentes trabajos de investigación; estos datos muestran las diferentes estrategias de alimentación utilizadas en los experimentos de tilapia. 1. *Oreochromis niloticus*, 2. *O. niloticus* x *O. aureus*, 3. *O. niloticus* x *O. mossambicus* y 4. *O. aureus*. La IDP (g proteína/kg biomasa) se estimó en este trabajo con base en la información proporcionada por los diferentes autores.

Especie	Densidad (pez tanque ⁻¹)	Proteína (%)	Peso inicial (g)	Biomasa inicial (g)	Peso final (g)	Biomasa final (g)	Promedio peso corporal (%)	IDP (g proteína/kg biomasa)	TCA	Ración alimento	Período de cultivo (Días)	Autores
Estrategias 1 y 2: saciar y saciar con tiempo												
1	25	30	1.21	30.25	5.32	133	•	6.7	2.01	nd	90	(Yigit y Olmez, 2009)
1	12	28	1.83	21.96	12.46	149.52	•	9.2	1.22	6	37	(Quadros <i>et al.</i> , 2009)
1	30	30	13	390	273	8190	•	3.7	1.86	2	150	(El-Sayed, 1998)
3	20	30	1.07	21.4	34.75	695	•	4.2	1.18	2	84	(De Silva <i>et al.</i> , 1991)
1	15	35	6.81	102.15	120.1	1801.5	•	5.5	0.95	3	60	(Koch <i>et al.</i> , 2016)
1	30	30	4	120	20.5	615	•	9.3	1.74	3	56	(Lin y Luo, 2011)
1	30	36.3	0.7	21	35.8	1074	•	6.7	1.1	2	60	(Cao <i>et al.</i> , 2008)
1	30	36.4	0.73	21.9	34.9	1047	•	6.9	1.14	3	60	(Cao <i>et al.</i> , 2008)
1	25	29.7	3.5	87.5	23	575	•	5.0	1.4	nd	84	(Soltan, y Abdel-Moez, 2015)
1	10	40	10.61	106.1	29.91	299.1	•	5.1	1.44	3	112	(Ergün <i>et al.</i> , 2009)
1	100	28.3	7.6	760	28.8	2880	•	8.3	1.5	2	51	(Ozório <i>et al.</i> , 2012)
1	20	30	2.87	57.4	46.64	932.8	•	6.4	1.27	2	60	(Yangthong, Oncharoen, y Sripanomyom, 2014)
1	20	30	2.89	57.8	45.7	914	•	6.9	1.38	2	60	(Yangthong <i>et al.</i> , 2014)
1	20	36	0.12	2.4	3.99	79.8	•	11.2	1.4	3	45	(Trosvik <i>et al.</i> , 2013)
1	28	32	12.5	350	33.6	940.8	•	3.2	0.54	2	54	(Kasper y Brown, 2003)
1	10	37.91	0.154	1.54	6.164	61.64	•	8.6	1.43	nd	63	(Flores <i>et al.</i> , 1995)
1	25	35	6.1	152.5	33	825	•	7.5	1.2	4	56	(Watanabe <i>et al.</i> , 1980)
1	10	35	0.4	4	7.6	76	•	8.0	1.6	1	70	(Ahmad <i>et al.</i> , 2004)
1	10	45	0.4	4	10.2	102	•	9.6	1.5	1	70	(Ahmad <i>et al.</i> , 2004)
1	10	35	17	170	45.2	452	•	9.5	1.9	1	70	(Ahmad <i>et al.</i> , 2004)

1	10	45	17	170	44.3	443	•	12.9	2	1	70	(Ahmad <i>et al.</i> , 2004)
1	10	35	37	370	64.7	647	•	11.5	2.3	1	70	(Ahmad <i>et al.</i> , 2004)
1	10	45	37	370	62.9	629	•	15.4	2.4	1	70	(Ahmad <i>et al.</i> , 2004)
1	20	41.5	0.12	2.4	3.99	79.8	•	13.8	1.4	3	42	(Trosvik <i>et al.</i> , 2013)
4	12	27.4	13.4	160.8	0.856	10.272	•	9.1	1.4	2	42	(Will <i>et al.</i> , 2002)
2	28	30.1	2.7	75.6	65.8	1842.4	•	9.9	2.3	2	70	(Coyle <i>et al.</i> , 2004)
2	20	33.2	1.93	38.6	12.3	246	•	7.6	1.61	2	70	(El-Saidy y Gaber, 2002)
Estrategia 3: Fijar por el promedio del peso												
1	13	24	98.45	1279.9	138.58	1801.54	1.5	3.6	3.44	2	84	(Azim y Little, 2008)
1	160	35	2.5	400	49.08	7852.8	3	10.5	2.03	1	180	(Bahnasawy, 2009)
1	14	30	1.37	19.18	4.42	61.88	5	15.0	1.78	2	56	(Chou y Shiau, 1996)
2	14	29.2	1.34	18.76	4.52	63.28	5	14.6	1.64	2	56	(Chou y Shiau, 1996)
1	30	30	24.5	735	79.5	2385	3	9.0	1.38	2	56	(Dato-Cajegas y Yakupitiyage, 1996)
1	20	27.5	1.18	23.6	21.6	432	4	11.0	1.623	3	nd	(Ghazalah <i>et al.</i> , 2010)
1	30	35	4.35	130.5	19.79	593.7	3.5	12.3	2.27	3	54	(Khan, Siddique, y Zamal, 2013)
1	30	35	4.22	126.6	19.53	585.9	3.5	12.3	2.31	3	54	(Khan <i>et al.</i> , 2013)
1	30	30	4.35	130.5	19.79	593.7	3.5	10.5	2.27	3	nd	(Khan <i>et al.</i> , 2013)
1	15	35	15.87	238.05	80	1200	7	24.5	nd	nd	nd	(Liu <i>et al.</i> , 2018)
1	30	46	50.61	1518.3	160.54	4816.2	3	13.8	0.83	2	56	(Long <i>et al.</i> , 2015)
1	20	32	4.77	95.4	26.59	531.8	5.5	17.6	1.28	2	42	(Nguyen, Davis, y Saoud, 2009)
1	18	28	3.89	70.02	55.5	999	5.5	15.4	nd	2	70	(Nguyen <i>et al.</i> , 2009)
1	3	35.45	1.1	3.3	3.12	9.36	10	35.5	nd	1	60	(Cavalheiro, Souza, y Bora, 2007)
1	10	30	0.34	3.4	2.4	24	6	18.0	1.9	3	nd	(Plascencia-Jatomea <i>et al.</i> , 2002)
2	15	30	0.83	12.45	2.48	37.2	5	15.0	1.84	2	56	(Chou, Shiau, y Hung, 2001)
1	20	38.18	0.1	2	3.34	66.8	5	19.1	nd	4	35	(Thompson <i>et al.</i> , 2012)
1	20	40.91	0.1	2	2.7	54	5	20.5	nd	4	35	(Thompson <i>et al.</i> , 2012)

1	15	30	21.3	319.5	60.15	902.25	3	9.0	nd	2	70	(Twibell y Brown, 1998)		
1	15	32	21	315	58.15	872.25	3	9.6	nd	2	71	(Twibell y Brown, 1998)		
1	19	33.7	0.8	15.2	3.41	64.79	5	16.9	1.49	2	56	(Shiau y Chuang, 1995)		
1	25	30	1.21	30.25	5.32	133	10.0	30.0	2.01	nd	90	(Yigit y Olmez, 2009)		
Estrategia 4: Porcentaje de peso corporal variable †														
							I%	F%	I	F				
1	25	45	0.33	8.25	10.05	251.25	10	5	45	22.5	1.34	2	84	(Abdel-Tawwab, 2012)
1	25	45	0.32	8	10	250	10	5	45	22.5	1.34	2	84	(Abdel-Tawwab, 2012)
1	10	34	1.43	14.3	6.22	62.2	10	4	34	13.6	1.69	2	42	(Diop <i>et al.</i> , 2013)
1	50	40.2	0.02	1	1.87	93.5	20	6	80.4	24.12	1.01	4	77	(Hussein <i>et al.</i> , 2013)
3	20	30	4.48	89.6	42.34	846.8	6	4	18	12	1.64	2	70	(Fasakin, Serwata, y Davies, 2005)
3	15	30	1.93	28.95	10.39	155.85	6	4	18	12	1.24	2	56	(Fasakin <i>et al.</i> , 2005)
1	10	37	1.24	12.4	14.92	149.2	10	4	37	14.8	5.92	2	42	(Loum <i>et al.</i> , 2013)
1	10	32	1.21	12.1	13.87	138.7	10	4	32	12.8	5.85	2	42	(Loum <i>et al.</i> , 2013)
1	20	32.6	30	600	408.2	8164	3.8	2.8	12.38	9.128	2.84	2	103	(Wu <i>et al.</i> , 1994)
1	25	34.6	0.5	12.5	14.45	361.25	14	6.5	48.44	22.49	1.25	nd	56	(Wu, Rosati, y Brown, 1997)
1	25	34.6	0.5	12.5	12.1	302.5	14	6.5	48.44	22.49	1.43	nd	56	(Wu <i>et al.</i> , 1997)
1	20	32	30	600	96.3	1926	3.8	3.1	12.16	9.92	1.85	2	75	(Wu <i>et al.</i> , 1995)
1	20	32.1	30	600	91.8	1836	3.8	3.1	12.19	9.95	1.86	2	75	(Wu <i>et al.</i> , 1995)
Estrategias 5 y 6: Utilización de un peso específico g/kg ‡														
1	5	40.7	41.9	209.5	84.5	422.5	a	7.3	1	nd	56	(Mamun <i>et al.</i> , 2007)		
1	40	32.5	56.4	2256	157	6280	b	6.6	1	nd	49	(Schneider <i>et al.</i> , 2004)		
1	15	32	2.8	42	9.6	144	c	2.4	0.41	nd	54	(Kasper, White, y Brown, 2000)		
1	15	32	3.3	49.5	14	210	c	3.0	0.5	2	54	(Kasper <i>et al.</i> , 2000)		
1	15	32	3.3	49.5	13.4	201	c	3.0	0.51	2	54	(Kasper <i>et al.</i> , 2000)		
1	2	34.5	5	10	35.8	71.6	d	4.9	1	2	70	(Dongmeza <i>et al.</i> , 2006)		
1	40	42.88	45	1800	153.5	6140	e	7.5	0.98	4	56	(Amirkolaie <i>et al.</i> , 2005)		

1	7	35	10.09	70.63	37.19	260.33	d	2.6	0.9	2	119	(Richter, Siddhuraju, y Becker, 2003)
1	30	35	6.7	201	61.7	1851	f	5.0	1.2	5	84	(Fontainhas-Fernandes, <i>et al.</i> , 1999)

Notas: † la estrategia Porcentaje de peso corporal variable de presenta dos IDP (inicial (I) y final (F)) y dos porcentajes de peso corporal ((I%) inicial y (F%) final). Se calcularon estos datos con base en los FCA. -Explicación de los datos de la estrategia: a) 3.0 g/kg^{0.8} día, b) 17 g de alimentación/ kg^{0.8} día, c) 5 g de alimento (100 g de peso corporal/d), d) 15 g de alimento por peso corporal metabólico kg 0.8, e) 80-89.2 g por día, y f) 4 g/DM peso corporal medio/día.
• = Saciedad, nd = no detectado.

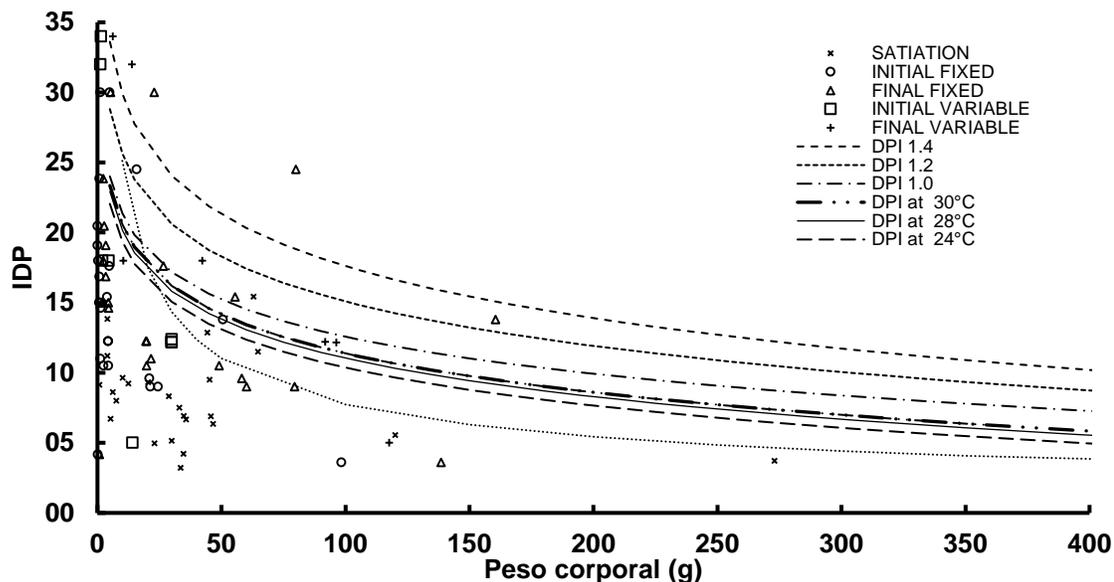


Figura 29. Los símbolos representan los niveles de IDP (g proteína/kg biomasa de pescado) relacionados con el peso corporal de los peces (BW) aplicados en diferentes trabajos de investigación: las equis indican la saciedad, los círculos el tiempo inicial con el porcentaje de peso corporal fijo (BW%), los triángulos indican el tiempo final con el BW% fijo, los cuadrados indican la variable inicial BW%, y las cruces indican la variable final BW% durante los diferentes experimentos reportados en 49 documentos de investigación (Tabla XV). Las líneas representan las funciones matemáticas de IDP: $IDP\ 1.0 = 100\ %$ ($IDP = -3.818 \ln(BW) + 30.158$), $IDP\ 1.2 = 120\ %$ ($IDP = -4.582 \ln(BW) + 36.19$) y $IDP\ 1.4 = 140\ %$ ($IDP = -5.345 \ln(BW) + 42.221$). Se evaluaron diferentes temperaturas ($IDP = -3.997 \ln(BW) + 29.79$ para $30^{\circ}C$, $IDP = -3.965 \ln(BW) + 29.305$ para $28^{\circ}C$, y $IDP = -3.902 \ln(BW) + 28.334$ para $24^{\circ}C$; recomendado por la Agencia de Pesca de Japón (1995). $IDP = -2.807 \ln(BW) + 21.259$ para $28^{\circ}C$ ($R^2 = 0.9725$) con base en los datos originales de Van Trung *et al.* (2011).

En general para el cultivo de tilapia se han reportado seis estrategias para alimentar: saciedad, saciedad con tiempo, biomasa fija durante todo el experimento, biomasa cambiante, implementando un IDP equivalente a gramos de proteína específico por cada kg de biomasa, pero solo incluyó la cantidad de proteína, la digestibilidad, la productividad en el sistema y el crecimiento de la semana (Tabla XVI).

Tabla XVI. Comparación de las diferentes estrategias de alimentación que se implementan en el cultivo de tilapia.

Variables	ESTRATEGIAS DE ALIMENTACIÓN ¹						
	Saciedad	Saciedad con tiempo	Biomasa fija %	Cambio de biomasa %	g.Kg.Bw	g/100 g Bw	IDP
Temperatura	•						•
Peso promedio			•	•	•	•	•
Tasa de alimentación			•	•			
Proteína en alimento							•
Digestibilidad							•
Productividad en el sistema							•
Crecimiento semanal							•
Monitoreo de crecimiento			•	•	•	•	•
Biomasa			•	•	•	•	•
Saciedad	•	•	•	•	•	•	•

Notas: ¹ El punto negro indica que la estrategia de alimentación cumple con las condiciones enlistadas.

EXPERIMENTO II- TBF

7.2 Datos obtenidos durante el Experimento TBF

El período del experimento fue de 40 semanas en las cuales se evaluarán tres niveles tróficos: autotrófico, heterotrófico, fotoautotrófico en dos fases de crecimiento (maternidad y engorda) con *O. niloticus*.

7.2.1 Calidad del agua en el experimento TBF

El oxígeno se mantuvo en un rango óptimo sin diferencias entre tratamientos ($p > 0.05$; Tabla XVII). En la fase de maternidad, el pH presentó diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$; Tabla XVII). La salinidad osciló durante todo el experimento con diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$; Tabla XVII), los valores más altos de estos parámetros se detectaron en los tratamientos M y CV en la fase de engorda. Para la conductividad, Q y H presentaron el nivel inferior durante la fase de maternidad, después de la semana 11 aumentaron al nivel más alto (> 6 dS/m). En la fase de engorda, la conductividad de todos los

tratamientos disminuyó con diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$), los tratamientos fotoautotróficos obtuvieron los niveles más altos (Tabla XVII).

En la fase de maternidad, los compuestos nitrogenados se acumularon progresivamente como $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ excepto $\text{NO}_2\text{-N}$ (Fig. 30 a, b, c). Los valores iniciales de $\text{NH}_4\text{-N}$ se mantuvieron casi nulos durante las primeras siete semanas sin diferencias significativas entre tratamientos. Un aumento de $\text{NH}_4\text{-N}$ se observó después de la semana 8 en tratamientos fotoautotróficos, después de la semana 12 en el tratamiento Q y en el tratamiento H ($p < 0.05$; Fig. 30 a). En la engorda el $\text{NH}_4\text{-N}$ aumentó a valores superiores a 150 mg/L ($p < 0.05$). Después de 35 semanas, el nivel de $\text{NH}_4\text{-N}$ fue mayor sin diferencia significativa ($p > 0.05$). En maternidad los tratamientos CS y CV presentaron altos niveles de $\text{NO}_2\text{-N}$ durante las primeras seis semanas, seguidos de una rápida disminución, después de este periodo, se mantuvo un nivel bajo de este componente (inferior a 5 mg/L) en todos los tratamientos en ambas fases (Fig. 30b).

$\text{NO}_3\text{-N}$ aumentó progresivamente con diferencia significativa ($p < 0.05$) en la fase de maternidad. En la fase de engorda, los tratamientos fotoautotróficos mostraron el nivel más alto de $\text{NO}_3\text{-N}$ entre las semanas 20 y 35, el valor más alto de este componente se observó en la semana 34 en los tratamientos M, CV y CS (Fig. 30 c). Los niveles más altos de fosfatos se detectaron en los tratamientos fotoautotróficos, con diferencias significativas ($p < 0.05$) durante la mayor parte del experimento en ambas fases (Fig. 30d).

Tabla XVII. Descripción de los parámetros de cultivo (Temperatura, DO, pH, conductividad y salinidad), evaporación total y evaporación por semana durante 40 semanas. Cultivo dividido en maternidad (semanas 1-20) y engorda (semana 21-40).

Parámetros Físicoquímicos	S	Q	H	M	CS	CV
Temperatura (°C)	10	21.0±1.0 ^c	20.6±1.1 ^{bc}	19.9±1.3 ^{ab}	20.2±1.4 ^{ab}	19.7±1.4 ^a
	20	24.4±1.8	22.3±1.8	21.8±1.6	22.3±1.6	21.7±1.6
	30	26.5±1.3	26.6±1.3	25.8±1.8	25.7±1.8	25.6±1.6
	40	30.6±0.4	30.4±0.4	29.8±0.4	29.9±0.6	29.7±0.6
OD (O ₂ mg/L) ¹	10	8.9±0.5	8.9±0.8	9.14±0.7	9.2±0.6	9.3±0.7
	20	7.6±1.0	7.8±1.0	7.6±1.0	7.5±1.1	7.8±1.0
	30	6.7±0.6	6.9±0.5	6.6±1.0	6.8±0.8	6.9±0.7
	40	6.3±0.6	6.4±0.9	5.9±0.7	5.9±0.8	6.0±0.8
pH ²	10	7.9±0.8 ^b	8.0±0.5 ^a	7.2±0.9 ^d	7.3±0.9 ^c	7.2±0.9 ^d
	20	5.3±0.5 ^b	5.5±0.5 ^a	5.2±0.5 ^b	5.3±0.4 ^b	5.3±0.4 ^b
	30	5.6±0.6	5.4±0.7	5.5±0.5	5.5±0.5	5.6±0.6
	40	5.1±0.2	5.2±0.2	5.1±0.2	5.1±0.1	5.1±0.3
Conductividad (dS/m) ³	10	1.1±0.1 ^b	1.2±0.4 ^b	3.5±0.3 ^a	3.4±0.3 ^a	3.4±0.4 ^a
	20	4.4±1.6 ^a	4.9±2.1 ^a	3.3±0.4 ^b	3.3±0.4 ^b	3.3±0.4 ^b
	30	2.2±0.3 ^{ab}	2.1±0.3 ^b	2.4±0.5 ^a	2.4±0.5 ^a	2.4±0.4 ^a
	40	3.7±0.4 ^{bc}	3.4±0.4 ^c	4.7±0.6 ^a	4.6±0.5 ^a	4.4±0.4 ^{ab}
Salinidad (ppt)	10	0.6±0.05 ^b	0.6±0.04 ^b	2.0±0.1 ^a	2.0±0.1 ^a	2.0±0.1 ^a
	20	1.4±0.9 ^b	1.8±1.3 ^a	1.9±0.2 ^a	1.8±0.2 ^a	1.9±0.2 ^a
	30	1.0±0.2	1.1±0.1	1.2±0.2	1.2±0.2	1.2±0.2
	40	1.7±0.1 ^{bc}	1.6±0.1 ^c	2.2±0.2 ^a	2.2±0.1 ^a	2.0±0.2 ^{ab}
Evaporación Total (L)	40	1254.6±28.4	1381.0±127.9	1401.2±55.7	1349.1±72.0	1374.9±56.1
Evaporación semanal (L)	T	31.3±0.7	34.5±3.2	35.0±1.4	34.4±1.4	33.7±1.8

Notas: La primera fase se caracterizó por una alta densidad (180 peces/m³) y baja temperatura (semanas 1-20). La segunda fase presentó baja densidad (55 peces/m³) y alta temperatura (semanas 21-40). ¹ OD- Oxígeno disuelto (mg/L); ² rangos de pH 0-14., ³ conductividad en dS/m. Cada valor representa la media de DE. Los valores de la misma fila con superíndices diferentes son significativamente diferentes ($p < 0.05$). Tratamientos: Q= quimioautotrófico, H= heterotrófico, fotoautotróficos: M=*Chlorella* spp., CV=*C. sorokiniana*-2714 y CS=*C. sorokiniana*-2805.

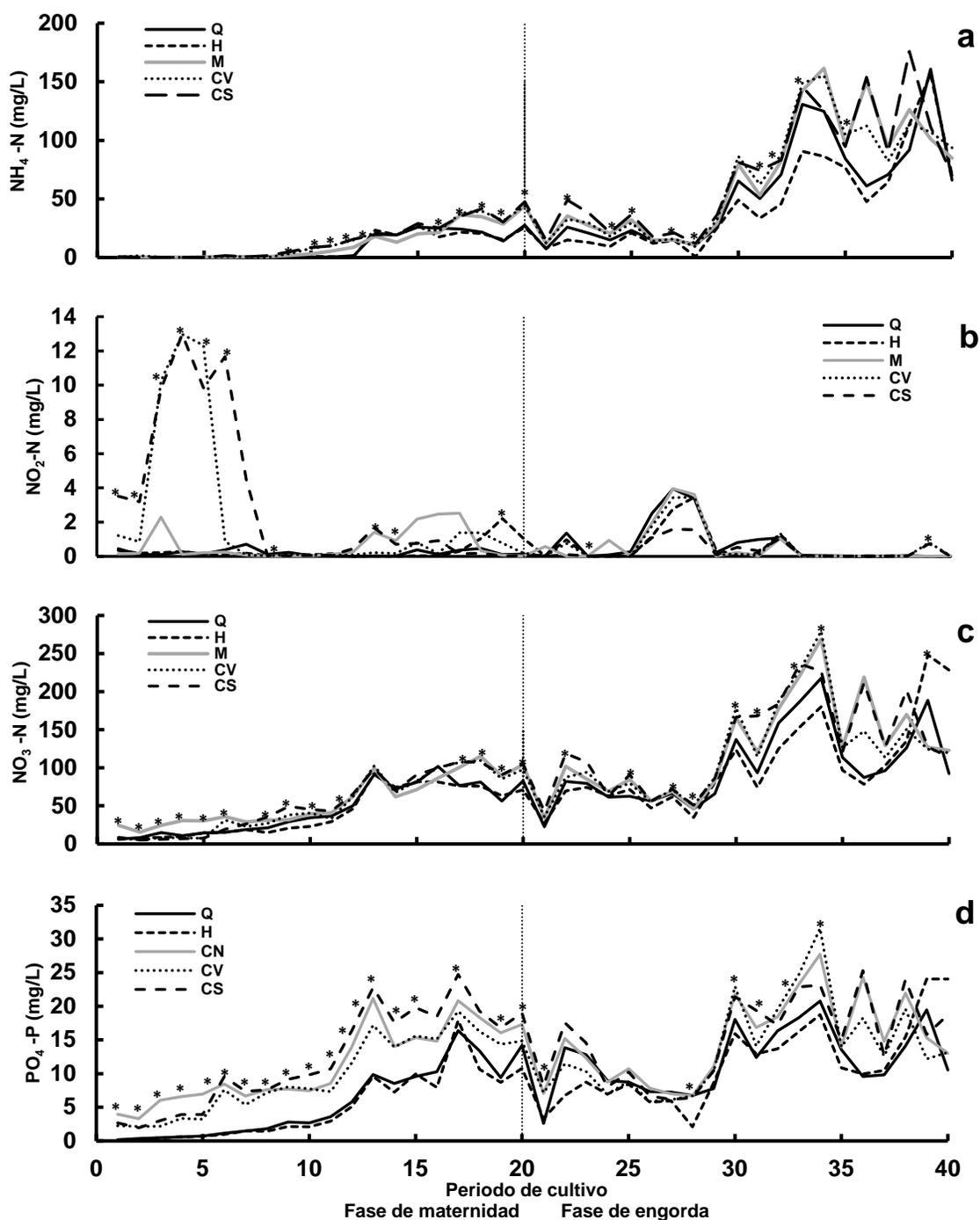


Figura 30. Descripción de la calidad del agua durante el período experimental (40 semanas). (a) amoníaco; (b) nitritos; (c) nitratos y (d) fosfatos. La línea gris vertical en el centro de cada parcela separa los datos en dos fases: maternidad (1 -20 semanas) y engorda (21- 40 semanas), durante el cultivo de tilapia. Tratamiento quimioautotrófico=Q, heterotrófico=H, fotoautotrófico: M=*Chlorella* spp., CV=*C. sorokiniana*-2714 y CS=*C. sorokiniana*-2805.

7.2.2 Rendimiento del crecimiento

Se observaron diferencias tanto en el crecimiento como en el aumento de peso entre los tratamientos fotoautotróficos y los tratamientos Q y H ($p < 0.05$, Tabla XVIII), durante las fases maternidad y engorda (Fig. 31). El factor de conversión alimenticio presento diferencias significativas entre los tratamientos en el tiempo inicial de maternidad y en el tiempo final de engorda ($p < 0.05$, Tabla XVIII). Los tratamientos fotoautotróficos presentaron la mayor supervivencia de los peces en la fase maternidad ($p < 0.05$, Tabla XVIII). En la fase de engorda la supervivencia no mostro diferencias significativas (semana 30) ($p > 0.05$, Tabla XVIII) y en la semana 40, el valor más alto de supervivencia se encontró en los tratamientos Q, H y M con diferencias significativas ($p < 0.05$, Tabla XVIII).

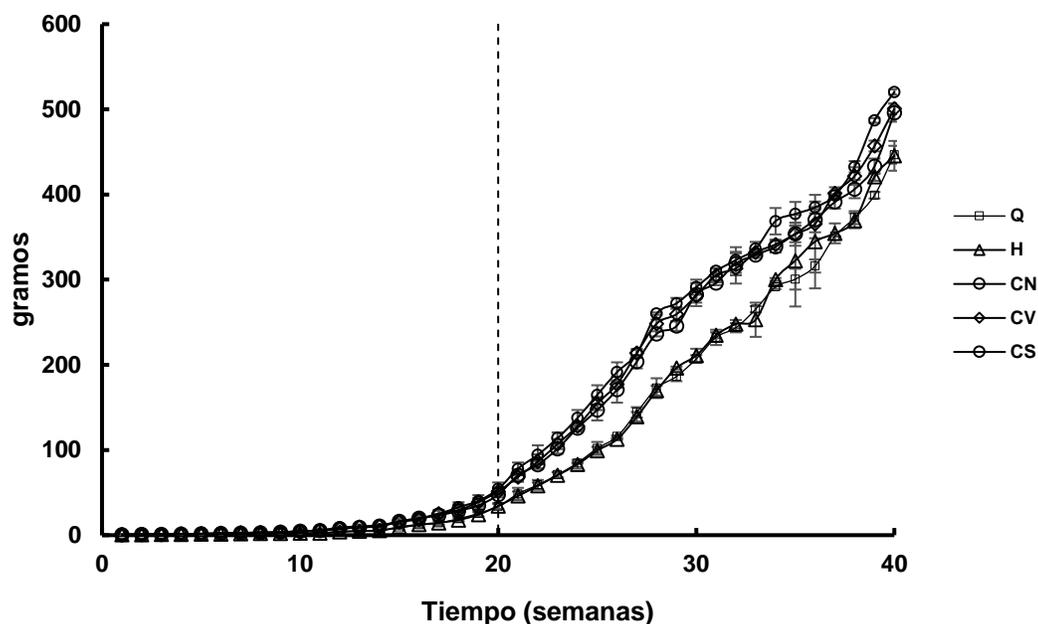


Figura 31. Crecimiento durante 20 semanas para la tilapia (*O. niloticus*) en cinco tratamientos con biofloc. El período se dividió en invierno y verano. Primer período con alta densidad (180 peces/m³) y baja temperatura (1-20 semana), segundo período con baja densidad (55 peces/m³) y alta temperatura (semana 21-30).

Tabla XVIII. Parámetros de producción de tilapia *Oreochromis niloticus* (peso corporal, peso ganado, FCA, TCE y supervivencia) durante 40 semanas en cinco tratamientos de TBF.

Parámetros de crecimiento	S	Q	H	M	CS	CV
Peso corporal (g)	10	2.2±0.2 ^b	2.4±0.4 ^b	4.6±0.6 ^a	4.6±0.5 ^a	4.7±0.3 ^a
	20	33.8±3.2 ^b	34.2±3.2 ^b	47.6±3.2 ^a	51.3±4.5 ^a	54.2±7.7 ^a
	30	207±4.4 ^b	210.9±8.0 ^b	282.5±13.7 ^a	281.1±8.0 ^a	291.1±8.9 ^a
	40	446.7±10.5 ^b	445.4±17.5 ^b	496.0±10.5 ^a	500.6±6.4 ^a	520.2±3.1 ^a
Peso ganado (g/kg)	10	1.9±0.2 ^b	2.1±0.4 ^b	4.2±0.6 ^a	4.3±0.5 ^a	4.3±0.3 ^a
	20	31.5±3.2 ^b	31.8±2.8 ^b	43.0±3.2 ^{ab}	46.7±4.3 ^a	49.5±7.6 ^a
	30	173.2±1.2 ^b	176.7±8.8 ^b	234.9±16.1 ^a	229.8±6.7 ^a	236.9±12.8 ^a
	40	239.7±14.4	234.5±11.8	213.4±23.5	219.5±7.3	229.0±11.9
FCA ¹	10	2.8±0.4 ^{Aa}	2.6±0.3 ^{Aa}	2.0±0.3 ^{Ab}	2.1±0.3 ^{Ab}	2.0±0.2 ^{Ab}
	20	1.4±0.1 ^B	1.3±0.1 ^B	1.4±0.1 ^B	1.3±0.1 ^B	1.3±0.2 ^B
	30	1.7±0.1 ^B	1.6±0.1 ^B	1.7±0.1 ^{AB}	1.7±0.05 ^{AB}	1.8±0.05 ^A
	40	1.5±0.2 ^{Ba}	1.5±0.2 ^{Ba}	1.7±0.2 ^{Aab}	1.7±0.2 ^{Aab}	1.7±0.1 ^{Aab}
TCE (%) ²	10	3.04±0.1 ^{Db}	3.2±0.3 ^{Db}	4.2±0.2 ^{Aa}	4.2±0.1 ^{Aa}	4.2±0.1 ^{Aa}
	20	3.7±0.1 ^{Aa}	3.8±0.1 ^{Aa}	3.2±0.1 ^{Db}	3.2±0.1 ^{Db}	3.3±0.2 ^{Db}
	30	2.1±0.03 ^{Cab}	2.2±0.1 ^{Ca}	2.0±0.1 ^{Cbc}	2.1±0.04 ^{Cb}	1.9±0.05 ^{Cc}
	40	0.9±0.03 ^{Ba}	0.9±0.1 ^{Ba}	0.7±0.03 ^{Bb}	0.7±0.02 ^{Bb}	0.7±0.01 ^{Bb}
Supervivencia (%)	10	87.0±0.02 ^{Cc}	78.3±0.04 ^{Cd}	90.7±0.01 ^{Cbc}	95.6±0.01 ^{Ca}	93.7±0.01 ^{Cab}
	20	98.0±0.01 ^{Bbc}	96.6±0.02 ^{Bc}	98.8±0.003 ^{Bb}	99.0±0.01 ^{Bb}	100.0±0 ^{Aa}
	30	100.0 ^A	100.0 ^A	100.0 ^A	100.0 ^A	100.0 ^A
	40	100.0 ^{Aa}	100.0 ^{Aa}	99.3±0.01 ^{Aa}	95.5±0.02 ^{Cb}	95.0±0.03 ^{Bb}
Producción (kg)	10	0.35±0.02 ^b	0.33±0.04 ^b	0.74±0.1 ^a	0.79±0.1 ^a	0.78±0.06 ^a
	20	5.3±0.4 ^b	4.8±0.6 ^b	7.8±0.5 ^a	8.8±0.8 ^a	9.1±1.2 ^a
	30	11.4±0.2 ^b	11.6±0.4 ^b	15.5±0.8 ^a	15.5±0.4 ^a	16±0.5 ^a
	40	21.4±0.5 ^{ab}	21.4±0.8 ^{ab}	23.3±0.5 ^a	21.2±0.7 ^{ab}	19.4±1.3 ^b

Notas: ¹ FCA= Factor de conversión de alimenticia, ² TCE=tasa de crecimiento específica. La primera fase se caracterizó por una alta densidad (180 peces/m³) y baja temperatura (semanas 1-20) y la segunda fase presentó baja densidad (55 peces/m³) y alta temperatura (semanas 21-40). Las minúsculas indican diferencias entre los tratamientos y las letras mayúsculas indican diferencias entre semanas. Los valores de la misma fila con superíndices diferentes son significativamente diferentes ($p < 0.05$). Tratamientos: Q= quimioautotrófico, H= heterotrófico, fotoautotróficos: M=*Chlorella* spp., CV=*C. sorokiniana*-2714 y CS=*C. sorokiniana*-2805.

7.2.3 Caracterización de los residuos en TBF

Los sólidos sedimentados determinados con conos Imhoff presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) durante las primeras semanas de la fase de maternidad. Los tratamientos H y Q mostraron los valores más altos después de la semana 8 hasta la semana 15 (Fig. 32 a, b). Los sólidos disueltos totales mostraron mayor nivel en los tratamientos Q y H en la fase de maternidad, de la semana 15-23 no presentaron diferencias significativas. En la fase de engorda los tratamientos fotoautotróficos obtuvieron los mayores valores (Fig. 33).

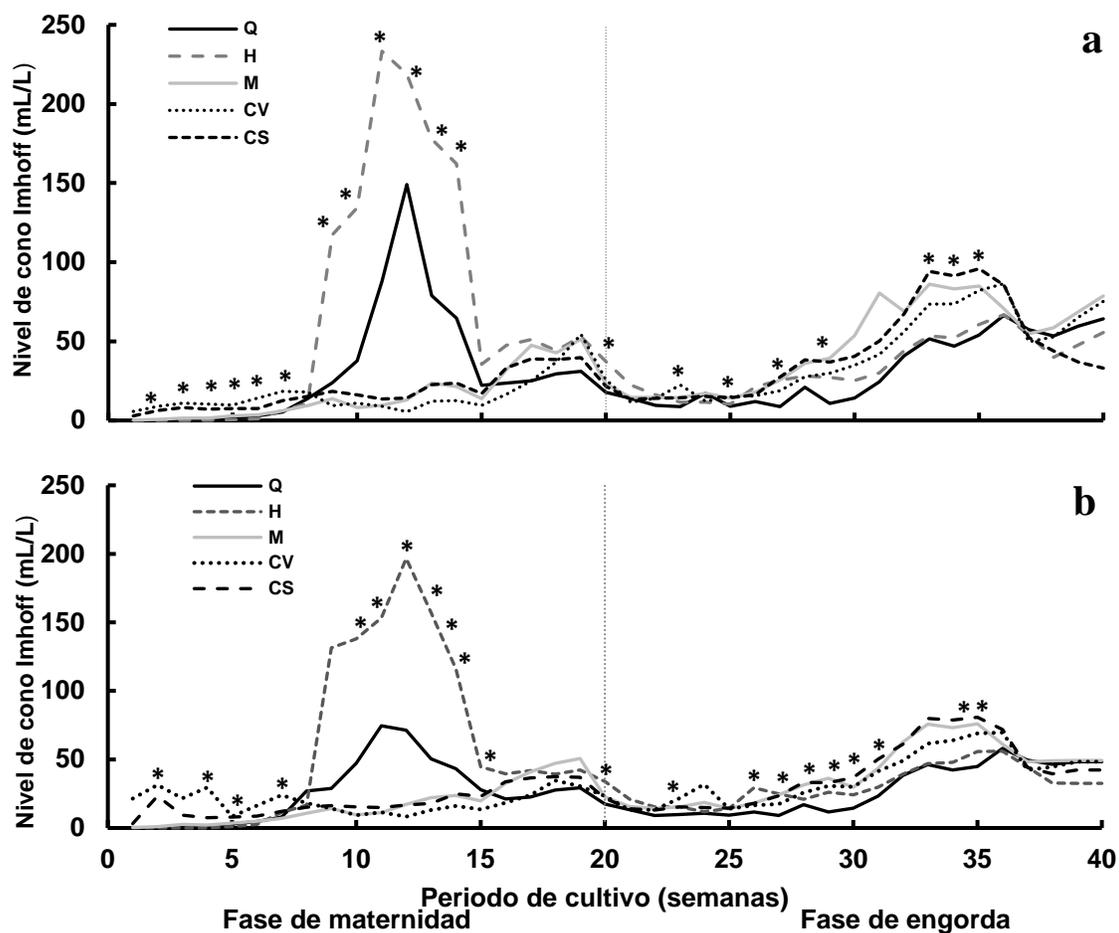


Figura 32. Sólidos sedimentables durante la fase experimental determinados con conos Imhoff. a) Cantidad de sólidos sedimentables en el minuto 15; b) Cantidad de sólidos sedimentables en el minuto 30. Los asteriscos indican diferencias significativas ($p < 0.05$). La línea gris vertical en el centro separa los datos en dos fases: maternidad (1 -20 semanas) y engorda (21- 40 semanas), durante el cultivo de tilapia. Tratamientos: Q= quimioautotrófico, H= heterotrófico, fotoautotróficos: M=*Chlorella* spp., CV=*C. sorokiniana*-2714 y CS=*C. sorokiniana*-2805.

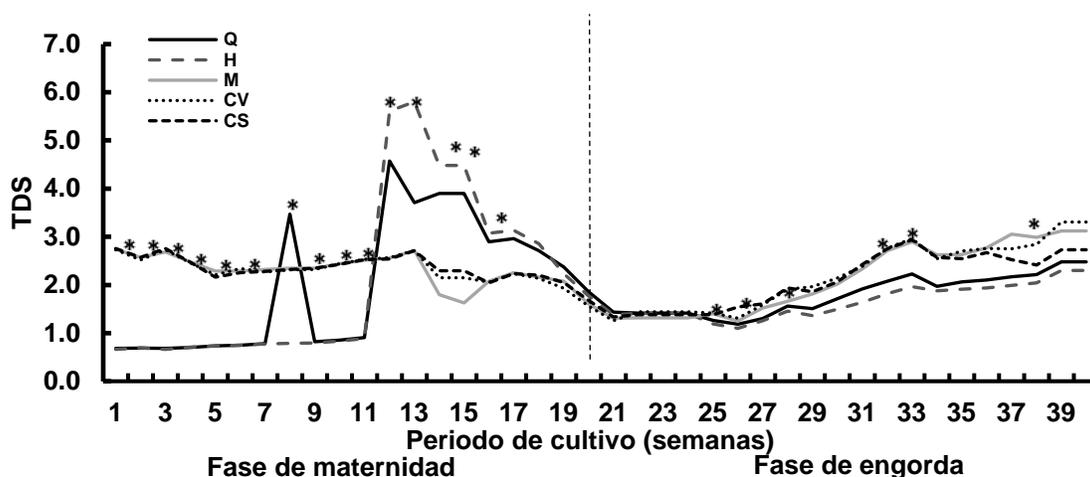


Figura 33. Sólidos Disueltos Totales (TDS) durante la maternidad (1 -20 semanas) y engorda (21- 40 semanas) en el cultivo de *O. niloticus*. El asterisco indica diferencias significativas ($p < 0.05$). La línea gris vertical en el centro separa los datos en dos fases: maternidad (1 -20 semanas) y engorda (21- 40 semanas), durante el cultivo de tilapia. Tratamientos: Q= quimioautotrófico, H= heterotrófico de H, fotoautotróficos: M= *Chlorella* spp., CV= *C. sorokiniana*-2714 y CS= *C. sorokiniana*-2805.

El tamaño estimado de partículas se muestra en la Figura 34 a-d. Al inicio de la maternidad (semana 10), los sólidos súper coloidales y sedimentables (20-150 μ m) fueron los más abundantes en tratamientos fotoautotróficos. En los tratamientos, H y Q el >60% de las partículas eran sólidos sedimentables (>150-500 μ m), con diferencias significativas entre los rangos de tamaño ($p < 0.05$). Los sólidos súper coloidales (20-150 μ m) (67.1–73.5%), se encontraron a partir de la semana 20 en todos los tratamientos. Durante la fase de engorda, los tamaños de las partículas fueron similares (20-150 μ m) entre tratamientos. No hubo diferencias significativas ($p > 0.05$) (Fig. 34c, d).

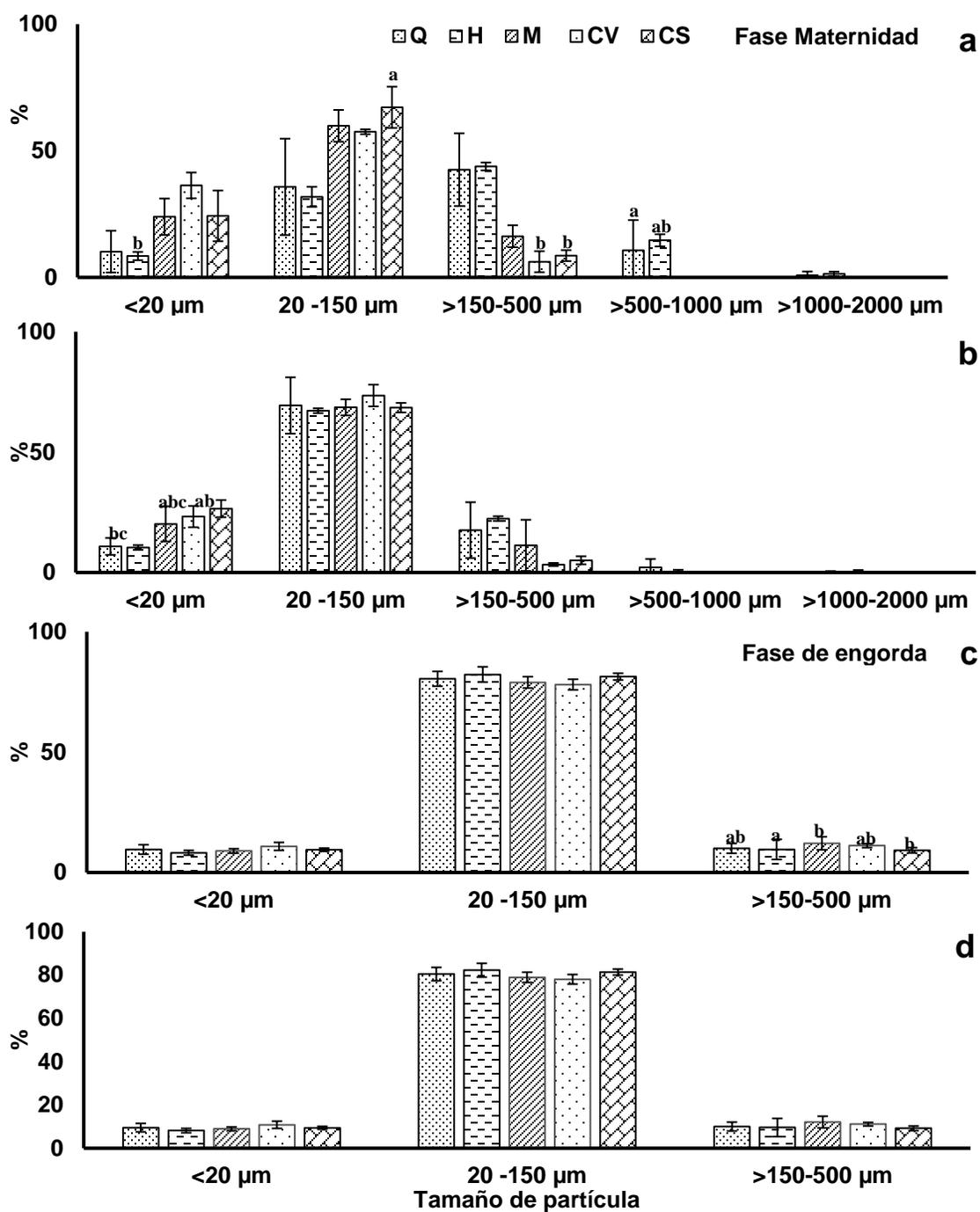


Figura 34. Tamaño de las partículas de TBF en todos los tratamientos durante el período experimental (40 semanas). a) Datos obtenidos en la semana 10; b) 20; c) 30; d) 40. Nota: Cada valor representado en la media de SD. Valores en la misma fila con diferentes superíndices son significativamente diferentes ($p < 0.05$). Tratamientos: Q= quimioautotrófico, H= heterotrófico de H, fotoautotróficos: M= *Chlorella* spp., CV=*C. sorokiniana*-2714 y CS= *C. sorokiniana*-2805.

7.2.4 Composición de nutrientes *O. niloticus* y floc

Para el cuerpo completo de *O. niloticus* el nivel de proteína no presentó diferencias significativas entre los tratamientos ($p > 0.05$), sólo los tratamientos fotoautotróficos presentaron variación entre semanas, el nivel inferior se obtuvo en la semana 40. Para los lípidos y la fibra, los tratamientos no presentaron diferencias significativas ($p > 0.05$), la cantidad de lípidos sólo presentó variación en los tratamientos CV y la fibra sólo en M (Tabla XIX).

Tabla XIX. Análisis de cuerpo completo de *Oreochromis niloticus* durante la semana 10 – 40, comparación entre los diferentes tratamientos.

Análisis Proximales	T ¹	Q	H	M	CV	CS
Humedad (%)	10	72.6±2.9 ^A	70.6±2 ^{AB}	62.3±2.3 ^B	64.6±5.6 ^{AB}	64.1±5.4 ^B
	20	72.0±0.4 ^{Aa}	71.1±0.2 ^{ABa}	64.9±0.9 ^{ABb}	63.1±0.9 ^{Bb}	64.8±0.9 ^{Bb}
	30	70.3±1.8 ^{ABab}	73.3±0.3 ^{Aa}	67.4±0.9 ^{Ab}	69±0.2 ^{Aab}	70.6±3.5 ^{Aab}
	40	67±1.4 ^{Bab}	68.2±0.4 ^{Ba}	66.7±1.8 ^{Bab}	64.8±0.9 ^{ABb}	66.1±0.7 ^{ABab}
Proteína (%)	10	56±1.6 ^A	53.68±0.7 ^A	52.4±1.3 ^{AB}	52.2±0.06 ^{AB}	52.2±0.6 ^A
	20	55.1±0.4 ^A	54.3±0.6 ^A	53.2±1.0 ^{AB}	53±1.0 ^{AB}	53.4±0.4 ^A
	30	55.4±1.7 ^A	54.2±2.0 ^A	56.5±2.6 ^A	56.9±2.5 ^A	54.3±3.9 ^A
	40	51.8±3.2 ^A	52.9±3.1 ^A	50.9±0.3 ^B	51.5±4.8 ^B	51.8±3.2 ^A
Lípidos (%)	10	26.3±1.3 ^A	27.2±2.6 ^A	29.8±0.4 ^A	29.8±1 ^A	28.9±1.8 ^A
	20	26.4±0.4 ^A	26.4±0.9 ^A	27.2±0.4 ^A	27.3±1.3 ^{AB}	26.6±0.45 ^A
	30	25±1.1 ^A	23.1±4.9 ^A	26.3±1.4 ^A	23.5±0.2 ^B	25.5±4.7 ^A
	40	27.2±1.8 ^A	26.9±3.2 ^A	26.1±2.3 ^A	29.7±5.8 ^A	28.6±5.5 ^A
Fibra (%)	10	0.3±0.2 ^A	0.2±0.2 ^A	0.3±0.2 ^A	0.3±0.1 ^A	0.3±0.02 ^A
	20	0.4±0.1 ^A	0.3±0.3 ^A	0.2±0.1 ^{AB}	0.3±0.1 ^A	0.2±0.03 ^A
	30	0.1±0.03 ^A	0.1±0.01 ^A	0.2±0.02 ^A	0.2±0.05 ^A	0.2±0.07 ^A
	40	0.2±0.02 ^A	0.2±0.03 ^A	0.2±0.8 ^B	0.3±0.2 ^A	0.2±0.06 ^A
Ceniza (%)	10	12.7±0.5 ^{AB}	11.61±0.9 ^A	10.6±1.1 ^A	11.6±1.4 ^A	11.19±0.8 ^A
	20	12.1±0.2 ^A	10.9±0.6 ^A	10.9±1.2 ^A	10.7±0.3 ^A	10.4±0.7 ^A
	30	11.4±0.8 ^B	12.7±1.0 ^A	8.8±1.8 ^A	10±3.0 ^A	9.4±1.2 ^A
	40	12.2±3.3 ^{AB}	13.2±1.8 ^A	14.5±2.1 ^A	11±3.0 ^A	12.4±1.8 ^A

Notas: ¹ T= Tiempo en semanas. Diferentes letras en la misma fila indican diferencias significativas, minúsculas indica diferente entre los tratamientos, las letras mayúsculas indican diferencias entre semanas. Tratamientos: Q= quimioautotrófico, H= heterotrófico, fotoautotróficos: M= *Chlorella* spp., CV= *C. sorokiniana*-2714, CS= *C. sorokiniana*-2805.

Los aminoácidos en el cuerpo de *O. niloticus* no mostraron diferencia entre los tratamientos, sólo isoleucina y valina para los aminoácidos esenciales y, aspartato en aminoácidos no esenciales. Triptófano, asparagina y glutamina no se detectaron durante todo el experimento (Tabla XX).

Tabla XX. Análisis de aminoácidos en cuerpo entero de *Oreochromis niloticus* cada diez semanas durante el período del experimento, implementando diferentes tratamientos.

Aminoácido (g/100 g)	T	Q	H	M	CV	CS
Aminoácidos esenciales AA						
Arginina	10	2.2±0.3	2.3±0.3 ^B	2.6±0.2	2.1±0.2	2.7±0.3
	20	2.7±0.5	3.4±0.4 ^A	3.0±0.5	2.7±0.2	3.1±0.2
	30	2.8±0.2	2.6±0.9 ^{AB}	2.7±0.1	2.4±0.1	2.8±0.5
	40	2.2±0.3	2.3±0.3 ^{AB}	2.6±0.2	2.1±0.2	2.7±0.3
Histidina	10	0.6±0.1 ^B	0.7±0.02 ^B	0.8±0.1 ^{AB}	0.7±0.1	0.8±0.1
	20	0.9±0.2 ^A	1.0±0.1 ^A	0.9±0.1 ^A	0.8±0.1	0.9±0.03
	30	nd	nd	nd	nd	nd
	40	0.7±0.1 ^B	0.7±0.02 ^B	0.8±0.1 ^B	0.7±0.1	0.8±0.1
Isoleucina	10	1.1±0.2 ^{Bab}	1.0±0.1 ^{Bab}	1.1±0.1 ^{Bab}	0.9±0.1 ^{Bb}	1.3±0.1 ^{Ba}
	20	1.4±0.3 ^{AB}	1.6±0.1 ^A	1.7±0.3 ^A	1.5±0.2 ^A	0.6±0.2 ^{AB}
	30	1.5±0.2 ^{AB}	1.3±0.3 ^{AB}	1.5±0.1 ^{AB}	1.2±0.1 ^{AB}	1.4±0.3 ^{AB}
	40	1.1±0.2 ^A	1.0±0.1 ^{AB}	1.1±0.1 ^A	0.9±0.1 ^A	1.3±0.1 ^A
Leucina	10	2.6±0.3	2.6±0.2	3.0±0.2	2.5±0.5	3.3±0.1
	20	3.3±0.8	3.3±0.3	3.4±0.5	3.0±0.2	3.3±0.3
	30	3.5±0.1	3.2±1.0	3.3±0.3	3.3±0.1	3.3±0.8
	40	2.6±0.3	2.6±0.2	3.0±0.2	2.5±0.5	3.3±0.1
Lisina	10	2.5±0.3 ^A	2.6±0.3	2.2±0.1 ^{AB}	2.5±0.4 ^A	3.2±0.3 ^A
	20	3.8±0.7 ^A	3.3±0.4	3.7±0.5 ^A	3.3±0.2 ^A	3.6±0.3 ^A
	30	0.5±0.2 ^B	1.8±2.2	1.5±1.7 ^B	0.7±0.1 ^B	0.7±0.3 ^B
	40	2.5±0.3 ^A	2.6±0.3	2.2±0.1 ^A	2.5±0.4 ^A	3.2±0.3 ^A
Metionina	10	0.6±0.1	0.7±0.1 ^{AB}	0.6±0.2	0.6±0.1	0.6±0.1
	20	0.8±0.2	1.1±0.6 ^A	0.7±0.1	0.6±0.1	0.8±0.03
	30	0.5±0.1	0.6±0.4 ^B	0.5±0.2	0.5±0.1	0.5±0.2
	40	0.6±0.1	0.7±0.1 ^{AB}	0.6±0.2	0.6±0.1	0.6±0.1
Fenilalanina	10	1.6±0.2	1.6±0.1	1.8±0.2	1.6±0.3	1.9±0.1
	20	1.9±0.4	2.1±0.2	1.9±0.3	1.7±0.1	1.9±0.1
	30	1.7±0.1	1.8±0.6	1.7±0.1	1.6±0.1	1.7±0.3
	40	1.6±0.2	1.6±0.1	1.8±0.2	1.6±0.3	1.9±0.1
Treonina	10	1.7±0.2	1.7±0.2	1.7±0.6	1.6±0.2	2.1±0.1
	20	1.9±0.4	2.2±0.3	1.8±0.4	2±0.04	0.9±1.3
	30	2.1±0.1	2.1±0.7	2.1±0.2	2.0±0.1	2.1±0.4
	40	1.7±0.2	1.7±0.2	1.7±0.6	1.6±0.2	2.1±0.1
Triptófano	10	nd	nd	nd	nd	nd
	20	nd	nd	nd	nd	nd
	30	nd	nd	nd	nd	nd
	40	0.2±0.05	0.1±0.04	nd	nd	0.3±0.04
Valina	10	1.2±0.2 ^{Bab}	1.2±0.2 ^{Bab}	1.3±0.05 ^{Bab}	1.0±0.1 ^{Bb}	1.5±0.2 ^{Ba}
	20	1.9±0.2 ^A	2.0±0.2 ^A	2.1±0.4 ^A	1.9±0.3 ^A	1.9±0.2 ^{AB}
	30	1.9±0.2 ^{Aab}	1.7±0.4 ^{ABab}	1.8±0.1 ^{ABab}	1.6±0.1 ^{ABab}	1.7±0.4 ^{ABa}
	40	1.2±0.2 ^{ABab}	1.2±0.2 ^{ABab}	1.3±0.05 ^{ABab}	1.0±0.1 ^{Ab}	1.5±0.2 ^{Aa}
Aminoácidos No esenciales						
Alanina	10	2.7±0.2	2.8±0.3	3.1±0.4	2.7±0.5	3.1±0.1
	20	3.2±0.4	3.2±0.4	3.3±0.5	3.0±0.2	3.4±0.2
	30	3.5±0.1	3.2±0.9	3.1±0.1	3.1±0.2	3.3±0.6
	40	2.7±0.2	2.8±0.3	3.1±0.4	2.7±0.5	3.1±0.1

Asparagina	10	nd	nd	nd	nd	nd
	20	nd	nd	nd	nd	nd
	30	nd	nd	nd	nd	nd
	40	nd	nd	nd	nd	nd
Aspartato	10	3.8±0.3 ^{ab}	4±0.2 ^{ab}	4.4±0.5 ^a	3.0±0.8 ^{Bb}	4.6±0.1 ^a
	20	4.7±0.9	4.7±0.1	4.7±0.7	4.1±0.2 ^{AB}	4.7±0.3
	30	4.9±0.2 ^{ab}	4.6±1.4 ^{ab}	4.6±0.5 ^a	4.8±0.3 ^{Ab}	4.8±1.0 ^a
	40	3.8±0.3 ^{ab}	4.0±0.2 ^{ab}	4.4±0.5 ^a	3.0±0.8 ^{Ab}	4.6±0.1 ^a
Glutamato	10	5.5±0.5	5.7±0.4	6.3±0.7	5.5±1.1	6.6±0.2
	20	6.9±1.3	6.9±0.1	6.8±1.0	6.1±0.2	6.9±0.5
	30	7.5±0.1	6.9±2.0	6.9±0.6	7.1±0.3	7.2±1.6
	40	5.5±0.5	5.7±0.4	6.3±0.7	5.5±1.1	6.6±0.2
Glicina	10	3.3±0.2	3.4±0.5	3.5±0.5	3.1±0.4	3.5±0.3
	20	3.4±0.03	4.0±0.3	4.1±0.8	3.7±0.3	4.2±0.2
	30	4.7±0.5	4.0±0.6	3.9±0.3	3.8±0.2	4.3±0.3
	40	3.3±0.2	3.4±0.5	3.5±0.5	3.1±0.4	3.5±0.3
Serina	10	1.9±0.2	2.0±0.1	2.2±0.2	1.9±0.3	2.2±0.1
	20	2.1±0.3	2.3±0.1	2.1±0.3	1.9±0.05	2.1±0.1
	30	2.1±0.04	2.0±0.6	1.9±0.2	2.0±0.1	2.0±0.3
	40	1.9±0.2	2±0.1	2.2±0.2	1.9±0.3	2.2±0.1
Condicionalmente esenciales						
Tirosina	10	1.2±0.1	1.3±0.1 ^B	1.3±0.2	1.1±0.2	1.4±0.1
	20	1.5±0.3	1.9±0.5 ^A	1.5±0.2	1.3±0.1	1.5±0.1
	30	1.4±0.1	1.3±0.4 ^A	1.4±0.04	1.3±0.1	1.3±0.3
	40	1.2±0.1	1.3±0.1 ^A	1.3±0.2	1.1±0.2	1.4±0.1
Cisteina	10	nd	nd	0.1±0.01	0.1±0.01 ^b	nd
	20	0.2±0.04	0.3±0.2	0.2±0.03 ^{Ba}	0.2±0.02	0.2±0.02
	30	nd	nd	nd	nd	nd
	40	nd	0.1±0.04 ^B	nd	nd	0.1±0.03 ^B
Glutamina	10	nd	nd	nd	nd	nd
	20	nd	nd	nd	nd	nd
	30	nd	nd	nd	nd	nd
	40	nd	nd	nd	nd	nd
Hidroxi prolina	10	0.5±0.02 ^C	0.5±0.2	0.5±0.1 ^B	0.4±0.1	0.6±0.2 ^B
	20	0.7±0.1 ^{BC}	0.8±0.2	0.9±0.2 ^A	0.8±0.2	0.9±0.03 ^{AB}
	30	1.2±0.2 ^A	0.9±0.03	0.9±0.2 ^{AB}	0.9±0.1	1.2±0.4 ^A
	40	0.5±0.02 ^{AB}	0.5±0.2	0.5±0.1 ^{AB}	0.4±0.1	0.6±0.2 ^A
Prolina	10	2.2±0.3 ^B	2.1±0.4	2.1±0.2	2.0±0.2	2.4±0.4
	20	2.4±0.1 ^{AB}	2.5±0.05	2.6±0.6	2.3±0.2	2.7±0.1
	30	3.0±0.03 ^A	2.7±0.4	2.8±0.5	2.6±0.4	2.6±0.2
	40	2.2±0.3 ^{AB}	2.1±0.4	2.1±0.2	2.0±0.2	2.4±0.4
Taurina	10	0.7±0.02 ^A	0.7±0.1 ^A	0.8±0.1 ^A	0.6±0.1	0.7±0.1
	20	0.7±0.2 ^{AB}	0.7±0.1 ^C	0.7±0.1 ^{AB}	0.6±0.1	0.7±0.1
	30	0.6±0.1 ^{AB}	0.4±0.1 ^B	0.5±0.04 ^B	0.5±0.03	0.5±0.1
	40	0.7±0.02 ^B	0.7±0.1 ^{BC}	0.8±0.1 ^B	0.6±0.1	0.7±0.1

Notas: Diferentes letras en la misma fila indican una diferencia significativa; minúsculas indican diferencia entre tratamientos, las letras mayúsculas indican diferencias entre semanas, nd= no detectado. Tratamientos: Q= quimioautotrófico, H=heterotrófico, fotoautotróficos: M=*Chlorella* spp., CV=*C. sorokiniana*-2714 y CS=*C. sorokiniana*-2805.

Tabla XXI. Macro elementos (N, Ca, K, Mg, Na, Si, P, S) y micro elementos (B, Fe, Mn, Mo, Ni, Se, Zn) recuperados en el cuerpo completo de *Oreocromis niloticus* en cinco tratamientos diferentes, cada diez semanas, durante todo el experimento.

Macro elementos (g/L)	Semana	N	P	K	Ca	Mg	S	Si	Na
Q	10	70.8±4.5	22.8±1.9	7.3±1.0	32.1±3.3	1.4±0.1	2.2±0.1	0.03±0.004	4.9±0.7
	20	69.9±3.7	18.2±1.4	4.1±0.7	27.8±1.2	1.1±0.04	1.9±0.1	0.01±0.001	2.5±0.6
	30	72.2±12.0	20.2±3.2	4.7±0.6	34.3±6.3	1.2±0.1	1.9±0.1	0.01±0.005	3.5±0.3
	40	65.8±8.1	17.5±3.9	4.6±0.3	24.2±7.2	1.1±0.2	1.7±0.1	0.03±0.005	2.8±0.4
H	10	69.8±8.2	20.1±0.9	8.0±2.7	29.2±1.8	1.3±0.1	1.9±0.2	0.05±0.05	6.0±2.4
	20	72.0±2.0	19.5±1.5	4.3±0.4	31.3±2.6	1.2±0.04	2.0±0.1	0.01±0.004	3.0±0.3
	30	80.6±7.2	22.9±5.7	4.5±0.4	40.9±12	1.2±0.3	1.8±0.1	0.01±0.004	3.3±0.3
	40	76.7±8.4	16.3±1.1	5.1±0.4	22.0±3.0	1.0±0.1	1.6±0.2	0.03±0.002	3.2±0.2
M	10	73.2±0.7	20.9±1.3	6.1±1.7	30.7±1.1	1.3±0.1	2.2±0.2	0.02±0.004	4.1±1.2
	20	72.7±0.7	17.3±0.2	4.0±0.7	27.4±1.0	1.0±0.05	1.9±0.1	0.01±0.002	2.7±0.4
	30	76.3±3.6	23.3±5.6	4.3±0.6	41.1±12.9	1.3±0.3	1.8±0.1	0.01±0.002	3.2±0.3
	40	65.5±11.4	24.1±6.3	4.6±0.5	36.5±10.9	1.4±0.3	1.5±0.2	0.04±0.004	3.2±0.2
CV	10	70.4±5.5	21.8±1.4	8.2±1.9	30.0±3.7	1.3±0.1 ^b	2.0±0.2	0.03±0.01	5.6±1.5
	20	75.1±3.3	18.4±1.4	3.3±0.1	31.6±3.8	1.1±0.1	1.8±0.1	0.01±0.003	2.1±0.2
	30	65.5±2.4	19.4±1.7	4.4±0.5	33.3±4.0	1.1±0.1	1.8±0.1	0.01±0.003	3.4±0.8
	40	66.5±3.9	17.1±0.9	4.5±0.4	24.6±1.5	1.1±0.1	1.5±0.1	0.03±0.002	2.7±0.2
CS	10	73.5±6.5	20.5±1.1	6.5±1.1	29.7±1.5	1.3±0.004	2.1±0.03	0.02±0.001	4.3±1.1
	20	71.9±3.3	19.1±1.1	4.4±1.0	31.1±3.6	1.1±0.1	1.9±0.1	0.01±0.003	2.9±0.7
	30	74.8±8.9	20.1±1.8	4.8±0.6	33.5±4.1	1.2±0.2	1.8±0.1	0.01±0.003	3.4±0.2
	40	71.2±8.8	17.1±1.7	4.4±0.1	24.7±1.8	1.1±0.1	1.5±0.1	0.03±0.004	2.8±0.2
Microelementos (mg/L)		B	Fe	Mn	Mo	Ni	Se	Zn	
Q	10	23.8±0.8	171.6±16.3	10.1±4.0 ^a	nd	1.5±1.0	12.0±11.0	80.2±3.9	
	20	19.0±0.5	117.2±34.2	3.6±0.5 ^b	0.4±0.6	0.8±1.4	30.9±3.5	56.0±3.5	

	30	21.2±0.4	110.1±22.0	3.9±0.6 ^a	1.1±1.9	6.1±7.3	23.2±5.2	56.6±7.6
	40	105.7±6.8	86.3±12.1	2.6±0.6 ^b	1.3±1.0	2.3±0.5	10.2±5.8	43.6±7.7
H	10	36.9±31.8	260.4±150.8	7.7±0.5 ^{ab}	7.2±7.7	6.2±7.7	4.9±2.7	72.3±5.0
	20	21.4±1.6	124.3±17.1	5.2±0.2 ^a	nd	2.2±1.0	25.0±5.5	58.5±4.4
	30	20.8±0.8	115.6±23.6	4.2±0.1 ^a	nd	2.7±1.6	23.5±13.1	61.5±0.4
	40	105.9±0.7	85.4±13.6	2.5±1.0 ^a	nd	1.1±0.6	6.3±1.6	41.7±13.3
M	10	21.1±3.6	136.8±11.3	5.7±0.1 ^{ab}	3.3±2.2	2.2±0.3	6.1±1.0	76.4±12.8
	20	19.7±0.9	147.9±50.5	3.3±0.4 ^b	nd	1.3±2.2	22.3±14.5	52.7±6.5
	30	22.9±1.3	134.0±53.4	2.4±0.4 ^b	nd	3.3±2.4	28.1±6.7	47.8±9.0
	40	109.5±3.6	87.1±12.4	3.0±0.2 ^b	nd	1.7±0.2	8.7±6.0	37.1±3.1
CV	10	21.7±0.9	180.5±24.9	4.8±1.1 ^b	2.1±0.3	2.0±0.7	12.5±8.8	68.2±3.0
	20	18.9±1.4	142.4±39.7	3.4±0.3 ^b	2.7±4.8	1.4±1.1	18.1±2.2	59.3±2.1
	30	20.9±1.7	98.7±12.8	2.9±0.2 ^{ab}	1.1±1.5	4.7±1.4	35.7±2.8	42.7±1.4
	40	109.9±3.7	87.9±12.1	2.5±0.3 ^b	nd	2.4±1.4	6.4±5.7	40.3±5.8
CS	20	21.3±0.5	119.7±21.0	3.2±0.3 ^{ab}	nd	1.9±0.7	24.5±9.4	58.4±6.0
	10	22.1±6.3	192.6±39.0	6.5±0.7 ^b	nd	1.7±0.3	10.1±7.1	80.5±6.5
	30	20.5±1.6	119.6±34.4	3.3±1.0 ^{ab}	2.2±3.8	6.6±4.0	19.9±1.9	47.2±11.3
	40	104.4±4.0	92.2±24.3	2.1±0.4 ^b	1.7±1.7	2.5±0.2	8.9±4.7	35.7±6.0

Notas: Diferentes letras en la misma fila indican una diferencia significativa; minúsculas indican diferente entre los tratamientos, las letras mayúsculas indican la diferencia entre semanas. Tratamientos: Q= quimioautotrófico, H=heterotrófico, fotoautotróficos: M=*Chlorella* spp., CV=*C. sorokiniana*-2714 y CS=*C. sorokiniana*-2805

El contenido elemental en el cuerpo completo de *O. niloticus* no presentó diferencia entre los tratamientos, sólo para Mn donde Q obtuvo el nivel más alto para la semana 10, H para la semana 20, Q y H para la semana 30 y H para la semana 40 (Tabla XXI). Para los análisis del floc, el nivel más alto de humedad fue en M en la semana 10, con diferencia significativa ($p < 0.05$, Tabla XXII), para la semana 30 no presentaron diferencias significativas ($p > 0.05$). Los tratamientos Q y M presentaron los principales niveles de proteína y Q, M, CS de lípidos en la semana 10 ($p < 0.05$, Tabla XXII). CS y M obtuvieron el nivel más alto de fibra en la semana 10 y H el nivel más bajo de proteína y fibra, así también el nivel más alto de ceniza en la semana 10 ($p < 0.05$, Tabla XXII). Todos los valores de los análisis proximales disminuyeron con el tiempo y no presentaron diferencia significativa entre tratamientos en la semana 30 ($p > 0.05$, Tabla XXII).

Tabla XXII. Análisis proximales de biofloc en los cinco tratamientos durante las semanas 10 y 30.

Análisis proximales (%)	T	Q	H	M	CV	CS
Humedad	10	4.0±0.01 ^{Be}	5.4±0.02 ^{Bb}	6.1±0.02 ^{Ba}	4.9±0.02 ^{Bc}	4.6±0.03 ^{Bd}
	30	8.4±0.5 ^A	9.1±0.7 ^A	8.6±0.6 ^A	8.7±1.0 ^A	9.0±1.2 ^A
Proteína cruda	10	42.6±0.2 ^{Aa}	34.7±0.2 ^{Ad}	39.3±0.4 ^{Ab}	38.2±0.01 ^{Ac}	37.7±0.2 ^{Ac}
	30	26.7±0.7 ^B	26.4±1.3 ^B	24±3.4 ^B	27.6±5.8 ^B	25.3±5.1 ^B
Lípido crudo	10	1.1±0.01 ^{Aa}	0.5±0.03 ^{Ac}	0.7±0.01 ^{Ab}	0.7±0.01 ^{Ab}	0.4±0.01 ^{Ad}
	30	0.1±0.04 ^B	0.1±0.06 ^B	0.1±0.02 ^B	0.11±0.06 ^B	0.1±0.01 ^B
Fibra cruda	10	2.3±0.1 ^{Bc}	2.0±0.03 ^{Bd}	3.3±0.03 ^{Bb}	4.9±0.0 ^{Ba}	2.4±0.0 ^{Bc}
	30	11.0±2.0 ^A	11.9±0.8 ^A	13.1±1.5 ^A	10.4±2.4 ^A	12.5±1.0 ^A
Ceniza	10	17.8±0.2 ^{Bd}	26.7±0.3 ^{Aa}	24.9±0.02 ^{Abc}	23.9±0.3 ^{Bc}	25.2±0.7 ^{Ab}
	30	19.6±0.8 ^A	22.1±2.4 ^B	20.2±2.5 ^B	21.1±2.5 ^A	21.3±2.6 ^B

Notas: Diferentes letras en la misma fila indican una diferencia significativa; minúsculas indican diferente entre el tratamiento, las letras mayúsculas indican la diferencia entre semanas. Tratamientos: Q= quimioautotrófico, H=heterotrófico, fotoautotróficos: M=*Chlorella* spp., CV=*C. sorokiniana*-2714 y CS=*C. sorokiniana*-2805.

El mayor contenido de aminoácidos en floc, fue obtenido en la fase de maternidad. El contenido más alto de isoleucina, lisina y valina se encontró en M, Q, CS, para tirosina el valor más alto se obtuvo en M, Q, CV y CS. En la fase de engorda, el nivel más alto de histidina se obtuvo en M, Q, H y CV. Los otros aminoácidos no presentaron diferencias significativas ($p > 0.05$, Tabla XXIII).

Tabla XXIII. Análisis de aminoácidos en biofloc (esenciales, no esenciales, condicionalmente esenciales) en los cinco tratamientos durante las semanas 10 y 30.

Aminoácido (g/100 g)	T	Q	H	M	CV	CS
Esenciales AA						
Arginina	10	1.2±0.3 ^A	e	1.2±0.3 ^A	1.0±0.1 ^A	1.2±0.1
	30	0.7±0.1 ^B	0.9±0.3	0.8±0.1 ^B	0.6±0.03 ^B	0.9±0.05 ^B
Histidina	10	0.5±0.1 ^A	e	0.6±0.2 ^A	0.5±0.02 ^A	0.5±0.1 ^A
	30	0.3±0.03 ^{Bab}	0.3±0.08 ^a	0.4±0.03 ^{Bab}	0.2±0.01 ^{Bab}	0.3±0.01 ^{Bb}
Isoleucina	10	0.8±0.1 ^{Aab}	e	1.0±0.1 ^{Aa}	0.7±0.1 ^{Ab}	0.8±0.03 ^{Aab}
	30	0.5±0.1 ^B	0.6±0.4	0.5±0.03 ^B	0.4±0.1 ^B	0.5±0.1 ^B
Leucina	10	1.8±0.3 ^A	e	2.3±0.3 ^A	1.7±0.1 ^A	2.0±0.1 ^A
	30	1.1±0.1 ^B	1.4±0.4	1.2±0.1 ^B	1.0±0.1 ^B	1.4±0.1 ^B
Lisina	10	1.2±0.2 ^{Aab}	e	1.6±0.2 ^{Aa}	1.1±0.1 ^{Ab}	1.3±0.1 ^{Aab}
	30	0.7±0.1 ^B	0.9±0.3	0.8±0.1 ^B	0.6±0.03 ^B	0.9±0.04 ^B
Metionina	10	0.4±0.1 ^A	e	0.4±0.1 ^A	0.3±0.02 ^A	0.4±0.02 ^A
	30	0.2±0.1 ^B	0.3±0.1	0.3±0.03 ^B	0.2±0.03 ^B	0.3±0.01 ^B
Fenilalanina	10	1.1±0.2 ^A	e	1.4±0.2 ^A	1.1±0.1 ^A	1.3±0.1 ^A
	30	0.7±0.1 ^B	0.7±0.2	0.8±0.1 ^B	0.6±0.04 ^B	0.8±0.05 ^B
Treonina	10	1.3±0.2 ^A	e	1.4±0.3 ^A	1.1±0.1 ^A	1.3±0.05 ^A
	30	0.8±0.1 ^B	1.0±0.4	0.9±0.1 ^B	0.8±0.04 ^B	1.0±0.05 ^B
Triptófano	10	nd	nd	nd	nd	nd
	30	nd	nd	nd	nd	nd
Valina	10	1.1±0.1 ^{Aab}	e	1.4±0.1 ^{Aa}	1.1±0.1 ^{Ab}	1.1±0.1 ^{Aab}
	30	0.7±0.1 ^B	0.9±0.4	0.7±0.1 ^B	0.6±0.04 ^B	0.8±0.1 ^B
No esenciales AA						
Alanina	10	2.0±0.3 ^A	e	2.4±0.3 ^A	1.9±0.1 ^A	2.0±0.1 ^A
	30	1.1±0.2 ^B	1.5±0.7	1.3±0.2 ^B	1.0±0.05 ^B	1.5±0.04 ^B
Asparagina	10	nd	nd	nd	nd	nd
	30	nd	nd	nd	nd	nd
Aspartato	10	2.2±0.7 ^A	e	2.6±0.1 ^A	2.7±0.2 ^A	2.9±0.1 ^A
	30	1.5±0.2 ^B	1.9±0.7	1.7±0.2 ^B	1.4±0.1 ^B	2.0±0.1 ^B
Glutamato	10	3.0±0.5 ^A	e	3.5±0.6 ^A	2.8±0.2 ^A	3.0±0.2 ^A
	30	1.7±0.3 ^B	2.2±0.9	1.8±0.2 ^B	1.5±0.1 ^B	2.1±0.1 ^B
Glicina	10	2.0±0.4 ^A	e	2.1±0.3 ^A	1.7±0.1 ^A	1.7±0.05 ^A
	30	1.0±0.1 ^B	1.2±0.4	1.1±0.1 ^B	1.0±0.1 ^B	1.3±0.03 ^B
Serina	10	1.3±0.2 ^A	e	1.5±0.4 ^A	1.2±0.2 ^A	1.4±0.1 ^A
	30	0.8±0.1 ^B	1.0±0.3	0.9±0.1 ^B	0.8±0.04 ^B	1.0±0.05 ^B
Tirosina	10	1.0±0.04 ^{Aab}	e	1.1±0.05 ^{Aa}	0.8±0.2 ^{Ab}	0.9±0.1 ^{ab}
	30	0.6±0.1 ^B	0.8±0.3	0.6±0.1 ^B	0.6±0.02 ^B	0.8±0.1
Condicionalmente esenciales AA						
Cisteina	10	0.3±0.1 ^A	e	0.3±0.1 ^A	0.3±0.003 ^A	0.3±0.04 ^A
	30	0.2±0.01 ^B	0.2±0.03	0.2±0.02 ^B	0.2±0.01 ^B	0.2±0.02 ^B
Glutamina	10	nd	nd	nd	nd	nd
	30	nd	nd	nd	nd	nd
Hidroxiprolina	10	0.5±0.1	e	0.4±0.1	0.2±0.1	nd
	30	nd	nd	nd	nd	0.2±0.01
Prolina	10	1.5±0.3 ^A	e	1.7±0.3 ^A	1.3±0.1 ^A	1.4±0.1
	30	0.9±0.1 ^B	1.0±0.3 ^B	1.0±0.1 ^B	0.9±0.1 ^B	1.1±0.003
Taurina	10	0.02±0.003	e	0.04±0.004	0.04±0.03	0.03±0.01
	30	nd	nd	nd	nd	nd

Notas: Diferentes letras en la misma fila indican diferencia significativa, minúsculas indicadas diferente entre los tratamientos, letras mayúsculas indican diferencia entre semanas. Tratamientos: Q= quimioautotrófico, H=heterotrófico, fotoautotróficos: M=*Chlorella* spp., CV=*C. sorokiniana*-2714 y CS=*C. sorokiniana*-2805.

En la semana 10, el nivel más alto de isoleucina, valina y aspartato se encontró en Q, H, M, CS. En la semana 20, los aminoácidos no presentaron diferencias significativas ($p > 0.05$). En la semana 30 y 40, valina y aspartato fueron encontrados en Q, H, M, CS (Tabla XXIII).

La relación lípidos y proteínas en las distintas especies de *Oreochromis* indico que los híbridos *O. niloticus* x *O. mossambicus* poseen mejor relación, que los híbridos *O. niloticus* x *O. aureus*. Los resultados encontrados en el presente experimento se encontraron dentro de los valores definidos para *O. niloticus* en otras investigaciones (Fig. 35).

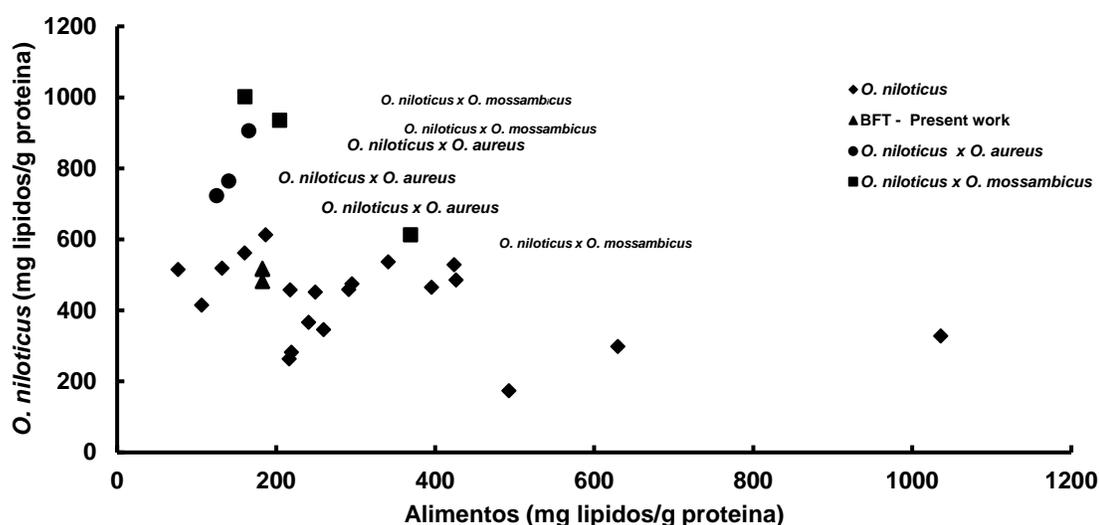


Figura 35. Relación entre lípidos y proteínas entre el cuerpo completo de *Oreochromis* spp. y los alimentos. Círculos= *Oreochromis niloticus* x *O. aureus* (mg lípidos/g proteína) (Lin *et al.*, 1997), cuadros= *O. niloticus* x *O. mossambicus* (mg lípidos/g proteína) (De Silva *et al.*, 1991), rombos= *O. niloticus* (Abdel-Tawwab, 2012; Cavalheiro *et al.*, 2007; Diop *et al.*, 2013; Dongmeza *et al.*, 2006; Ergün *et al.*, 2009; Gaber, 2006; Lara-Flores *et al.*, 1995; Twibell y Brown, 1998; Yangthong *et al.*, 2014), los triángulos representan los datos obtenidos en la presente investigación cultivada bajo condiciones quimiotróficas, heterotróficas y fotoautotróficas en TBF.

La relación de los amino ácidos entre la el cuerpo completo de *O. niloticus* y el alimento indicaron una deficiencia de metionina, treonina, y lisina (Fig. 36a). La relación entre el cuerpo completo y el biofloc indicaron deficiencias en taurina, lisina y arginina (Fig. 36 b).

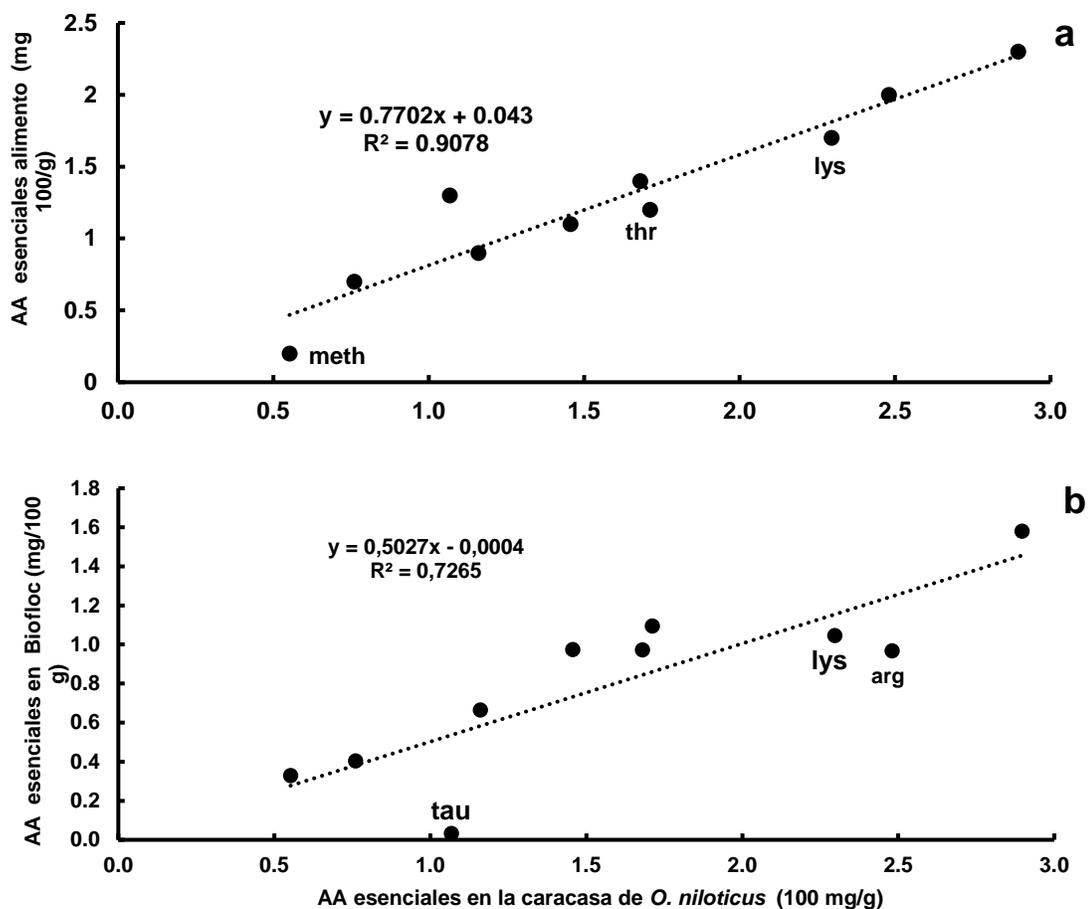


Figura 36. Relación entre los aminoácidos contenidos en la el cuerpo completo de *O. niloticus* y el alimento y los aminoácidos contenidos en biofloc. a) La correlación de los aminoácidos en el cuerpo completo de *O. niloticus* y los aminoácidos en el alimento (100 mg/g), b) la correlación de los aminoácidos en el cuerpo completo de *O. niloticus* y los aminoácidos en biofloc (100 mg/g), meth = metionina, thr = treonina, lys = lisina, tau = taurina, arg = arginina.

EXPERIMENTO III- Mineralización

7.3 Análisis elemental de la fracción particulada en SAR y TBF

Los nutrientes se mantuvieron sin diferencia significativa entre tratamientos durante el experimento ($p > 0.05$), solo K presentó diferencia a los 65 días ($p < 0.05$), obteniendo el valor más alto IDP 1.4. El P, K, B, Fe, Mn, Mo, Zn, Cu, Ni incrementaron durante todo el experimento. El Ca disminuyó conforme avanzaba el experimento en todos los tratamientos (Tabla XXIV).

Q retuvo mayor cantidad de K, Mg, Na, a los 70 días ($p > 0.05$). CS retuvo mayor cantidad de P, K, Ca, Mn y Cu a los 140 días ($p < 0.05$) (Tabla XXV).

7.4 Mineralización aeróbica en SAR

En la mineralización de la fracción líquida (MFL), el N en los tres tratamientos se incrementó en el periodo de 100 días y decreció en el periodo de 120 días, los demás elementos (macro y micro) se acumularon en el tiempo (Tabla XXVI).

La mayor cantidad de P se encontró en la mineralización de la fracción particulada (MFP). El Ca, Mg, K, Na y B fue mayor en la MFL. Los microelementos se encontraron en mayor cantidad en la MFP (Tabla XXVII), en el tratamiento IDP 1.4 se recuperaron la mayor cantidad de N, P y Mn a los 100 días. Se obtuvieron diferencias significativas entre tratamientos ($p > 0.05$). Los demás elementos no presentaron diferencias, en ningún periodo (65, 100 y 120 días).

N, P y K tuvieron un incremento del día 65 al 100, con decremento de N y P del día 100 al 120, K se mantuvo en constante ascenso durante el experimento (Fig. 37).

Tabla XXIV. Análisis elemental de la fracción particulada recuperada en SAR- Experimento I, durante 120 días, en tres niveles de IDP 1.4, 1.2, 1.0.

E	15 días ¹			45 días ¹			65 días ¹			105 días ¹			120 días ¹			
	IDP 1.4	IDP 1.2	IDP 1.0	IDP 1.4	IDP 1.2	IDP 1.0	IDP 1.4	IDP 1.2	IDP 1.0	IDP 1.4	IDP 1.2	IDP 1.0	IDP 1.4	IDP 1.2	IDP 1.0	
Macronutrientes g/L ²	N	3.4±0.1	3.3±0.6	3.2±1.0	7.0±0.4	6.3±0.4	6.0±0.4	5.3±1.7	5.8±1.4	5.7±1.5	4.3±0.4	4.5±0.4	4.1±0.3	4.2±.3	4.2±0.4	4.4±0.5
	P	4.6±1.0	6.7±5.8	3.2±1.7	13.5±1.5	12.7±2.2	11.6±3.2	17.7±4.1	16.2±3.3	18.8±4.0	21.7±4.5	22.3±1.5	19.1±6.2	20.4±1.2	21.4±2.3	20.0±1.6
	K	0.8±0.1	1.2±0.3	0.9±0.5	0.8±.2.0	0.8±0.2	0.8±0.2	2.4±1.8 ^a	1.1±0.4 ^b	1.2±0.4 ^b	2.4±0.3	2.5±1.0	2.0±0.5	4.5±0.5	4.7±0.8	4.3±0.4
	Ca	103.0±29.0	121.7±40.0	104.6±68.9	34.9±1.0	35.3±4.1	34.2±2.8	40.4±2.4	37.9±1.0	41.6±6.1	45.3±6.1	47.5±2.3	44.5±4.3	45.7±1.6	47.7±6.2	49.1±6.2
	Mg	3.6±0.7	4.4±1.9	3.5±1.7	2.7±0.1	2.6±0.2	2.9±0.7	4.4±2.3	3.1±0.3	3.4±0.6	4.4±0.2	4.6±1.0	4.4±0.8	5.4±0.5	6.0±1.0	5.8±0.7
	S	1.8±0.4	2.3±1.8	1.5±0.8	3.2±0.1	2.9±0.5	3.1±0.2	2.6±0.6	2.4±0.6	2.5±0.4	2.0±0.2	2.1±0.2	2.3±0.5	2.2±0.1	2.3±0.2	2.2±0.1
	Na	2.2±0.4	3.3±1.2	2.3±0.8	2.9±0.3	3.1±0.8	4.5±3.5	5.2±1.4	4.3±1.6	5.5±1.8	8.5±2.8	9.4±5.1	9.6±4.3	14.7±2.0	16.7±3.7	16.8±3.4
Micronutrientes mg/L ³	B	27.8±8.5	32.4±11.1	26.8±14.0	41.7±2.9	42.2±6.3	42.7±6.0	50.7±18.6	41.0±4.0	50.1±5.3	48.4±1.9	50.3±7.4	52.7±4.1	53.6±2.1	56.6±4.6	56.7±4.4
	Fe	1587.8±271.8	1482±542.6	1427.9±681.3	1370.5±659.0	1386.7±733.1	1601.7±409.2	1020.6±385.6	1390.7±1051.7	1593.4±508.7	1152.5±572.7	1326.9±395.7	1397.3±658.1	609.2±108.1	999.4±322.1	720.8±280.1
	Mn	77.4±19.9	101.5±89.6	65.3±35.5	220.4±27.6	235.6±120.1	195.7±41.5	193.8±28.7	184.8±25.3	186.9±20.0	207.0±50.6	202.6±9.2	169±30.1	168.9±31.0	177.6±32.4	167.5±26.4
	Mo	2.1	4.8	3.3±3.2	6.4	4.6	3.2	6.5	1.0±0.8	6.4±2.7	0.7	5.3±1.2	2.5±1.9	2.6±2.3	nd	nd
	Zn	630.6±132.3	724.6±391.4	610.7±304.8	786.5±63.6	733.0±89.2	839.0±35.9	865.3±92.5	950.4±63.1	1016.0±219.1	1116.5±198.2	1180.4±44.3	1120.1±141.9	991.9±93.9	1113.9±61.8	1010.3±63.9
	Cu	40.0±9.4	47.0±32.6	33.8±17.8	53.2±3.5	48.9±7.8	56.2±2.4	69.6±12.9	73.7±12.1	81.0±26.9	107.2±15.9	108.9±5.1	107.6±12.8	108.1±14.9	112.5±14.9	109.3±12.6
	Co	7.9±3.5	9.3±4.3	9.6±7.1	5.9±2.6	6.7±2.7	9.8±4.1	3.9±1.3	5.5±2.9	4.7±2.1	4.1±2.9	4.2±1.8	7.2±5.0	2.5±0.9	3.1±1.5	3.2±2.5
**	Ni	16.3±3.7	13.6±3.7	9.0±2.1	13.1±4.3	13.5±1.4	18.0±8.2	14.8±7.9	15.9±3.1	16.5±1.8	15.3±5.0	15.0±2.5	22.3±13.9	12.3±1.2	12.6±1.0	13.9±1.1

Notas: Cada valor representa el valor promedio ± DE. Los valores en la misma línea con letra diferente indica diferencia significativa ($p < 0.05$). ² Macronutrientes: N, P, K, Ca, Mg, S, Na, B, Fe están en g/L, ³ Micronutrientes = Mn, Mo, Zn, Cu, Co, Ni están en mg/L, ⁴ No son nutrientes esenciales. Tratamientos: Q= quimioautotrófico, H= heterotrófico, fotoautotróficos: M= *Chlorella* spp., CV = *C. sorokiniana*-2714, y CS= *C. sorokiniana*-2805 durante la etapa de maternidad y engorda.

Tabla XXV. Macro elementos (N, Ca, K, Mg, Na, Si, P, S) y micro elementos (B, Fe, Mn, Mo, Ni, Se, Zn) contenidos en la fracción particulada obtenida en TBF.

E	70 días					140 días				
	Q	H	M	CV	CS	Q	H	M	CV	CS
N	60.6±5.2 ^a	45.3±2.4 ^{ab}	48.3±8.3 ^{ab}	52.4±9.0 ^{ab}	42.1±4.1 ^b	25.0±3.7	28.1±8.8	30.3±2.1	24.2±1.8	23.1±1.3
P	9.0±1.7	8.0±1.6	6.3±4.5	19.9±11.3	8.3±1.5	7.6±1.4 ^b	7.4±1.2 ^b	8.1±0.8 ^b	7.7±0.7 ^b	11.6±1.1 ^a
K	2.5±0.2 ^{ab}	3.2±0.7 ^a	2.5±0.3 ^{ab}	1.6±0.4 ^b	2.8±0.9 ^{ab}	1.1±0.1 ^{ab}	1.8±1.8 ^b	1.6±0.5 ^a	1.1±0.03 ^{ab}	1.7±0.3 ^a
Ca	18.1±4.9	17.8±2.1	20.8±3.2	40.1±24.9	18.4±2.2	17.2±3.6 ^b	15.7±0.3 ^b	19.1±1.5 ^b	17.8±1.9 ^b	25.7±3.3 ^a
Mg	6.3±1.6 ^{ab}	7.9±1.6 ^a	5.4±1.2 ^{ab}	4.0±0.7 ^b	5.4±0.9 ^{ab}	2.3±0.1	3.2±1.9	3.4±1.0	2.6±0.1	3.6±0.6
S	3.6±0.1 ^a	3.1±0.5 ^{ab}	3.8±0.8 ^a	2.2±0.5 ^b	3.1±0.4 ^{ab}	1.6±0.04	2.0±0.7	1.9±0.3	1.7±0.03	1.9±0.1
Na	14.5±3.5 ^{ab}	19.5±1.9 ^a	8.6±2.2 ^{bc}	5.0±1.3 ^c	10.2±1.8 ^{bc}	2.0±0.3	2.8±2.3	3.3±1.0	2.3±0.1	3.5±0.5
B	43.9±6.8 ^{ab}	49±1.4 ^{ab}	54.1±9.8 ^a	35.6±3.4 ^b	51.7±8.8 ^{ab}	29.6±3.9	34.9±6.5	41.8±9.1	34.4±1.1	42.7±5.3
Fe	2294.8±265.7	2181.5±237.3	1543.8±1344.5	2774.5±715.5	1651.3±1418.5	2479.3±232.7	2393.3±459.5	2572.5±213.8	2347.7±255.9	2694.0±155.9
Mn	41.2±7.7	42.3±3.8	39.5±34.7	103.4±56.0	36.4±31.2	66.1±14.0 ^b	52.2±7.4 ^b	68.9±2.7 ^b	72.0±6.6 ^b	108.8±22.1 ^a
Mo	3.9±4.5	5.6±5.4	9.4±13.2	15.3±2.7	10.4±9.1	6.9±7.9 ^b	5.9±1.1 ^b	26.4±3.8 ^a	25.2±4.7 ^a	12.5±2.2 ^b
Zn	267.6±33.0 ^{ab}	188.2±17.0 ^b	294.6±274.6 ^{ab}	590.6±262.7 ^a	223.8±192.8 ^{ab}	448.2±184.7	375.8±112.3	412.2±21.3	506.6±19.9	626.0±105.0
Cu	70.1±5.5 ^{bc}	54.5±4.5 ^c	119.2±2.8 ^a	90.5±13.8 ^{ab}	109.3±20.1 ^a	67.8±18.1 ^b	64.3±9.0 ^b	90.3±11.1 ^{ab}	94.6±1.3 ^{ab}	102.6±11.5 ^a
Co	1.0±0.6	1.2±0.6	1.0±0.8	2.2±0.8	1.1±0.9	1.0±0.4	0.7±0.6	1.4±0.8	0.9±0.6	1.4±0.3
Ni	8.0±1.9	8.0±1.6	5.3±4.5	11.1±4.1	5.4±4.8	10.6±2.6	10.5±0.8	11.9±2.8	11.7±4.9	13.1±0.6

Notas: Cada valor representa el valor promedio ± DE. Los valores en la misma línea con letra diferente indica diferencia significativa ($p < 0.05$). Tratamientos: Q= quimioautotrófico, H= heterotrófico, M= fotoautotrófico *Chlorella* spp., CV = *C. sorokiniana*-2714, and CS= *C. sorokiniana*-2805 durante la etapa de maternidad y engorda.

Tabla XXVI. Análisis elemental de la fracción líquida obtenida de los mineralizadores aeróbicos en SAR.

E	65 días ¹			100 días ¹			120 días ¹			
	IDP 1.4	IDP 1.2	IDP 1.0	IDP 1.4	IDP 1.2	IDP 1.0	IDP 1.4	IDP 1.2	IDP 1.0	
Macronutrientes (g/L) ² Micronutrientes (mg/L) ³	N	20.5±4.3	19.7±9.7	16.5±5.2	306.5±67.9 ^a	281.0±63.9 ^{ab}	177.1±37.5 ^b	213.6±93.3	161.3±126.1	179.0±46.7
	P	0.3±0.2	0.07±0.05	nd	67.8±10.4 ^a	59.4±20.9 ^{ab}	39.5±6.5 ^b	94.5±59.5	90.8±55.9	102.8±8.6
	K	6.0±0.9	5.9±0.6	6.0±1.4	66.2±12.0	68.2±10.0	49.4±9.6	107.0±15.5	102.4±28.1	85.0±11.9
	Ca	83.7±10.1	77.5±3.4	81.8±12.2	575.3±97.4	562.4±95.3	464.0±21.0	656.7±142.7	689.1±262.6	711.3±67.6
	Mg	45.6±4.8	44.5±2.0	44.8±7.1	152.7±43.1	152.1±21.2	130.4±24.4	188.6±26.6	193.9±62.9	182.9±16.3
	S	1.1±0.8	0.5±0.4	1.5±0.2	36.2±5.3	33.5±2.7	29.9±3.1	40.7±2.9	38.8±10.3	33.1±3.8
	Na	100.5±23.3	100.2±14.0	118.6±26.1	410.4±133.8	419.2±54.5	371.9±131.4	517.5±40.6	545.1±151.9	506.7±104.5
	B	0.2±0.04	0.2±0.01	0.3±0.1	0.9±0.3	0.8±0.1	0.7±0.2	1.2±0.2	1.2±0.3	1.1±0.2
	Fe	nd	nd	nd	0.3±0.1	0.3±0.03	0.2±0.03	0.2±0.1	0.4±0.2	0.2±0.04
	Mn	nd	nd	nd	0.9±0.3 ^a	0.8±0.2 ^{ab}	0.4±0.1 ^b	1.1±0.8	0.9±0.7	1.3±0.3
	Mo	nd	0.1±0.03	0.04±0.02	0.1±0.1	0.05±0.02	0.1±0.04	0.1±0.001	0.1±0.1	0.1±1.1
	Zn	0.04±0.03	0.1±0.02	0.1±0.1	0.3±0.1	0.4±0.4	0.2±0.03	1.5±1.1	1.4±1.0	2.0±1.1
	Cu	nd	nd	nd	0.01±0.003	0.02±0.001	0.02±0.01	0.03±0.003	0.04±0.02	0.04±0.004
	Co⁴	0.005±0.002	0.02±0.001	0.01±0.001	0.02±0.004	0.02±0.001	0.03±0.02	0.02±0.01	0.02±0.01	0.02±0.02
	Ni⁴	0.002±0.01	nd	nd	0.02±0.001	0.03±0.02	0.02±0.01	0.05±0.01	0.03±0.02	0.1±0.007

Notas: Cada valor representa el valor promedio ± DE. Los valores en la misma línea con letra diferente indica diferencia significativa ($p < 0.05$). ¹ Día 45, 75 y 105= indica el tiempo de exposición que la fracción particulada estuvo en los tanques de mineralización. ² Macronutrientes: N, P, K, Ca, Mg, S, Na, B, Fe están en g/L, ³ Micronutrientes = Mn, Mo, Zn, Cu, Co, Ni están en mg/L, ⁴ No son nutrientes esenciales.

Tabla XXVII. Análisis elemental obtenido de la fracción particulada obtenida de los mineralizadores aeróbicos en SAR.

		65 días ¹			100 días ¹			120 días ¹		
E		IDP 1.4	IDP 1.2	IDP 1.0	IDP 1.4	IDP 1.2	IDP 1.0	IDP 1.4	IDP 1.2	IDP 1.0
Macronutrientes (g/L) ²	N	6.0±1.0	6.8±1.9	4.6±0.7	4.9±0.5	5.1±0.5	5.1±0.4	4.1±1.1	5.1±0.7	4.2±0.8
	P	23.9±66.6	21.4±7.1	21.7±2.8	14.7±1.3	14.3±1.5	18.6±7.3	18.3±3.3	17.5±2.8	17.7±5.2
	K	0.9±1.9	0.6±0.3	0.8±0.1	1.7±0.2	1.9±0.2	2.1±0.4	2.0±0.2	2.0±0.2	1.9±0.3
	Ca	53.9±133.4	48.0±24.8	78.9±17.4	26.3±2.8 ^b	29.8±5.2 ^{ab}	36.2±6.1 ^a	31.6±4.8	29.5±7.4	30.9±10.6
	Mg	2.7±3.2	2.2±0.9	3.1±0.5	3.4±0.4	3.8±0.4	4.5±1.0	3.5±0.4	3.5±0.4	3.2±0.3
	S	3.0±3.7	2.4±1.2	2.5±0.3	2.9±0.1	2.8±0.2	2.6±0.7	3.3±0.4	3.0±0.2	3.0±0.2
	Na⁴	4.3±12.7	3.3±1.4	4.0±1.5	8.4±1.2	10.4±1.0	12.2±5.1	9.1±1.2	8.9±1.4	7.9±1.2
	B	0.04±0.03	0.03±0.01	0.03±0.002	0.05±0.01	0.05±0.001	0.05±0.01	0.04±0.07	0.05±0.04	0.01±0.003
	Fe	2.5±1.2	1.9±0.7	2.6±0.2	2.1±0.2	2.0±0.3	1.6±1.0	2.0±0.1	2.1±0.3	2.5±0.7
	Mn	0.2±0.04 ^a	0.1±0.06 ^b	0.2±0.01 ^{ab}	0.1±0.01	0.1±0.03	0.2±0.04	0.5±0.01	0.1±0.01	0.2±0.04
Micronutrientes (mg/L) ³	Mo	nd	nd	0.005±0.003	0.002±0.001	nd	0.002±0.001	0.003±0.0001 ^b	0.004±0.004 ^a	0.01±0.004 ^b
	Zn	3.0±3.8	2.4±1.2	2.5±0.3	2.8±0.1	2.8±0.2	2.6±0.7	3.2±0.3	3.0±0.2	3.0±0.2
	Cu	59.6±8.5	41.9±17.9	53.5±11.1	106.7±4.7	105.2±4.1	107.6±12.7	160.4±25.2	151.5±13.7	165.3±34
	* Co⁴	7.4±0.3	5.9±2.5	10.9±8.3	8.0±2.7	7.3±0.7	8.5±1.1	9.6±2.3	8.5±1.2	11.2±7.2
	* Ni⁴	12.2±2.0	9.9±2.9	12.9±3.1	17±3.8	16.2±1.8	18.4±4.4	22.0±5.8	17.3±4.4	17.9±3.6

Notas: ¹Día 45, 75 y 105= indica el tiempo de exposición que la fracción particulada estuvo en los tanques de mineralización. ² Macronutrientes: P, K, Ca, Mg, S, Na, B, Fe están en g/L, ³ Micronutrientes = Mn, Mo, Zn, Cu, Co, Ni están en mg/L, ⁴ No son nutrientes esenciales.

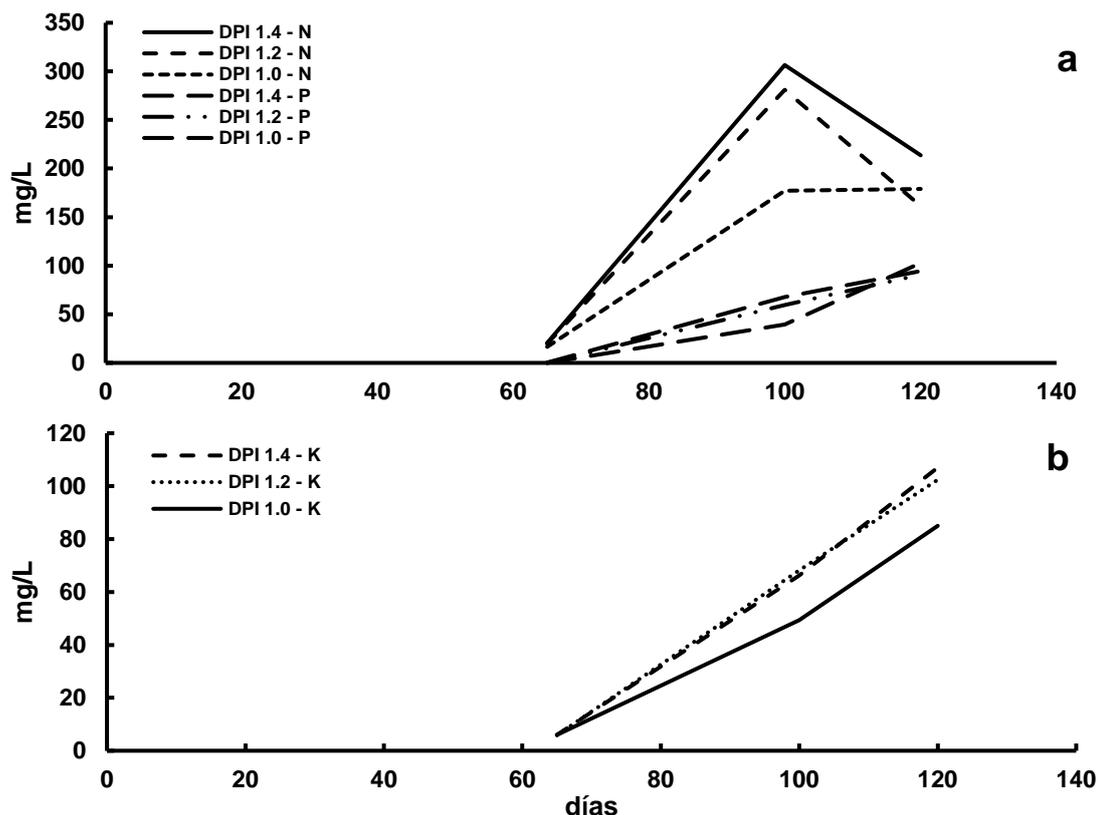


Figura 37. Flujo de nutrientes durante el periodo de SAR (Experimento I). a) Flujo de N y P durante el Experimento I, b) flujo de K durante el experimento I.

Tabla XXVIII. Comparación de la fracción líquida y la fracción particulada contra la mineralización de la fracción líquida y fracción particulada.

	Hogland ¹ (mg/L)	FL ² (días)	MFL ³ (días)	FP ⁴ (días)	MFP ⁵ (días)
N	220-242	100	100	na	
P	24-31	na	100	*	*
K	230-232	na	na	*	*
Ca	179-224	65	<90	*+	*
Mg	49	30	65	*	na
S	113	na	na	*	*
Na	-	-	-	-	*
B	0.45	*	100	*	na
Fe	7	na	na	*	*
Mn	0.05 - 0.5	na	>120	*	<65
Mo	0.01	*	65 -100	*	>120
Zn	0.5	na	100	*	<65
Cu	0.02	na	100	*	*
Co	-	-	-	-	-
Ni	-	-	-	-	-

Notas: ¹Los valores en días representan el tiempo que cada fracción tardó en igualar los valores de la solución hidropónica de Hoagland. ²FL= fracción líquida SAR, ³MFL= mineralización aeróbica de la fracción líquida, ⁴FP= fracción particulada, ⁵MFP= Mineralización de la fracción particulada. * = Los valores fueron alcanzados sin esperar tiempo.

La MFL retuvo valores menores en comparación a la fracción líquida que recirculó en el tanque. El P en la FP y MFP alcanzó el valor de Hoagland. La MFP es carente de K, Mg, B, pero es buena fuente de micro elementos. La MFL requiere alrededor de 90 días para obtener los valores de Hoagland (Tabla XXVIII). FL y MFL mostraron niveles muy bajos de K, S, Na, Fe, Mn, Mo, y Cu.

7.5 Mineralizaciones químicas

El HNO_3 y H_2SO_4 permitieron recuperar mayor cantidad de P, Ca, S, Fe, y mantuvieron niveles ideales de N y Mn. En cambio, con la incineración se recupero menor nivel de P, K, pero un nivel cercano al óptimo para Mg, Fe, B, y Cu (Tabla XXIX).

Tabla XXIX. Análisis elemental obtenido de las mineralizaciones químicas: mineralización ácida con H_2SO_4 , HNO_3 e incineración, para la fracción particulada obtenida en SAR.

#	Elementos	Hoagland ¹	Steiner ²	HNO_3 ³	H_2SO_4 ⁴	IN ⁵
	N	220-242	170	218	221	159
	P	24-31	50	312.8	436.6	46.6
	K	230-232	320	33.7	46.8	16.5
	Ca	179-224	183	192.5	227.8	122.2
	Mg	49	50	7.1	17.7	19.4
	S	113	148	78.9	90.4	6.8
	Na	-	-	97.9	1058.4	nd
	B	0.45	1-2	0.08	0.4	3.0
	Fe	7	3-4	0.03	25.2	46.4
	Mn	0.05-0.50	1-2	0.03	3.6	0.1
	Mo	0.0106	0.1	0.02	0.05	nd
	Zn	0.48	0.2	0.02	28.4	0.5
	Cu	0.02	0.5	0.01	1.5	1.4
	Co	-	-	0.03	0.1	nd
	Ni	-	-	nd	nd	nd

Notas: nd= no detectado, ^{1,2} Hoagland y Steiner= Soluciones hidropónicas comerciales. ³ HNO_3 = mineralización ácida con ácido nítrico, ⁴ H_2SO_4 mineralización ácida con ácido sulfúrico, ⁵IN= incineración a 650 °C en mufla. Para fines comparativos se muestran los resultados promedio de cada técnica. Las mineralizaciones se llevaron a cabo a nivel laboratorio, 3 µg de muestra seca por triplicado

7.6 Formulaciones hidropónicas específicas y las mineralizaciones químicas.

El perfil más parecido a la formulación química para lechuga lo arrojó la incineración, solo con excedente de Fe. Co solo fue detectado en las mineralizaciones ácidas aunque on esta no se detecto valores de Na (Tabla XXX).

Tabla XXX. Análisis elemental obtenido de la fracción particulada obtenida de los mineralizadores aeróbicos del SAR.

#	E	Lechuga ¹	HNO ₃ ²	H ₂ SO ₄ ³	IN ⁴
1	N	142	218	221	159
2	P	31	312.8	436.6	46.6
3	K	215	33.7	46.8	16.5
4	Ca	90	192.5	227.8	122.2
5	Mg	12	7.1	17.7	19.4
6	S	18	78.9	90.4	6.8
7	Na	-	97.9	1058.4	nd
8	B	0.16	0.08	0.4	3.0
9	Fe	1.1	0.03	25.2	46.4
10	Mn	0.140	0.03	3.6	0.1
11	Mo	0.02	0.02	0.05	nd
12	Zn	0.13	0.02	28.4	0.5
13	Cu	0.024	0.01	1.5	1.4
14	Co	-	0.03	0.1	nd
15	Ni	-	nd	nd	nd

Notas: ¹Solución hidropónica formulada para el cultivo de Lechuga. ²HNO₃ = mineralización ácida con ácido nítrico, ³H₂SO₄ mineralización ácida con ácido sulfúrico, ⁴IN= incineración a 650 °C en mufla. Para fines comparativos se muestran los resultados promedio de cada técnica. Las mineralizaciones se llevaron a cabo a nivel laboratorio, 3 µg de muestra seca por triplicado.

Tabla XXXI. Comparación de las mineralizaciones químicas de la fracción particulada de SAR contra soluciones hidropónicas específicas para el cultivo de tomate, fresa, pepino, chile y melón obtenida de los mineralizadores aeróbicos en SAR.

#	E	Tomate ¹	Fresa ¹	Pepino ¹	Chile ¹	Melón ¹	HNO ₂ ²	H ₂ SO ₄ ³	IN ⁴
1	N	192	140	210	152	223.2	218	221	159
2	P	46	39	24	39	32	312.8	436.6	46.6
3	K	275	205	217.5	245	217.5	33.7	46.8	16.5
4	Ca	144	110	157.5	110	157.5	192.5	227.8	122.2
5	Mg	32	27	48	29	36	7.1	17.7	19.4
6	S	42	36	64	32	48	78.9	90.4	6.8
7	Na	-	-	-	-	-	97.9	1058.4	nd
8	B	0.5	0.3	0.2	0.3	0.2	0.08	0.4	3.0
9	Fe	0.5	1.0	2.0	3.7	2.0	0.03	25.2	46.4
10	Mn	0.5	0.6	0.2	0.4	0.2	0.03	3.6	0.1
11	Mo	0.05	0.05	0.005	0.05	0.005	0.02	0.05	nd
12	Zn	0.1	0.05	0.02	0.3	0.02	0.02	28.4	0.5
13	Cu	0.05	0.05	0.01	0.05	0.01	0.01	1.5	1.4
14	Co	-	-	-	-	-	0.03	0.1	nd
15	Ni	-	-	-	-	-	nd	nd	nd

Notas: ¹Los valores presentados por las distintas hortalizas corresponden a soluciones hidropónicas específicas para cada una. ²HNO₃ = mineralización ácida con ácido nítrico, ³H₂SO₄ mineralización ácida con ácido sulfúrico, ⁴IN= incineración a 650 °C en mufla (20 g). Para fines comparativos se muestran los resultados promedio de cada técnica. Las mineralizaciones se llevaron a cabo a nivel laboratorio, 3 µg de muestra seca por triplicado.

La incineración generó un perfil muy parecido al requerido por el tomate y el chile, todas las mineralizaciones presentaron deficiencias en Mg, K. La

recuperación de P fue mayor en las mineralizaciones ácidas, mayor al requerimiento del tomate, fresa, pepino, chile y melón. La mayor recuperación de micronutrientes la obtuvo la mineralización con H₂SO₄. La acumulación de Na se presentó en las mineralizaciones ácidas (Tabla XXXI).

EXPERIMENTO IV - Hidroponía

7.7 Implementación de los efluentes de TBF en hidroponía TFN

7.7.1 Análisis elementales en la fracción líquida del cultivo TBF

En la fracción líquida, los macro elementos dominantes fueron Na y Ca para todos los tratamientos. K, N, P y Si se acumularon durante la maternidad y engorda en todos los tratamientos ($p < 0.05$; Tabla XXXII). Calcio, Mg, Na y Si se encontraron desde el comienzo del experimento hasta la semana 30. En cuanto a los micronutrientes, Fe y Mn se detectaron hasta el final de la fase de engorda ($p < 0.05$). El molibdeno, Se y Zn fluctuaron durante todo el experimento ($p < 0.05$). El tratamiento CS presentó el nivel más alto de B y Ca. Durante el período experimental, los tratamientos fotoautotróficos mostraron los niveles más altos de micro y macronutrientes entre todos los tratamientos.

7.7.2 Calidad del agua y nutrientes en TBF

Los parámetros obtenidos dentro del cultivo de *O. niloticus* están dentro de los valores óptimos para las hortalizas cultivadas en hidroponía (Tabla XXXIII). La salinidad acumulada en el sistema condiciona el crecimiento a plantas halofitas o a plantas resistentes a la salinidad. Los residuales nitrogenados se acumularon con el tiempo presentando diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$) (Tabla XXXIII).

La relación NH₄-N: NO₃-N fue menor en la fase de maternidad con diferencias significativas entre los tratamientos después de la semana nueve ($p < 0.05$) cuando el nivel comenzó a aumentar en CV y CS; después de la semana 13 se observó un aumento en todos los tratamientos cuando la fase de engorda obtuvo los niveles más altos (Fig. 38a).

Tabla XXXII. Macro elementos (N, Ca, K, Mg, Na, Si, P, S) y microelementos (B, Fe, Mn, Mo, Ni, Se, Zn) en la fracción líquida de los tratamientos: Q= quimioautotrófico, H= heterotrófico, M= fotoautotrófico *Chlorella* spp., CV = *C. sorokiniana*-2714, y CS= *C. sorokiniana*-2805 durante la etapa de maternidad y engorda.

Macroelementos (mg/L)	S	Ca	K	Mg	N	Na	P	S	Si
Hoagland¹	-	179-224	230-232	49	220-242	-	24-31	113	-
Q	0	59.5±1.1 ^b	0.5±0.2 ^c	24.2±0.3 ^c	6.0 ± 0.7	61.7±3.3 ^c	nd	2.5±0.3 ^c	30.3±2.3 ^a
	10	54.5±19.7	2.2±1.4 ^b	16.0±8.6 ^{ab}	8.5±1.6 ^b	44.7±23.7 ^b	3.0±0.3 ^b	3.8±1.3 ^b	31.9±0.4 ^a
	20	131.0±8.9	16.7±4.1	72.4±16.3	61.4±2.9	244.6±69.4	17.8±2.3	14.6±3.6	37.6±2.5
H	0	58.8 ±1.1 ^b	0.7 ^c	25.6±1.6 ^c	5.60 ±0.3	63.3±4.1 ^c	nd	2.5±0.2 ^c	30.4±1.0 ^a
	10	51.5±13.7	0.6±0.1 ^b	13.5±3.2 ^b	12.2 ±1.4 ^{ab}	33.8±6.4 ^b	2.2±0.7 ^b	2.6±0.8 ^b	28.1±5.5 ^a
	20	127.0±3.9	15.1±1.1	71.3±5.5	40.3 ±5.8	241.5±20.8	12.0±0.9	13.7±1.2	37.0±2.1
M	0	71.8±12.1 ^b	11.0±3.5 ^b	57.7±9.0 ^b	6.8±0.80	271.3±39.6 ^b	1.3±0.6	12.5±2.0 ^b	21.46±3.3 ^b
	10	83.6±4.0	11.0±4.4 ^{ab}	42.4±14.3 ^{ab}	15.1±3.4 ^{ab}	186.1±60.0 ^a	11.9±2.1 ^a	11.8±0.9 ^a	8.13±7.0 ^b
	20	148.0±10.2	21.4±2.1	58.2±1.9	81.8±7.2	153.8±3.9	20.5±4.6	12.6±0.8	34.4±5.2
CV	0	100.6±3.3 ^a	16.9±1.8 ^a	100.9±0.8 ^a	7.0±1.06	434.4±55.5 ^a	nd	19.5±0.5 ^a	3.4±1.0 ^c
	10	90.2±22.4	11.1±6.2 ^{ab}	47.3±22.7 ^{ab}	19.8 ±8.4 ^{ab}	185.3±72.8 ^a	13.5±0.8 ^a	13.3±2.8 ^a	3.0±0.7 ^b
	20	140.0±4.0	19.8±2.5	56.7±3.3	72.8±9.0	143.2±12.0	15.51±2.2	12.8±1.5	29.7±1.3
CS	0	104.0±2.9 ^a	19.4±1.0 ^a	104.3±2.2 ^a	7.6±1.05	453.8±25.1 ^a	1.7±0.5	21.0±0.5 ^a	7.0±0.9 ^c
	10	94.3±15.6	13.9±5.2 ^a	53.5±17.4 ^a	24.1±6.4 ^a	211.2±63.9 ^a	12.2±0.6 ^a	13.8±2.0 ^a	3.0±0.2 ^b
	20	147.3±1.5	21.2±1.8	58.8±1.6	92.3 ±2.9	146.2±10.8	22.0±3.4	13.2±0.4	30.5±5.5
Microelementos (mg/L)	S	B	Fe	Mn	Mo	Ni	Cu	Zn	
Hoagland¹	-	0.45	7	0.05-0.5	0.0106	-	-	0.48	
Q	0	0.1±0.02 ^c	nd	nd	0.02±0.01 ^b	0.01±0.01	nd	nd	
	10	0.1±0.04 ^{bc}	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
	20	0.3±0.05	0.004	0.06±0.02	0.004	0.0025±0.001	nd	0.077±0.048	
H	0	0.1±0.001 ^c	nd	nd	0.04 ^b	0.01±0.001	nd	nd	
	10	0.1±0.02 ^c	nd	nd	0.03±0.02 ^{ab}	nd	nd	nd	
	20	0.3±0.02	0.05±0.03	0.06±0.001	0.055±0.003	0.006	nd	0.087±0.098	
M	0	0.4±0.07 ^b	nd	nd	0.1±0.04 ^a	0.02±0.01	0.01±0.008 ^a	0.09±0.02	
	10	0.3±0.06 ^{abc}	0.006	nd	0.02±0.0 ^b	nd	0.02±0.01	0.1±0.02 ^a	
	20	0.4±0.01	0.03±0.03	0.1±0.03	0.1±0.05	0.03±0.01	0.04±0.01 ^{ab}	0.2±0.1	
CV	0	0.5±0.007 ^{ab}	nd	nd	0.08±0.05 ^{ab}	0.01±0.01	0.02±0.01 ^b	0.02±0.03	
	10	0.3±0.107 ^{ab}	nd	0.01	0.08±0.03 ^a	nd	0.003±0.002	0.1±0.05 ^a	

	20	0.4±0.09	0.02±0.01	0.1±0.06	0.03	0.02±0.02	0.001±0.001 ^b	0.1±0.07
CS	0	0.5±0.01 ^a	nd	nd	0.1±0.03 ^{ab}	0.02±0.01	0.01±0.006 ^{ab}	0.002
	10	0.3±0.08 ^a	nd	0.004	0.1±0.01 ^{ab}	nd	0.003±0.001	0.1±0.03 ^{ab}
	20	0.4±0.01	0.03±0.01	0.2±0.03	0.1±0.01	0.01±0.001	0.006±0.003 ^a	0.2±0.09

Notas: nd= no detectado, - = no está presente en la fórmula de alimentación. ¹ Hoagland es una fórmula hidropónica comercial (Hoagland y Arnon, 1950). Datos de referencia (Jones, 2004). Cada valor está representado por la media de SD. Las letras minúsculas indican diferencias entre los tratamientos. Los valores de la misma fila con superíndices diferentes son significativamente diferentes ($p < 0.05$).

La relación entre NT y PO₄-P fue menor en los tratamientos fotoautotróficos (M, CS y CV) en la fase de maternidad y superior en Q y H. En la fase de engorda, la relación superó en todos los tratamientos con respecto a las soluciones hidropónicas (soluciones Hoagland, Steiner, Cooper, Hewitt) (Fig. 38b). La evaporación aumentó a lo largo del período experimental; el tratamiento H tuvo el nivel de evaporación más alto en la fase de maternidad ($p < 0.05$) (Fig. 39a), pero la evaporación total no mostró diferencias significativas entre los tratamientos ($p > 0.05$, Tabla XXXIII). La conductividad Q y H mostraron el nivel más bajo durante la fase de cría, y después de la semana 11 aumentaron al nivel más alto (> 6 dS/m nivel máximo) hasta la semana 21. En la fase de engorda, el nivel de todos los tratamientos disminuyó sin diferencias significativas hasta la semana 26, cuando los tratamientos fotoautotróficos obtuvieron el nivel más alto (Fig. 40).

Tabla XXXIII. Descripción de los parámetros del cultivo. (OD, pH, conductividad y salinidad) evaporación total y NH₄-N, NO₂-N, NO₃-N, PO₄-P por 40 semanas. El cultivo de *Oreochromis niloticus* en TBF se dividió en dos periodos, invierno y verano.

Parámetros fisicoquímicos	T	Q	H	M	CV	CS
Temperatura °C	T	25.6±4.9	25.6±5.5	24.3±4.1	24.2±4.1	24.5±4.0
OD (O ₂ mg/L) ¹	T	7.4±1.2	7.5±1.3	7.3±1.5	7.3±1.4	7.5±1.3
pH ²	T	5.9±1.2	6.0±1.2	5.7±0.9	5.8±0.9	5.8±1.0
Salinidad (ppt)	T	1.4±0.8	1.5±1.1	1.8±0.4	1.8±0.4	1.8±0.4
Evaporación Total (L)	T	1254.6±28.4	1381.0±12.7.9	1401.2±55.7	1374.9±56.1	1349.1±72.0
NH ₄ -N (mg/L)	10	0.3±0.2 ^b	0.4±0.3 ^b	0.7±0.6 ^b	1.3±1.8 ^a	1.6±2.0 ^a
	20	18.0±9.8 ^c	17.2±9.4 ^c	23.1±12.5 ^b	26.8±11.2 ^a	27.4±11.9 ^a
	30	22.4±16.3 ^{bc}	16.8±13.2 ^c	27.5±20.3 ^{ab}	28.0±22.3 ^{ab}	32.8±20.9 ^a
	40	91.2±36.0	78.5±36.3	109.1±34.5	106.8±28.5	112.4±36.4
NO ₂ -N (mg/L)	10	0.3±0.2 ^c	0.2±0.1 ^c	0.3±0.7 ^c	3.8±5.6 ^b	5.6±5.0 ^a
	20	0.2±0.2	0.5±0.7	1.0±1.0	0.5±0.5	0.5±0.5
	30	1.3±1.5	0.9±1.3	1.1±1.5	1.0±1.4	0.5±0.6
	40	0.2±0.4	0.2±0.4	0.1±0.3	0.2±0.5	0.2±0.4
NO ₃ -N(mg/L)	10	17.4±8.9 ^{bc}	13.9±5.8 ^c	29.3±6.7 ^a	19.6±13.9 ^{bc}	21.0±17.1 ^b
	20	73.0±19.8 ^{bc}	69.2±18.7 ^c	83.1±23.3 ^{ab}	84.9±24.3 ^a	87.9±21.5 ^a
	30	68.0±29.6 ^{bc}	65.4±26.9 ^c	79.5±36.3 ^{ab}	80.9±38.9 ^a	85.5±37.6 ^a
	40	136.2±48.1	142.2±60.4	168.3±52.6	159.2±55.9	171.8±46.9
PO ₄ -P (mg/L)	10	1.2±1.0 ^c	1.0±0.7 ^c	6.5±1.7 ^a	4.9±2.5 ^b	5.9±3.1 ^a
	20	10.1±3.8 ^b	9.0±4.0 ^b	16.0±4.7 ^a	14.6±3.2 ^a	18.6±3.8 ^a
	30	9.4±4.4	7.3±3.8	10.8±3.7	9.7±5.0	11.0±5.2
	40	14.5±4.0	15.6±5.2	19.0±5.0	18.0±5.0	19.4±4.3

Notas: ¹ OD - Oxígeno disuelto (mg/L); ² rangos de pH 0-14. Cada valor representa la media de DE. Las letras minúsculas indican diferencias entre los tratamientos, las letras mayúsculas indican diferencias entre semanas. Los valores de la misma fila con superíndices diferentes son significativamente diferentes ($p < 0.05$).

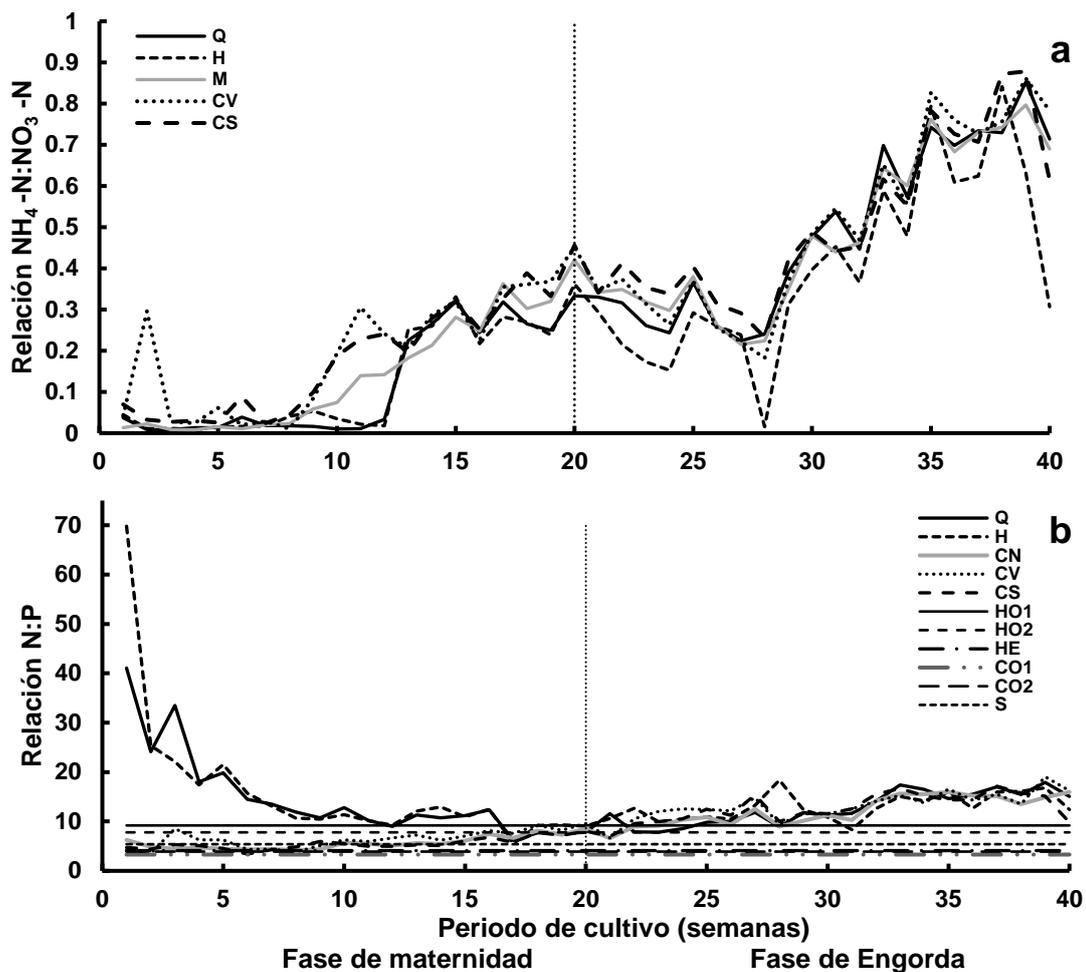


Figura 38. Descripción de la calidad del agua durante el período experimental (40 semanas). (a) relación $\text{NH}_4\text{-N}:\text{NO}_3\text{-N}$, (b) relación $\text{N}:\text{P} = \text{NT}:\text{PO}_4\text{-P}$. Rangos de concentración de N y P según varios autores: HO1 = Solución Hoagland 1, HO2 = Solución Hoagland 2 máximo y mínimo de datos de Hoagland utilizados en soluciones hidropónicas (1960), Hewitt - HE (1966), Solución Cooper 1 - CO, CO2 - Solución Cooper 2 (1979), Steiner S (1984) (Datos obtenidos en Trejo-Téllez y Gómez-Merino, (2012). La línea gris vertical en el centro de cada gráfica separa los datos en dos períodos: maternidad (1 -20 semanas) y engorda (21-40 semanas), durante el cultivo de tilapia. Tratamientos: Q= quimioautotrófico, H= heterotrófico, M= fotoautotrófico *Chlorella* spp., CV = *C. sorokiniana*-2714, y CS= *C. sorokiniana*-2805 durante la etapa de maternidad y engorda.

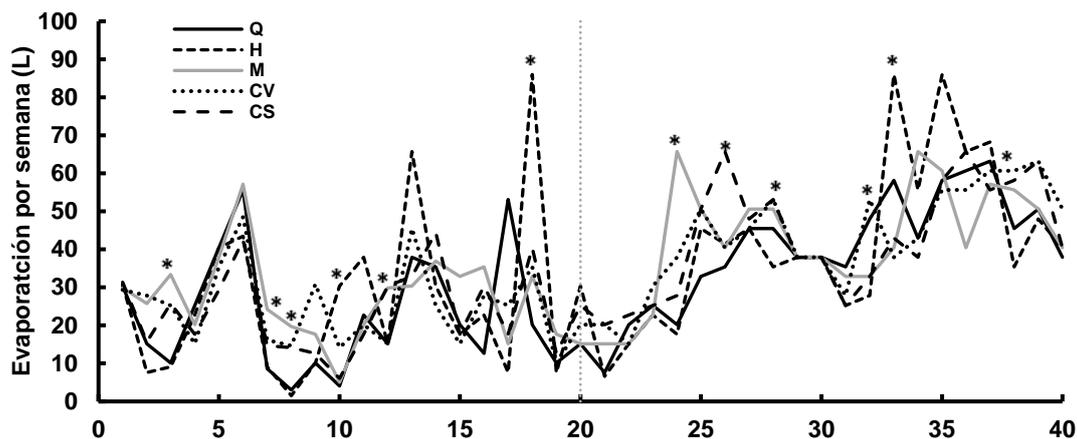


Figura 39. Evaporación (L) durante el período experimental; la línea gris vertical en el centro de cada gráfica separa los datos en dos períodos: maternidad (semanas 1-20) y engorda (semanas 21- 40) de *Oreochromis niloticus*. Tratamientos: Q= quimioautotrófico, H= heterotrófico, M= fotoautotrófico *Chlorella* spp., CV = *C. sorokiniana*-2714, y CS= *C. sorokiniana*-2805 durante la etapa de maternidad y engorda.

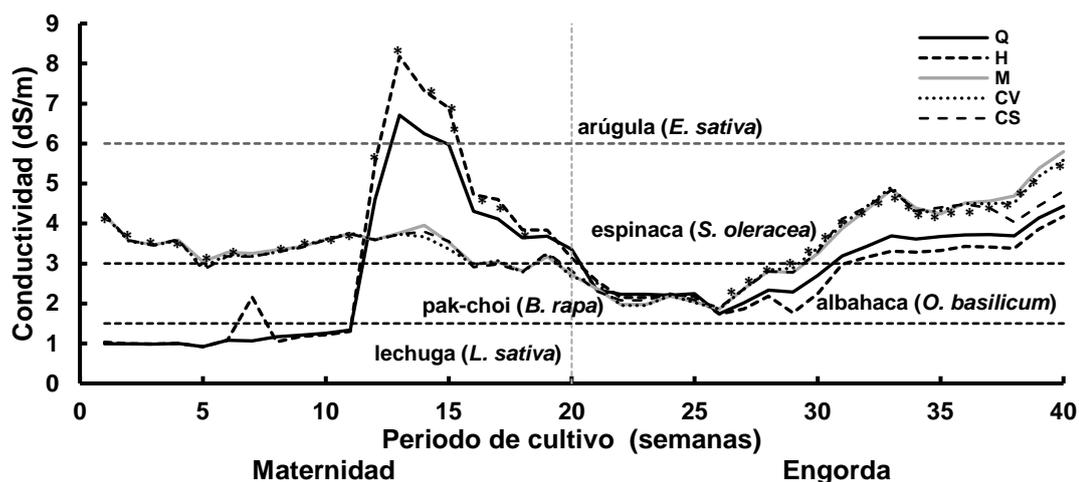


Figura 40. Conductividad durante el cultivo de tilapia. Tratamientos: Q= quimioautotrófico, H= heterotrófico, M= fotoautotrófico *Chlorella* spp., CV = *C. sorokiniana*-2714, y CS= *C. sorokiniana*-2805 durante la etapa de maternidad y engorda. La línea gris vertical en el centro de cada gráfica separa los datos en dos períodos: maternidad (semanas 1 -20) y fase de engorda (semanas 21- 40) durante el cultivo de *Oreochromis niloticus* en TBF. La primera línea horizontal representa el rango de sensibilidad (0 -1.5 dS/m); la segunda línea representa moderadamente sensible (1.5 – 3.0 dS/m); la tercera línea representa moderadamente tolerante (3.0 a 6 dS/m). Los datos para el establecimiento de estas líneas se obtuvieron en Shannon y Grieve, 1998; Trejo-Tellez y Gómez-Merino, 2012. El nombre de las plantas indica la afinidad a la conductividad: lechuga (*L. sativa*) es una planta sensible; pak-choi (*B. rapa*) moderadamente sensible; espinaca (*S. oleracea*) moderadamente tolerantes; y la arúgula (*E. sativa*) es tolerante (Shannon y Grieve, 1998).

7.7.3 Experimento de horticultura hidropónica con plantas de hojas verdes

El mayor crecimiento de la planta se alcanzó a mediados del período experimental, a excepción de pak-choi (*B. rapa*), que no mostró diferencias significativas ($p > 0.05$) (Tabla XXXIV). Al final del experimento, la albahaca (*O. basilicum*) no había mostrado diferencias significativas entre los tratamientos ($p > 0.05$); arúgula (*E. sativa*), y las espinacas (*S. oleracea*) mostraron el crecimiento húmedo más alto con el tratamiento Q ($p > 0.05$), la lechuga (*L. sativa*) alcanzó el mayor crecimiento con la solución Hoagland; sin diferencias estadísticas entre el resto de los tratamientos ($p > 0.05$) (Tabla XXXIV). El mejor crecimiento de pak-choi (*B. rapa*) se produjo con el tratamiento CS. Según el porcentaje de crecimiento, la lechuga (*L. sativa*) y el pak-choi (*B. rapa*) no mostraron diferencias significativas ($p > 0.05$) mientras que para la albahaca (*O. basilicum*) y la espinaca (*S. oleracea*), los mejores resultados se obtuvieron con el tratamiento CS ($p < 0.05$), y la arúgula (*E. sativa*) con el tratamiento Q ($p < 0.05$) (Tabla XXXIV).

Tabla XXXIV. Técnica de flujo de nutrientes (TFN) en horticultura hidropónica, experimento con especies de plantas de hojas verdes durante 40 semanas. Crecimiento de plantas mediante el uso de la fracción líquida obtenida de cultivos biofloc. Los datos de crecimiento se muestran para los períodos medios y finales del período experimental.

Parámetros	Planta ²	QH+	Q+	H+	M+	CV+	CS+
Peso inicial							
Peso húmedo planta (g/planta)	AL	22.9±8.8 ^a	4.6±1.8 ^b	5.9±3.4 ^b	5.8±2.9 ^b	6.8±2.5 ^b	3.0±0.9 ^b
	AR	14.2±5.7 ^a	12.0±4.8 ^{ab}	4.5±1.8 ^c	8.9±5.3 ^{abc}	8.0±3.2 ^{abc}	6.7±1.8 ^{bc}
	ES	5.9±1.9 ^a	4.6±2.7 ^{ab}	2.3±1.6 ^b	2.3±0.4 ^b	2.3±0.8 ^b	2.5±0.9 ^b
	LO	75.6±38.5 ^a	6.3±1.6 ^b	4.7±1.8 ^b	4.0±0.9 ^b	7.2±3.7 ^b	3.5±0.6 ^b
Peso seco planta (g/planta)	PC	87.6±68.2	51.8±37.0	31.2±12.5	43.4±25.7	28.9±20.3	32.5±10.7
	AL	1.9±0.7 ^a	0.4±0.2 ^b	0.6±0.3 ^b	0.6±0.3 ^b	0.7±0.2 ^b	0.3±0.1 ^b
	AR	1.2±0.5 ^a	1.2±0.5 ^a	0.4±0.1 ^b	0.9±0.5 ^{ab}	0.8±0.3 ^{ab}	0.7±0.2 ^{ab}
	ES	0.5±0.1 ^a	0.5±0.3 ^{ab}	0.2±0.1 ^b	0.2±0.03 ^b	0.3±0.1 ^{ab}	0.2±0.1 ^{ab}
Peso húmedo raíz (g/planta)	LO	2.7±1.0 ^a	0.6±0.2 ^b	0.5±0.1 ^b	0.6±0.1 ^b	0.6±0.3 ^b	0.7±0.1 ^b
	PC	2.9±1.3	3.0±1.6	2.0±0.8	3.1±1.7	2.4±1.1	2.4±0.8
	AL	14.8±5.5 ^a	4.8±1.9 ^b	3.8±2.3 ^b	3.9±2.2 ^b	4.2±1.5 ^b	1.8±0.8 ^b
	AR	7.7±2.6 ^a	4.2±2.8 ^{ab}	2.2±0.6 ^b	4.4±2.0 ^{ab}	3.6±2.5 ^b	2.9±1.0 ^b
Peso seco raíz (g/planta)	ES	2.7±0.5 ^a	2.0±1.5 ^{ab}	1.0±0.4 ^b	1.0±0.3 ^b	1.0±0.2 ^b	1.0±0.3 ^b
	LO	13.5±4.3 ^a	2.1±0.8 ^b	1.7±0.3 ^b	1.6±0.3 ^b	2.3±0.7 ^b	12.8±0.2 ^b
	PC	14.7±9.4	12.6±7.9	8.4±4.0	12.3±6.3	10.8±5.7	7.1±1.9
	AL	0.7±0.2 ^a	0.2±0.1 ^b	0.2±0.1 ^b	0.2±0.1 ^b	0.2±0.1 ^b	0.1±0.1 ^b
Peso seco raíz (g/planta)	AR	0.4±0.2 ^a	0.4±0.2 ^a	0.2±0.1 ^a	0.4±0.1 ^a	0.3±0.2 ^a	0.3±0.1 ^a
	ES	0.2±0.02 ^a	0.2±0.1 ^{ab}	0.1±0.03 ^b	0.1±0.03 ^b	0.1±0.02 ^b	0.1±0.03 ^b
	LO	0.7±0.03 ^a	0.1±0.04 ^b	0.1±0.03 ^b	0.1±0.02 ^b	0.3±0.03 ^b	0.1±0.02 ^b
	PC	0.7±0.4	0.7±0.4	0.5±0.2	0.8±0.3	0.5±0.2	0.4±0.2
Peso Final							
Peso húmedo planta (g/planta)	AL	87.8±33.5	78.7±36.8	53.0±32.5	62.5±21.5	48.6±37.8	57.3±13.8
	AR	76.4±80.3 ^{ab}	92.9±47.0 ^a	14.1±13.6 ^b	20.0±10.7 ^b	28.6±27.6 ^b	8.2±4.9 ^b
	ES	7.0±4.8 ^b	33.8±20.9 ^a	7.2±5.9 ^b	11.8±5.9 ^b	11.4±5.6 ^b	24.4±16.4 ^{ab}
	LO	320.9±63.2 ^a	112.9±41.5 ^b	86.0±30.5 ^b	49.2±22.8 ^b	71.8±46.6 ^b	35.1±24.6 ^b
	PC	470.8±171.7 ^{ab}	308.0±100.1 ^b	427.1±172.9 ^{ab}	334.4±168.1 ^{ab}	323.7±100.7 ^{ab}	340.1±77.7 ^a
	PC	122.8±39.7 ^{ab}	65.8±30.2 ^b	122.0±59.5 ^{ab}	119.0±44.5 ^{ab}	127.1±56.0 ^{ab}	160.8±25.1 ^a
	AL	7.3±2.6	8.5±3.4	4.5±2.9	5.3±1.9	4.4±3.4	6.2±3.3

Peso seco planta (g/planta)	AR	6.4±4.9 ^{ab}	8.5±5.5 ^a	1.4±1.1 ^b	2.1±1.0 ^b	2.8±1.2 ^{ab}	0.9±0.5 ^b
	ES	1.0±0.3 ^b	2.9±1.7 ^a	1.0±0.7 ^b	1.0±0.5 ^b	1.4±0.5 ^b	2.0±1.2 ^{ab}
	LO	6.2±2.0 ^a	5.0±0.7 ^b	5.4±3.2 ^b	3.3±1.3 ^b	3.4±2.0 ^b	2.5±1.5 ^b
	PC	6.7±2.0	4.0±2.9	6.9±3.3	7.7±3.2	6.9±3.3	7.7±2.7
Peso húmedo raíz (g/planta)	AL	74.4±23.7	49.8±21.3	48.5±29.3	56.1±22.1	42.4±27.7	31.1±13.0
	AR	39.9±15.8	38.7±17.7	12.7±10.6	13.9±7.8	27.1±16.7	6.0±2.9
	ES	5.2±2.3 ^b	24.7±12.4 ^a	7.0±6.4 ^b	9.6±4.9 ^b	10.5±6.0 ^b	19.2±11.1 ^{ab}
	LO	43.8±7.4 ^a	29.0±9.8 ^b	23.2±10.0 ^b	10.6±1.7 ^b	13.1±9.2 ^b	10.2±7.2 ^b
Peso seco raíz (g/planta)	PC	21.3±0.3 ^a	1.1±0.3 ^b	0.7±0.3 ^{bc}	0.5±0.2 ^c	0.7±0.5 ^{bc}	0.4±0.3 ^c
	AL	2.5±1.0	2.4±1.2	1.5±1.0	1.3±0.5	1.6±1.1	1.3±0.5
	AR	1.8±0.8 ^{ab}	2.3±1.3 ^a	0.8±0.4 ^{ab}	0.9±0.5 ^{ab}	1.6±0.8 ^{ab}	0.4±0.1 ^b
	ES	0.2±0.02 ^a	0.2±0.1 ^{ab}	0.1±0.03 ^b	0.1±0.03 ^b	0.1±0.02 ^b	0.07±0.03 ^b
% Crecimiento	LO	21.3±0.2 ^a	1.1±0.3 ^b	0.8±0.3 ^b	0.5±0.2 ^b	0.7±0.4 ^b	0.4±0.2 ^b
	PC	21.3±0.25 ^a	1.1±0.3 ^b	0.7±0.3 ^{bc}	0.5±0.2 ^c	0.7±0.5 ^{bc}	0.4±0.2 ^c
	AL	450.7±239.4 ^b	1812.0±780.0 ^a	961.0±480.0 ^{ab}	1373±882 ^{ab}	935.0±987.0 ^{ab}	2076.0±752.0 ^a
	AR	517.0±453.0 ^{ab}	882.0±562.0 ^a	313.7±222.7 ^{ab}	262.1±122.5 ^b	384.0±369.0 ^{ab}	169.0±60.4 ^b
CES (%/d)¹	ES	188.9±115.6 ^b	765.0±333.0 ^{ab}	343.5±229.3 ^{ab}	505.2±235.7 ^{ab}	591.0±294.0 ^{ab}	1228±1186 ^a
	LO	493.1±211.9	2031.0±1322.0	2291.0±1629.0	1306±747	1398.0±1427.0	1174.0±1063.0
	PC	2042.0±3516.0	506.0±377.0	1634.0±1198.0	1928±1224	1111.0±898.0	1260.0±496.0
	AL	7.9±3.9 ^c	16.7±2.4 ^{ab}	12.8±2.6 ^{abc}	14.3±4.2 ^{abc}	10.1±6.9 ^{bc}	17.5±2.3 ^a
	AR	7.7±5.4 ^{ab}	11.2±5.6 ^a	5.5±4.2 ^{ab}	5.1±2.9 ^{ab}	5.8±5.3 ^{ab}	2.8±1.5 ^b
	ES	3±2.9 ^b	11.4±2.9 ^a	6.0±4.4 ^{ab}	8.7±4 ^{ab}	9.1±4.7 ^{ab}	12.0±7.1 ^a
	LO	8.9±2.6	16.8±3.4	17.4±3.8	14.3±3.5	10.9±9.0	11.6±7.4
	PC	12±8.5	8.2±4.3	15.4±3.6	12±8.4	12.6±4.6	14.0±2.9

Notas: Cada valor se representa por la media de la desviación estándar. Las minúsculas indican diferencias entre los tratamientos. Los valores de la misma fila con diferentes letras de superíndice son significativamente diferentes ($p < 0.05$). Fila sin letra indica que no hay diferencias significativas entre los grupos ($p > 0.05$). ¹ Crecimiento específico CES (CES - [(ln peso final - ln peso inicial) / tiempo] - 100) (%/día). ² AL = *Ocimum basilicum* (albahaca), AR = *Eruca sativa* (arúgula), ES = *Espinacia oleracea* (espinaca), LO = *Lactuca sativa* (lechuga), PC = *Brassica rapa* subsp. *chinensis* (pak-choi). Tratamientos: Q = quimioautotrófico, H = heterotrófico, fotoautotróficos: M = *Chlorella* spp., CV = fotoautotrófico *C. sorokiniana* 2714, y CS fotoautotrófico *C. sorokiniana*-2805 durante la fase inicial de maternidad y la fase de engorda.

8. DISCUSIÓN

8.1 Los sistemas integrados en el futuro inmediato

Los sistemas integrados han ganado terreno como modelos sustentables, ya que permiten reciclar nutrientes, aprovechar la materia prima, incorporar nutrientes residuales a los cultivos y, sobre todo, gestionar un equilibrio dinámico en la producción de nutrientes que mejore la eficiencia en cada fase del sistema (Blidariu y Grozea, 2011; Klinger y Naylor, 2012; Rakocy *et al.*, 2006). Los residuos producidos en una parte del sistema son reciclados por el otro, esta capacidad de reutilizar dichos compuestos ha dado éxito a los sistemas integrados, al reutilizar efluentes para disminuir los costos de inversión, generar menos materia residual, al acoplar dos o más cultivos con la misma materia prima (Figs. 2, 5 y 6). De acuerdo con lo anterior en el presente trabajo, se evalúan las características de dos modelos integrados: SAR y TBF.

EXPERIMENTO I -SAR

8.2 Diseño SAR para regiones áridas y cultivo de tilapia

SAR trabaja en tres líneas: 1. mejorar las técnicas de recirculación, 2. reciclar nutrientes en el cultivo, 3. generar altos rendimientos (Martins *et al.*, 2010) (Fig. 1). La principal característica del sistema SAR en este proyecto fue la unificación de un sistema integrado de tres fases: a) cultivo de tilapia en SAR, b) cultivo hidropónico en camas flotantes, c) cultivo en suelo por fertirrigación, con flujo de nutrientes unidireccionalmente, con objeto de tener tres sistemas de producción soportados en los nutrientes residuales del cultivo de tilapia (Fig. 10). Por ello, para esta etapa piloto, se decidió manejar altas densidades en el cultivo de tilapia (100 peces/m³), utilizar *O. niloticus*, alimentándola con alta proteína a lo largo de todo el experimento (40 %), con altas tasas de alimentación (IDP 1.4, IDP 1.2, IDP 1.0), comenzar a cultivar en verano, con temperaturas en el interior del invernadero de hasta 50°C (Tabla VI). Bajo estas condiciones, se decidió implementar en el primer experimento el diseño de un sistema que permita manejar altas densidades con reciclaje total de la producción de residuos, aplicar tanto la fracción particulada como la fracción

líquida al sistema de cultivo, desarrollar y ejecutar metodologías que permitan optimizar el uso de los residuos en cultivos hidropónicos.

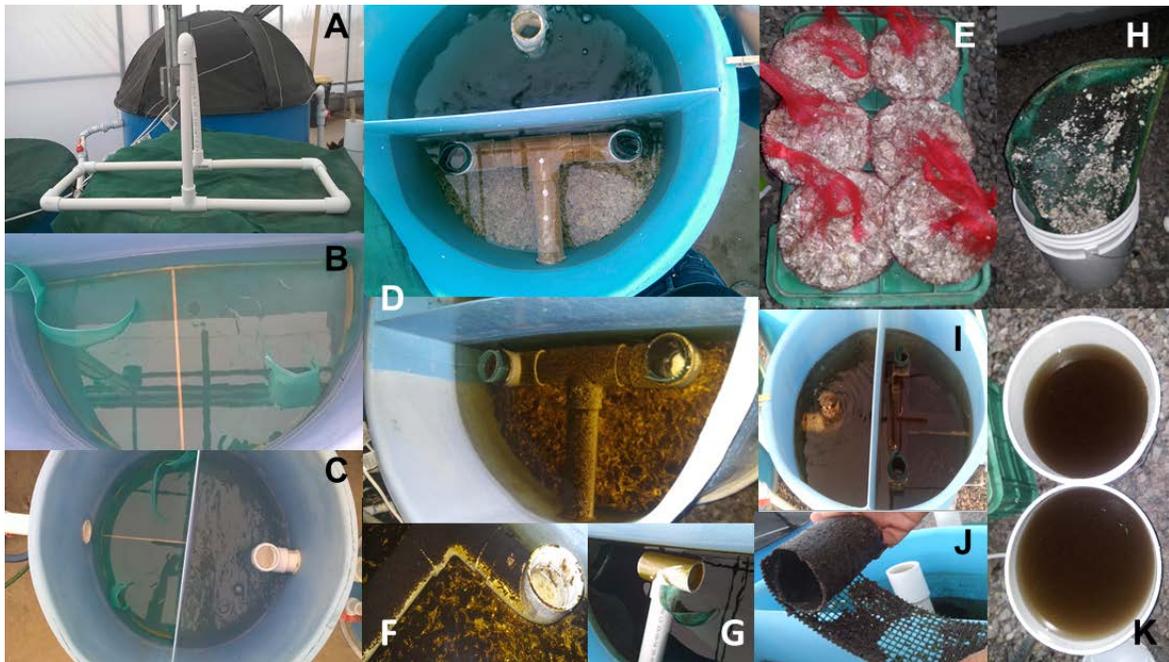


Figura 41. Modificaciones realizadas en el sedimentador. A. soporte del bastidor, B. Estructura de malla, C. ubicación de soporte y marco, D. "t" de pvc para causar flujo lento, E. proyectiles, F y G, tanque de sedimentación en funcionamiento, H, I, J, K. Limpieza del tanque de sedimentación (trabajo).

Dentro de las mejoras desarrolladas en el sistema SAR fue las modificaciones al sedimentador: agregando tres fases: de adhesión por contacto, de sedimentación y el amortiguamiento del pH (Fig. 41). Estas modificaciones fueron necesarias debido a que la implementación de un buen sedimentador ofrece muchas ventajas ya que permite mantener agua de mayor calidad, evita el hacinamiento de la materia orgánica en el biofiltro o en los tanques de cultivo, evita áreas anóxicas o acumulación de amoníaco en el sistema (Fig. 22). La implementación del sistema modificado de sedimentación fue ideal ya que permitió tener una producción de 50 kg/m³. Es importante que los sistemas que manejan los residuales parciales permitan retener y evacuar la materia orgánica (Fimbres, 2015), para esto se desarrolló un proceso de control de materia orgánica de cuatro fases: primera,

detención de partículas fácilmente sedimentables (sedimentador), la segunda obtención de las partículas suspendidas, disminuyendo el flujo de corriente, disponiendo de superficies de contacto, tercero fase de amortiguamiento del pH (clarificador-buffer), y finalmente, una sección para la floculación de partículas disueltas y su filtración, para reducir la carga de materia orgánica y mantener equilibrado el pH (Fig. 41).

Otro componente importante es el biofiltro, el cual desempeña un papel muy específico durante la nitrificación, este componente trabaja con la fracción líquida, y puede llevar a cabo la conversión por oxidación de amonio NH_4 (componente de residuos tóxicos de los peces), y la conversión por el proceso de nitrificación de nitritos NO_2 (tóxicos para el pescado), nitratos NO_3 (compuesto nitrogenado no tóxico para el organismo acuático y de alta necesidad para las plantas). El rendimiento del biofiltro fue adecuado, como se ve en el gráfico de los parámetros químicos (Figs. 22, 37). Los valores de nitritos en el sistema se mantuvieron en niveles aceptables (1.5 mg/L para la tilapia), aunque el amonio se elevó a concentraciones > 50 mg/L, peligrosos para los valores de tilapia, la pérdida de función del biofiltro pudo deberse al crecimiento de la densidad de peces, o a problemas de mala alcalinidad, debido a la disminución del pH (5.6- 5.8) en las últimas temporadas de cultivo (Tabla VI), lo que podría causar una menor eficiencia en el proceso de nitrificación, el pH óptimo para la nitrificación fue de 7.5 a 8.6. La disminución del pH a niveles de biomasa superiores a 18 kg/m^3 indicó que el amortiguamiento del pH estuvo subdimensionado (6 kg de concha por sistema) por lo que se procedió a aumentar a 9 kg de conchas por sistema, para la neutralización del pH se usó una solución de hidróxido de potasio, con ello se pudo mantener en niveles superiores a 6.2.

Un accesorio adicional del sistema SAR fue la mineralización aeróbica. Con base en las observaciones realizadas se puede confirmar que la mineralización aeróbica

es un método lento (30-60 días), pero eficiente para procesar materia orgánica residual, ya que coadyuvó a la generación de comunidades microbiológicas que mineralizaron la materia fecal, lo que permitió su procesamiento de manera inolora con recuperación alta en nutrientes. La mineralización aeróbica es actualmente un proceso ampliamente utilizado por su bajo costo y su fácil aplicación (Uggetti *et al.*, 2010; Rakocy *et al.*, 2005).

Es importante destacar que el éxito de SAR radica en la comprensión de las funciones que cumple cada componente. SAR no es un sistema simple, es un sistema biotecnológico que requiere un monitoreo constante, se considera un sistema de producción de alta tecnología (Badiola *et al.*, 2012) por lo que la formación tiene que ser cuidadosa y necesita una interacción directa entre el operador y los organismos de cultivo.

8.3 Experimento SAR

8.3.1 Calidad del agua en SAR

Los SAR ofrecen una serie de ventajas, produce nutrientes residuales y altos rendimientos que proporcionan las condiciones para una mayor eficiencia económica (Badiola *et al.*, 2012; Graber y Junge, 2009); sin embargo, uno de los principales problemas para el cultivo intensivo es la acumulación de nitrógeno residual (Ebeling *et al.*, 2006). No se encontraron diferencias ($p > 0.05$) entre los tratamientos con respecto a N-NO₃, y IDP 1.0 tuvo el nivel más alto (220 mg/L) sólo en las semanas 29 y 33 ($p < 0.05$) (Fig. 24).

El incremento de la concentración de N-NO₂ después de la semana 5 en todos los tratamientos, que correspondió al nivel más alto en esta semana (1.26, 1.4, y 0.91 mg/L para IDP 1.4, IDP 1.2 y IDP 1.0, respectivamente) (Fig. 24), podría haber sido causado por la densidad y el tamaño de los organismos (Abdul *et al.*, 1999). Fleckenstein *et al.* (2018) y Li *et al.* (2018) refieren valores más bajos para estos componentes. Luo *et al.* (2014) por su parte al comparar un sistema biofloc y SAR

con un cultivo de tilapia, obtuvieron valores más bajos para N-NO₂ y TAN en SAR que en el sistema de biofloc, incluso menores a los reportados en esta investigación. En el caso de la acumulación de P-PO₄, este aumentó después de la semana 17 y continuó hasta la semana 25 (1.1-1.6 mg/L). Posteriormente, la concentración se incrementó (19.6- 32.0 mg/L) sin una diferencia significativa ($p > 0.05$) (Fig. 24).

Las elevadas fluctuaciones en la concentración de N-NH₄, a partir de la semana 4, que continuaron a lo largo del experimento (valores superiores a 50 mg/L) (Fig. 24), podrían haber sido causados por la proteína en la dieta, la variación de la temperatura, el cambio en el pH y el rendimiento del biofiltro de acuerdo con varios autores (Avnimelech, 2006; Badiola *et al.*, 2012; Piedrahita, 2003); sin embargo, a pesar de las dichas variaciones en los parámetros, el cultivo fue estable con base en la elevada supervivencia y ausencia de daño externo en los peces.

El experimento se llevó a cabo a lo largo de tres temporadas (verano, otoño e invierno), aunque la variación de temperatura aumentó durante las 34 semanas (Tabla VI). Los tanques de cultivo se mantuvieron estables y no mostraron temperaturas elevadas ni una evaporación elevada (< 7%), cuando hubo pérdida de agua ésta se reemplazó con agua limpia (datos no mostrados) (Flecha negra, Fig. 24). Este resultado pudo deberse a la presencia de la malla sombra colocada encima del plástico del invernadero que mantuvo con mayor estabilidad las fluctuaciones de temperatura del ambiente externo (Fig. 13). Los parámetros físicos del agua de cultivo se mantuvieron dentro de los valores apropiados referidos para tilapia (DeLong *et al.*, 2009), por ello, no se obtuvieron diferencias significativas entre los tratamientos ($p > 0.05$), aunque la salinidad y conductividad aumentaron, en cambio el OD y el pH disminuyeron al final del experimento (Tabla VI).

8.3.2 Rendimiento del crecimiento

Para la etapa de maternidad, el aumento en talla, peso, supervivencia, y parámetros biológicos fueron ideales (Tabla V). El crecimiento de *O. niloticus* (0.2 a 60 g) (Fig. 23) obtenido fue mayor que el crecimiento reportado por Siddiqui *et al.* (1988)

quienes refieren un crecimiento de 0.83 g a 22.7 g durante 98 días con un FCA de 1.86 más alto que el de este trabajo (FCA de 0.4 a 0.6 g a 0.6, Tabla V). El-Sayed (2002) obtuvo en un experimento con diferentes valores de densidades, un factor de conversión alimenticia (FCA) de 2.65 a 3.45, y una tasa de crecimiento específica (TCE) de 7.78 a 10.0 inferior a este trabajo (TCE 23.9 a 25.7), también obtuvo un FCA 1.27 a 2.98 con diferentes porcentajes de niveles de alimentación (10 a 35). De Oliveira *et al.* (2017) obtuvieron un FCA de 1.0 a 1.2 en peces con un peso de 42.8 a 50.3 g, con una TCE de 4.5 a 4.7% y supervivencia de 75.0 a 96.3%. Abo-State *et al.* (2009) analizaron el crecimiento de la tilapia con 5 dietas diferentes (soja y granos secos destilados con solubles), el experimento comenzó con 1.96-2.05 g de peso y, mostró 1.64-1.83 de FCA, supervivencia > 99.5, y una TCE con 3.3 - 3.5 g/día entre los tratamientos, la TCA m fue mayor que la obtenida en el presente experimento de 2.63 y 2.94 g/día para T1 y T2, la supervivencia fue alta con valores similares a Abo-State y colaboradores (2009), mientras que los valores del FCA en el presente experimento son bajos, lo cual difiere de la literatura disponible (FCA 0.4-0.5) (Tabla V), esto podría deberse a la maternidad realizada dentro de sistemas de biofloc, donde hay reciclaje de nutrientes, heces y alimentos no consumidos, lo que permite generar un suministro adicional de alimentos para el organismo, así también a que el alimento se preparó con 44% de proteína. Otro factor pudo ser la presencia de luz continua en la maternidad, factor que ha sido referido como un estimulador del crecimiento de los peces (Biswas y Takeuchi, 2003). Varios autores (Crovatto-Veras *et al.*, 2013; El-Sayed y Kawanna, 2004), han vinculado el aumento del crecimiento con la incidencia y frecuencia de la luz, lo que puede provocar que los peces se mantengan en alerta, además como el alimento estuvo disponible cada tres horas, pudo favorecer la búsqueda y obtención de alimento.

Al respecto, Ogunji y Wirth (2000) probaron 8 diferentes niveles de dietas proteicas 7.2 - 44.2%, obtuvieron FCA entre 1.19 - 1.7 para descendencia de *O. niloticus* a 4.09-4.82 g de peso inicial, que son valores similares a los obtenidos en este experimento para la TCE. Dichos autores concluyeron que las variaciones en los parámetros biológicos están relacionadas con la cantidad de proteína que contiene

el alimento, bajo la premisa de que alimentos con alta proteína mejoran los resultados de crecimiento y de factores biológicos. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Abdel-Tawwab *et al.* (2010), quienes también probaron diferentes porcentajes de alimentos proteicos y encontraron que la mejor alimentación para la maternidad es de 35% proteína.

Los valores FCA entre 1.5 (Martínez-Córdova *et al.*, 2015) y 2 se consideran el rango óptimo para la mayoría de las especies (DeLong *et al.*, 2009). En tilapia, los valores en SAR están entre 1.0-2.2 y 0.8-3.5 en estanques de tierra y >1.5 en estanques de que cultivo (Leenhouders *et al.*, 2007; Little *et al.*, 2008; Martins *et al.*, 2009). Luo *et al.* (2014), registraron un FCA de 1.5 y un TCE de 1.9 en SAR con organismos que pesaron 138.3 ± 34.6 g, alimentados con 43% de proteína. Para este experimento, esos tamaños se obtuvieron en las semanas 4 y 5, con valores FCA de 0.6, 0.6 y 0.7 en IDP 1.4, IDP 1.2 y IDP 1.0, respectivamente (Fig. 28). A 500 g, el FCA estuvo entre 1.3 y 1.5 en todos los tratamientos (Tabla VIII). Para organismos de 800 g, el mejor FCA se registró en IDP 1.2, a lo largo del experimento; al final, los valores del FCA fueron 2.4 en IDP 1.4 y 2.4 en IDP 1.2, y la TCE presentó un nivel inferior, 0.43 en IDP 1.4 y IDP 1.2 y 0.39 en IDP 1.0 ($p < 0.05$) (Tabla VIII). Los valores para el FCA registrados en México para el cultivo de tilapia en sistemas de tanques fueron más altos (fuentes exógenas de alimentos) (Watanabe *et al.*, 2002). Como resultado, los valores reportados son importantes y pueden ser una referencia para el trabajo futuro basado en la densidad de los organismos cultivados; por lo tanto, las estimaciones de FCA y TCE nos permiten determinar la eficacia de la alimentación en SAR para la tilapia. La duración del experimento fue ideal para obtener organismos de tallas de 350 g, en un lapso de 11.8 ± 0.5 , 12.0 ± 0.4 y 14.0 ± 1.7 semanas en IDP 1.4, IDP 1.2 y IDP 1.0, respectivamente (Tabla VIII). Si bien el objetivo inicial fue alcanzar un peso medio de 500 g; en IDP 1.4, se alcanzaron los 502.2 g a 15.8 semanas, y los de IDP 1.2 alcanzaron 503.2 g a 16.8 semanas; con lo que se logró un nivel de producción de 50 kg/m^3 a las 20.5 semanas en todos los tratamientos.

La diferencia en el crecimiento promedio entre los tratamientos IDP 1.2 y IDP 1.0 fue de aproximadamente 185 g y, el crecimiento en IDP 1.0 no alcanzó 800 g (Tabla VIII). La segunda fase consistió en desafiar el sistema de producción y alcanzar los 80 kg/m³, que se produjo a las 26.9 semanas para el IDP 1.4 y a las 28.2 semanas para el IDP 1.2 (Tabla VIII). Esta producción es innovadora en México, ya que la producción común es de 10 a 12 peces/m³ con una producción total de 6 kg/m³ (datos obtenidos de acuicultores de Sinaloa, México). El no obtener diferencia significativa en el crecimiento entre el IDP 1.4 y el IDP 1.2 ($p > 0.05$) (Fig. 25), sugiere que es posible reducir la ingesta de alimentos sin afectar el crecimiento de los organismos, aunque es fundamental cumplir con el requisito proteico durante el crecimiento, esto es esencial para el éxito del cultivo al ser la proteína el componente principal del cuerpo del pez y el macronutriente más caro en los alimentos (El-Sayed, 2004; Hargreaves, 1998). Abdel-Tawwab *et al.*, 2010 y Larumbe-Móran *et al.*, 2010 indicaron en sus trabajos que el nivel de proteína en la alimentación tiene una fuerte relación con el crecimiento, por lo que se ve significativamente afectado en niveles bajos.

8.3.3 Análisis proximal en la dieta implementada

En el análisis de un alimento comercial con proteína de 41.2% se encontró: Fe 544 mg/kg, Mn de 161 mg/kg, Zn 384 mg/kg y Cu 18 mg/kg. En nuestro caso, la cantidad de Fe (172.9 – 327.8 mg/kg) fue menor y Mn (1725.6 a 2476.1 mg/kg), Zn (122.6 a 255.4 mg/kg) presentaron un nivel más alto y para Cu los datos fueron similares (9.3 a 23.1 mg/kg). La variación de estas composiciones, en especial con los elementos que no son requeridos por las plantas, son de suma importancia ya que estos se acumularan en los residuales y no serán aprovechados en la segunda fase, como sucede con el Na. Una ventaja de la formulación de las dietas 35% y 40% utilizadas en este trabajo fue no encontrar Na (Tabla IX).

Köprücü y Özdemir (2005) diseñaron diferentes dietas y analizaron la digestibilidad de la materia prima (harina de anchoveta, de gluten, de soya, de anfípodos, y exoesqueletos de langostinos), los mejores resultados los obtuvieron con la aplicación de una dieta de 49.5% de proteína, 5.2% de lípidos, 2.2% de fibra y 8.3% de cenizas, el contenido de aminoácidos obtenido por ellos fue de 3.0 g/100 g arginina, 1.2 g/100 g histidina, 2.0 g/100 g 2 isoleucina, 3.5 g/100 g leucina, 3.4 g/100 g lisina, 1.2 g/100 g metionina, 2.0 g/100 g fenilalanina, 2.7 g/100 g de treonina, 2.5 g/100 g de valina, con la dieta de anchoveta. Furuya *et al.* (2004) encontró el mejor crecimiento con una dieta de 31% de proteína, 3.8% de lípidos, y 5.6% de fibra, la dieta usada para esta investigación muestra una mayor cantidad de lípidos, pero valores menores de aminoácidos (Tabla IX y X), lo cual indica un nivel bajo de los aminoácidos esenciales en la dieta, lo que afecta la acumulación de estos en los organismos de cultivo.

8.3.4 Análisis proximal en el cuerpo completo de *O. niloticus*

Azim y Little (2008) encontraron niveles de 55% de proteína, 26% de lípidos, y 17% ceniza en *O. niloticus* (peso húmedo, agua clara, 35% de proteína en el alimento). Hassaan *et al.* (2017) describieron el peso húmedo (cuerpo completo) de tilapias con tamaños de 34.1-38.8 g, con una dieta basal con *Bacillus subtilis* y ácido málico, valores de proteína de 57.6-62.2%, lípidos 17.0-21.8%, y cenizas de 13.4-15.0%. Mansour *et al.* (2018) determinaron valores (peso húmedo) de 15.8-17.0% de proteína, 6.9-7.4% lípidos y 3.3-3.9% ceniza para tilapia juvenil (38.7-49.9 g). Los resultados de los análisis proximales del cuerpo completo indicaron porcentajes de proteína de 48.4-53.9% en la semana 17 y 51.0-60.5% en la semana 34 (Tabla XI) que fueron similares a los mencionados por Azim y Little (2008); sin embargo, el porcentaje de lípidos fue mayor que el encontrado en otras investigaciones, con valores de 20.7-26.2% en la semana 17 y 8.7-28.2% en la semana 34. Los valores de ceniza fueron altos en IDP 1.0 en la semana 34, con 24.7% (Tabla XI).

Los lípidos en el cuerpo completo fueron significativamente diferentes ($p < 0.05$) en el tiempo final entre IDP 1.0 (presentado un nivel bajo 8.7%) y el resto de tratamientos. Altos niveles de ceniza (24.7%) y proteínas (60.6%) se obtuvieron, a pesar de que los valores de lípidos para las semanas 17 y 34 (IDP 1.4, IDP 1.2) fueron altos (Tabla XI), en comparación con los determinados por Michelato *et al.* (2018), quienes encontraron 6.7-3.8% (cloroformo: extracción de metanol) y He *et al.* (2016) quienes en un cultivo de tilapia con suplementación de metionina y taurina; se encontraron valores de 5.7-10.7% de lípidos en organismos de 80.1-90.3 g.). Los altos valores en el cuerpo completo obtenidos en este trabajo podrían haber sido afectados por la proteína del alimento (40% proteína durante todo el cultivo). Taşbozan *et al.* (2013) describieron valores de lípidos de 2.6-3.5%, valores proteicos de 18.8-20.5% y valores de ceniza de 1.1-1.2% en el músculo para 5 especies diferentes de tilapia de un río (Turquía). Liu *et al.* (2018) encontraron valores de lípidos de 0.5-1.3% y valores proteicos de 17.8-19.4% en el músculo (peso húmedo) de tilapia juvenil (34.6–81.1 g), estos valores fueron inferiores a los valores obtenidos en este trabajo; IDP 1.0 obtuvo el valor más alto de lípidos, 3.9%, seguido de IDP 1.4 (3.6%) y IDP 1.2 (3.3%) ($p > 0.05$). IDP 1.2 tuvo el nivel más alto de proteína (87%) y el mejor crecimiento, sin diferencias significativas ($p > 0.05$) entre los tratamientos de IDP más altos.

La relación mg lípido/g proteína en la mitad del experimento (semana 17) se relacionó con la cantidad de alimentos que recibió cada tratamiento: 540.7 mg/g, 424.3 mg/g y 384.9 mg/g en IDP 1.4, IDP 1.2, IDP 1.0, respectivamente (Tabla XI). Al final del experimento no difirió entre IDP 1.4 y IDP 1.2 (546.6 mg/g y 541.4 mg/g), sólo IDP 1.0 (144.4 mg/g) tenía un nivel inferior. Sin embargo, para los filetes, el nivel más alto se obtuvo en IDP 1.0 (47.5 mg/g), seguido de IDP 1.4 (44.2 mg/g) y IDP 1.0 (37.5 mg/g) ($p < 0.05$) (Tabla XI). Ayisi *et al.* (2017) indican valores de 206.7–290.2 mg/g para el cuerpo completo (44.4-49.5 g/org.) (valores calculados con la información del documento de investigación) y 41.9–53.7 mg/g para el filete en tratamientos con un alto nivel de aceite de palma (0% a 8%) en las dietas. Ali y Al-

Asgah (2001) obtuvieron valores de 299.6–341.6 mg/g (datos calculados con la información presentada en el documento de investigación) en *O. niloticus* con la aplicación de dietas con diferentes niveles de carbohidratos y lípidos. La relación de g proteína / mg de lípidos, fue mayor en nuestros resultados para los tiempos medio y final para IDP 1.4 y IDP 1.2; para el músculo, sólo IDP 1.2 fue menor (Tabla XI).

Para DP:DE, el nivel fue mayor en IDP 1.0 en los tiempos medio y final (23.6 y 36.2 g/MJ); sin embargo, para el filete, el nivel más alto se encontró en IDP 1.2 (38.4 g/MJ) (Tabla XI). Estos datos se compararon con (Van Trung *et al.*, 2011); *O. niloticus* con pesos corporales de 10 –1000 g donde obtuvieron valores entre 32.7 – 21.4 g/MJ, los valores disminuyeron a medida que los organismos crecieron. En nuestro caso, el valor aumentó a medida que se incrementó el tamaño de *O. niloticus*. Los resultados obtenidos sugieren que la cantidad de alimentos que cada tratamiento recibió, condicionó el crecimiento de los peces y la proporción de lípidos:proteína en los cuerpos *O. niloticus*, pero no en los filetes.

Seawright *et al.* (1998) encontraron que *O. niloticus* retiene 85 -102% de Ca, 4-6% de Fe, 23 -26% de K, 19-21% Mg, 3% Mn, 42-47% N, 43-57% Na, 51-59% P y 35-39% Zn. En nuestro caso, los valores fueron más altos 2- 257% Ca, 55- 178% Fe, 44-141% K, 36-157% Mg, 0.3 – 1519%, 6.7 -13.9 % N, 32-222% Na, y 18.5 -224% P, 24.1-70 % Zn (Tabla XII), esto pudo deberse al tipo de alimento, a las tallas a las que llegaron los organismos, incluso al tipo de sistema.

La cantidad de Mn que retuvo el organismo presenta una variación más alta durante las diferentes etapas evaluadas, los valores más altos se obtuvieron en tiempo medio, el más bajo en el tiempo final y en el filete (Tabla XII). Durante la comparación de los porcentajes del filete depurado y sin depurar el elemento Potasio disminuyó. Jaeger *et al.* (2019) describen que, en su caso, la tilapia retuvo 19.4 – 24. 3 % de N del alimento, la carpa común del 18.7 – 22.6% y el salmón del

Atlántico 36.5 – 47.1. En nuestro caso la retención de N en el cuerpo completo (6.3-11.6 %) y en el filete (11.6-13.9) de *O. niloticus* fue menor (Tabla XIII).

8.3.5 Caracterización residual del cultivo en SAR

En un estudio, Endo (2012) analizó el flujo de nitrógeno y fósforo y encontró que el 38.2% del nitrógeno y el 50.7% del fósforo de la dieta es retenido por *O. niloticus*, el 3.4% N y el 38.5% P, estaban en la fracción particulada, el 49.3% N (como nitrato) y el 1.4% de P, en la fracción líquida, estos valores muestran concordancia con los resultados obtenidos en este trabajo, en donde además la mayor cantidad de fósforo se obtuvo en la fracción particulada. Para la fracción líquida la cantidad Ca, K y Mg fueron más altas (Tabla XIV) en comparación con Clarkson y South, (1991), quienes obtuvieron 54.4 mg/L Ca, 7.1 mg/L K y 4.1 mg/L de Mg en agua de cultivo.

Goddek *et al.* (2015) analizaron varias soluciones de hidroponía y acuaponía y encontraron valores de Ca 12 -200 mg/L, Mg 6-50 mg/L, Na 14-50 mg/L, K 27-430 mg/L, Fe 0.2 – 5 mg/L, Mn 0.2 -0.8 mg/L, Cu 0.03 - 0.15 mg/L, Zn 0.3 – 0.44 mg/L., estos datos muestran de forma relevante la elevada diferencia entre los niveles de los diferentes macro nutrientes. Se sabe que la calidad de los residuos depende de varias características como la calidad del agua y la composición química, el nivel de proteína en los alimentos, la formulación y la calidad de los minerales en los alimentos, la frecuencia de alimentación, las etapas y la densidad del cultivo (Goddek *et al.*, 2015). Por lo tanto, se considera determinante para el éxito de los sistemas integrados, conocer las características de los residuos de los tres componentes (organismos acuáticos cultivados– residuos – plantas), ya que los macronutrientes aumentaron con el tiempo (Tabla XIV), también es fundamental saber qué tipo de cultivo se quiere implementar, ya que esto permite estimar los tiempos de cada cultivo y posiblemente la cantidad de residuos que se acumularán.

8.3.6 IDP y las estrategias de alimentación

Comprender la implementación de proteína en el cultivo, es el primer paso para obtener cultivos más exitosos y sostenibles. En general, los requerimientos se ajustan al nivel de proteína en el alimento (%) y, no se basan en IDP (g proteína/kg de biomasa). La mayoría de las empresas de alimentos recomiendan aplicar las dietas en función de un porcentaje de peso corporal: 12% del peso corporal en las primeras etapas (maternidad y cría) y porcentajes más bajos (2%) en la última etapa (engorda). Además, los niveles de proteínas y lípidos en la alimentación van de 50% de proteína y 5-15% de lípidos en la primera etapa y, a 25- 30% proteína (25-30%) y lípidos (5-10%) en las etapas terminales (Al Hafedh, 1999; Chou y Shiau, 1996; El-Saidy y Gaber, 2005; Ng y Romano, 2013; Watanabe, 1982).

De la evaluación de al menos seis estrategias de alimentación diferentes y con base en 49 artículos de investigación en los que el tema principal fue la nutrición de la tilapia en donde se consideraron diferentes tamaños y densidades de estos peces (Tabla XV), se obtuvo información muy interesante e importante. Por ejemplo, la principal estrategia de alimentación detectada fue la saciedad, que se utilizó de dos maneras: saciedad durante un tiempo específico (por ejemplo, 10, 30 y 40 minutos), una o dos veces al día, o saciedad donde el organismo marcaba la ración. Sólo un documento de investigación alcanzó el nivel de IDP 1.0, mientras que los otros estudios obtuvieron valores muy por debajo de la gráfica marcada para IDP 1.0, esto indica que los organismos fueron subalimentados, incluso comparándolos con los valores obtenidos para IDP a temperaturas de 24°C – 28°C. En los análisis de alimentos que utilizaban un porcentaje fijo de peso corporal y un porcentaje de peso corporal variable, descubrimos que casi todos los estudios estaban subalimentados, mientras que otros estaban sobrealimentados, y sólo unos pocos se alimentaron adecuadamente (Fig. 29). Asimismo, al comparar con el presente trabajo, hubo diferencias notables en los niveles de IDP para *O. niloticus* en comparación con los estudios publicados y expuestos en la tabla XV. Los resultados sugieren que en dicha información se subestimó la proteína diaria requerida para la tilapia.

Las otras dos estrategias fijaron 1.0 g de alimento por kg de peso corporal metabólico por día o 5.0 g de alimento por cada 100 g de peso corporal por día. En la tabla XV se indican las variaciones en los resultados y la infra-alimentación. No hay un patrón específico para el manejo de la proteína en los alimentos y las raciones en ninguna de las estrategias. La última estrategia fue implementar el IDP a través de funciones matemáticas. Durante la comparación de las condiciones de temperatura de cultivo, peso medio, tasa de alimentación, proteína en alimentos, productividad, crecimiento semanal y biomasa encontró que sólo la IDP trabaja con todas estas condiciones. La IDP es una buena herramienta paramétrica para la alimentación en los SAR (Tabla XVI).

Con base en la información bibliográfica disponible, para SAR, no hay estudios que permitan definir el nivel de alimentación proteica. Toda la nutrición recibida por los SAR proviene del alimento; por lo tanto, es importante implementar una estrategia de alimentación adecuada. La ventaja de utilizar la IDP es que el valor se puede ajustar a las características del cultivo, temperatura, densidad, peso medio, tasa de alimentación, nivel de proteína en el alimento, digestibilidad, productividad en el sistema, crecimiento semanal, biomasa y una cantidad adecuada de alimentos (saciedad). El valor se puede actualizar cada semana, lo que permite un control importante de la ración que reciben los organismos, genera menos residuos. Esta estrategia puede ser buena para los cultivos de SAR, incluso con temperaturas de 30°C y altas densidades (>50 kg/m³).

Los resultados obtenidos en este trabajo indican que la implementación de una estrategia de alimentación relacionada la IDP es una alternativa eficiente y necesaria para aumentar el desempeño de *O. niloticus* en SAR, ya que este método permite suministrar la cantidad indicada de alimentos proteicos en diferentes etapas. Además, este método no se basa sólo en el peso de los peces, sino que tiene en cuenta el contenido de proteínas en los alimentos, lo que evita la

sobrealimentación y la desnutrición. Por lo tanto, al haber utilizado una alimentación proteica alta del 40% en todas las réplicas de SAR, modulada de acuerdo con el peso de *O. niloticus*, permitió obtener excelentes resultados alimentar a los peces con un alto nivel de proteína, recomendado específicamente para la producción en SAR (Craig y Helfrich, 2017). Asimismo, de todos los tratamientos realizados el mejor fue el IDP 1.2. Este nivel permitió un FCA óptimo (1.3) en 500 g y FCA (1.7) a 800 g (Tabla VIII). Hubo diferencia entre los tratamientos IDP 1.2 y IDP 1.0 (casi 180 g). Por lo tanto, con el IDP 1.2 se aplicó una alimentación más eficiente con costos de producción reducidos. Con todos estos resultados, se logró establecer una base para utilizar la IDP que permite alimentar a una alta densidad en climas cálidos y en cultivos con temperaturas superiores a 30°C.

EXPERIMENTO II -TBF

8.4 Experimento TBF

8.4.1 Análisis de agua

Emerenciano *et al.* (2017) determinó los parámetros ideales del biofloc en la acuicultura de peces y camarones. En la comparación de sus valores con respecto a los nuestros, se detectó que el OD permaneció en un rango óptimo durante todo el experimento de esta tesis; sin embargo, los valores de pH en fase de engorda presentaron una tendencia hacia la acidificación (Tabla XVII), esto podría deberse a la retención de agua en el tiempo, el tamaño de los organismos y la temperatura. El rango de temperatura óptimo para el cultivo de tilapia es de 24°C a 32°C (El-Sayed y Kawanna, 2008), valores obtenidos en el presente trabajo durante la fase de engorda, favoreciéndolo como se muestra en la tabla XVII. Este parámetro también está relacionado con la evaporación (cantidad de 31.3 – 45 L por semana); sin embargo, la evaporación total no presentó diferencias entre los tratamientos ($p > 0.05$) (Tabla XVII).

Para el número de compuestos nitrogenados, el tratamiento H presentó niveles bajos de nitritos <3.5 mg/L y Q el nivel más bajo de nitratos (>217.7 mg/L). Mientras

que los tratamientos fotoautotróficos mostraron los valores más altos de estos residuos en ambas fases CS para NH_4 (<175.9 mg/L), NO_2 para CV y CS (<56.1-67.8 mg/L), NO_3 para M y CV (<269-279.4 mg/L) y CV para PO_4 (31.6 mg/L) (Fig. 30). Esto podría deberse a la interacción de los distintos componentes como, la densidad de microalgas, "microalgas muertas", los procesos fotosintéticos relacionados con el "amoníaco/nitrógeno almacenado" y, el nivel proteico de la alimentación de acuerdo con algunos autores (Brune *et al.*, 2003).

La concentración de $\text{NH}_4\text{-N}$ obtenida en nuestro experimento fue mayor que en el estudio de Luo *et al.* (2014), donde la concentración más alta de TAN fue de 60 a 0.45 mg/L, así también superior a la obtenida por Nootong y Pavasant (2011) (< 20 mg/L) y otros autores (Serra *et al.*, 2015) (<5 mg/L). En nuestro experimento, NH_4 fue >100 mg/L después de la semana 28 (Fig. 30), lo que se atribuye a la combinación de varios factores tales como: alta densidad de stock, baja temperatura (la comunidad nitrificante es sensible a los cambios en OD, pH y temperatura) en inicio del experimento, inmadurez del sistema durante las primeras semanas, el nivel de proteína en la alimentación (Azim y Little, 2008b; Ebeling *et al.*, 2006; Figueroa y Silverstein, 1992), así como la cosecha de agua para el experimento hidropónico (no se muestran datos de las semanas 19, 21 y 28).

Por otra parte, la alta acumulación de nitritos exhibe un proceso de baja nitrificación en nuestro sistema y una alta acumulación de nitratos (>250 mg/L) y fosfatos (>30 mg/L), en comparación con los valores encontrados por los autores mencionados anteriormente (nitratos < 25 mg/L; <100 mg/L; < 30 mg/L; fosfatos < 40 mg/L) (Fig. 30). Algo importante a tener en cuenta en el biofloc fotoautotrófico es la vida del ciclo de microalgas, Jung *et al.* (2017) describieron que las microalgas crecen durante tres días y presentan una concentración constante durante seis días antes de que entren en una fase de muerte. Por lo tanto, la metodología implementada en el presente estudio para los tratamientos fotoautotróficos donde se realizó una inoculación semanal, es ideal para mantener las concentraciones de microalgas

cercanas en 10^7 y mantenerlas en la fase de engorda, es importante realizar las cosechas semanales para retirar la microalga y evitar que entre en fase estacionaria o de muerte.

Para los tratamientos fotoautotróficos, cada tanque fue inoculado con cada especie de microalgas cada siete días. De conformidad con los resultados de estos experimentos, todos los tratamientos muestran procesos normales de oxidación y nitrificación de amonio durante el período de cultivo, especialmente antes de la semana 25 (Fig. 30), exceptuando CS y CV para nitritos (Fig. 30b) en las primeras semanas de la fase de maternidad; donde se sospecha que la comunidad nitrificante se formó en los tratamientos quimiotróficos, heterotróficos y M. Después de la semana 25 una acumulación importante de amonio se detectó para todos los tratamientos (Fig. 30a). El tratamiento heterotrófico muestra niveles más bajos de amonio y nitratos, lo que indica que la relación C/N (13: 1) no fue suficiente para contrarrestar la acumulación de amonio (Fig. 30a)

Además, en todos los tratamientos fotoautotróficos, la comunidad de microalgas no pudo contrarrestar la generación de amonio, lo que sugiere un efecto de sombra de la biomasa del biofloc y, por lo tanto, permite procesos de oxidación y nitrificación de amonio natural. Después de la semana 25, la generación de amonio no se neutralizó en ninguno de los tratamientos, y todos muestran altos niveles de amonio, niveles de pH inferiores a 5.6 y niveles elevados de nitratos (Fig. 30a). Como los eventos de oxidación y nitrificación de amonio son procesos de acidificación que transforman NH_4 en NO_3 y disminuyen los niveles de pH a menos de 7.0, lo que influye en el procesamiento de amonio, los resultados sugieren que las fases quimioautotrófica o fotoautotrófica en este nivel de biomasa requieren neutralización periódica del pH para controlar el NH_4 . La fase heterotrófica necesita una relación C/N > 13: 1 y un esfuerzo para neutralizar el pH, como se mencionó anteriormente. Al seleccionar la mezcla alcalina adecuada (Ca/Mg) para neutralizar el pH, se deben considerar las concentraciones de magnesio y calcio necesarias para mejorar el

crecimiento de microalgas y las necesidades de los experimentos hidropónicos, si es necesario (Fig. 30).

8.5 Crecimiento en Tilapia

Algunos autores como Jung *et al.* (2017) al usar *C. vulgaris* y *Scenedesmus obliquus* en cultivo biofloc durante 8 semanas de cultivo de tilapia, no encontraron diferencias en el crecimiento, supervivencia, FCA y TCE ($p > 0.05$), pero el contenido de proteínas y lípidos fue mayor en el tratamiento fotoautotrófico ($p < 0.05$). De Araújo *et al.* (2019) analizaron el crecimiento de *O. niloticus* con diferentes densidades de inoculación de *C. vulgaris* (Control, 2.5×10^4 , 5.0×10^4 , 10×10^4 mg/L) y, encontraron en 63 días valores de TCE 3.8 – 4.0, FCA 1.4-1.5, supervivencia 80-85% y aumento de peso de 18.7-21.6 g. Badwy *et al.* (2008) en una dieta con 50% de reemplazo de *Chlorella* spp. en alevines, encontraron valores de TCE 1.7 y FCA 2.0 (30.7 g de pescado). Durante la comparación de esta información con los datos aquí obtenidos se encontró que en la fase de maternidad en los tratamientos fotoautotróficos a 47.6-54.2 g (semana 20), los valores de FCA 1.3-1.4 fueron más bajos y los TCE 3.2-3.3 más altos (Tabla XVIII). En nuestro caso, los tratamientos fotoautotróficos (M, CV, CS) presentaron el mayor crecimiento (47.6- 54.2 g), TCE (3.2-3.3), FCA 1.3-1.4 y supervivencia ($> 98.8\%$) (Semanas del 1 a la 20), con diferencia significativa ($p < 0.05$), incluso con baja temperatura y alta densidad (180 peces/m³) (Tabla XVIII, Fig. 31). La implementación de tratamientos fotoautotróficos en la fase de maternidad para *O. niloticus* es una buena estrategia para el rendimiento, incluso en condiciones no óptimas (bajas temperaturas, alta densidad, Fig. 31).

El uso de microalgas en biofloc permite obtener mayor supervivencia y mejor crecimiento durante la fase de maternidad, donde la mortalidad es frecuente ($> 20\%$). Las ventajas del crecimiento continuaron hasta la semana 30 para la fase de engorda, incluso con buena supervivencia, pero al final de esta fase, los parámetros biológicos no presentaron diferencias significativas ($p > 0.05$) entre los tratamientos (Tabla XVIII).

8.6 TDS y tamaño de partícula

En el cultivo, los sólidos provienen del alimento residual, las heces, los metabolitos, los microorganismos y el biofilm. Los sólidos sedimentables son fáciles de eliminar (Cripps y Bergheim, 2000), sin embargo, el biofloc presenta partículas en una amplia variedad de tamaños, estas se clasifican en los siguientes rangos: disueltos (0.001 μm), coloidales (0.001 x 1 μm), sólidos súper coloidales (1-100 μm) y sedimentables (>100 μm) (Lekang 2013; Timmons y Ebeling 2013 en Bao *et al.* (2018)). En el presente estudio las partículas súper coloidales y sedimentables fueron las más comunes en la fase de maternidad y en la fase de engorda (Fig. 34). Ekasari *et al.* (2014) en un experimento TBF del cultivo del camarón, detectaron un dominio de las partículas pequeñas (<48 μm) (44.8%), seguido de las partículas >100 μm (29.2%) y 48–100 μm (26%); estos resultados fueron similares a los obtenidos por Castine *et al.* (2013), quienes encontraron que las partículas que oscilan entre 11 y 20 μm son las más abundantes. La divergencia de esos estudios con nuestros resultados puede deberse a la cosecha de agua, la aireación mecánica y la cosecha de floc, intrínseca a nuestro estudio (Fig. 34) (Lekang *et al.*, 2000).

El tamaño de las partículas puede ayudar a controlar las interacciones de las bacterias nitrificantes en el sistema. Lara *et al.* (2017) indicaron que una reducción en el tamaño de partícula en el cultivo de camarones interfirió negativamente con el proceso de nitrificación de TBF. En nuestro estudio, las partículas más pequeñas redujeron el proceso de nitrificación en condiciones fotoautotróficas y dieron como resultado un tamaño de biofloc más bajo en la fase de maternidad (Fig. 34). Por otro lado, el exceso de biofloc puede ser dañino para los camarones y los peces (Emerenciano *et al.*, 2017; Schweitzer *et al.*, 2013). De Araújo *et al.* (2019) analizaron los sólidos sedimentables (conos Imhoff, 30 min) durante 63 días en biofloc con *C. vulgaris* y encontraron niveles de 15-32 mL/L. Estos niveles fueron más bajos que los obtenidos en este trabajo (<200 mL/L para el tratamiento con H y <100 mL/L en los tratamientos fotoautotróficos y Q (Fig. 32). Se encontraron

diferencias significativas en las semanas 9-14 en los volúmenes de biofloc entre los tratamientos H (100-233 mL/L) y Q (38-149 mL/L) en comparación con todos los tratamientos fotoautotróficos (<24 mL/L) (Fig. 32) esto puede atribuirse a la formación de una estructura coloidal (tipo gel "inmune a la gravedad" Graham, 1861 en Gustafsson y Gschwend, 1997) durante el desarrollo del biofloc en condiciones oscuras. Como resultado, los volúmenes estimados a través de conos de Imhoff no fueron similares a los obtenidos con condiciones soleadas fotoautotróficas o al biofloc formado después de 15 semanas en condiciones oscuras en condiciones heterotróficas y quimioautotróficas (Fig. 32). Las partículas coloidales del biofloc fueron más notables en condiciones heterotróficas que en condiciones quimioautotróficas (Fig. 32).

Los niveles de TDS registrados en los tratamientos Q y H durante la fase de maternidad fueron más bajos (> 7 mg/L) (Fig. 33) que los obtenidos por Gallardo-Collí *et al.* (2019) en agua clara 157 mg/L y agua reutilizada (biofloc) 1,543.8 mg/L en tanques de llenado; estos valores disminuyeron al final del período cultivo. Los valores bajos obtenidos en el presente trabajo pudieron deberse a las comunidades microbiológicas en los diferentes niveles tróficos (Natrah *et al.*, 2014).

8.7 Análisis nutricionales en tilapia y floc

8.7.1 Análisis proximales

El TBF tiene un buen efecto en los valores obtenidos de las composiciones proximales en los organismos de cultivo (Ekasari *et al.*, 2010). Diferentes autores sugieren que la implementación de TBF en la fase de maternidad y engorda, proporciona una ventaja para el crecimiento y desarrollo de los organismos (de Oliveira *et al.*, 2017; García-Ríos *et al.*, 2019; Green *et al.*, 2019; Nahar *et al.*, 2015). Los análisis proximales del cuerpo completo en *O. niloticus* no presentaron una diferencia significativa ($p < 0.05$) entre los tratamientos y la fase de crecimiento (maternidad y engorda) (Tabla XIX). Esto podría deberse al floc, porque para el cultivo de SAR durante 40 semanas (si se usa el mismo alimento (40% P) y *O.*

niloticus (Experimento I), (Tabla XII), encontramos que los valores de proteína y lípidos cambian con el tiempo; valores en tiempo medio (48.5 – 53.9% y 20.7 - 26,2%) y tiempo final (51% - 60.6%, 8.8 - 28.2%) respectivamente.

De Sousa *et al.* (2019) utilizaron un subproducto de una pizzería para el cultivo de tilapia con biofloc heterotrófico, encontraron con un 60% de inclusión, de subproducto, valores para proteína del 45.69 % y para lípidos del 37.54 % en el cuerpo completo de *O. niloticus* (10.68 g). Azim y Little (2008a), compararon agua clara y sistema heterotrófico TBF, con un 35 % de proteína en el alimento, valores de proteína en el floc de 53.41% y de lípidos del 27.8. Long *et al.* (2015) describieron para *O. niloticus*, cultivado en biofloc heterotrófico, valores del floc de 51.9 % de proteína y 18.3% de lípidos crudos. Si se compara el contenido de lípidos y proteínas en los últimos trabajos publicados (biofloc heterotrófico), nuestros resultados tienen un nivel importante de componente proteico (50.9% – 56.9%) y menor nivel de lípidos (23.1% - 29.8%) (Tabla XIX) del que obtuvo de De Sousa *et al.* (2019), pero valores similares en Azim y Little (2008) y Long *et al.*, 2015, quienes trabajaron con altos niveles de proteínas en sus cultivos (35% P y 46% respectivamente), lo que podría sugerir que la retención de proteína está ligada a la cantidad de proteína que poseen los alimentos.

En este trabajo, los análisis proximales de todo el cuerpo y la relación mg de lípidos/g proteína en *O. niloticus* no mostro diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los tratamientos tróficos (Fig. 35), incluso entre los tratamientos fotoautotróficos con *Chlorella* spp. *C. sorokiniana*-2714 y *C. sorokiniana*-2805 o entre las fases de crecimiento (maternidad y engorda). Con la inclusión en el alimento balanceado de 186.6 mg de lípidos/g proteína en la alimentación (Tabla X, Fig. 35), se obtuvo en este trabajo un promedio de 503.5 mg de lípidos/g proteína en *O. niloticus*. A modo de comparación, con el cultivo de *O. niloticus* en SAR, durante 40 semanas y mediante la aplicación del mismo alimento (40% de proteína) con 186.6 mg de lípidos/g proteína, se encontró un promedio de 512.5 mg de lípidos/g proteína con

una ingesta diaria de proteínas (IDP 1.2) similar y 264.5 mg de lípidos g proteína cuando el IDP se redujo en un 20% (Tabla XI).

Emerenciano *et al.* (2017), describieron el floc con cultivo de camarón y los valores obtenidos fueron de 18.2 – 43.0% de proteína, lípidos <0.1- 8.0%, 0.8-16.2% de fibra y 13.4-44.8% de ceniza. Estos porcentajes coinciden con los obtenidos para el floc de tilapia (Tabla XXII). Martínez-Córdova *et al.* (2015) generalizaron el contenido de proteína en el floc en 14 a 50% y 1.2 a 9.0% de lípidos. Estos autores describen el análisis aproximado en biofloc con cultivo de camarón, y reportan valores de 18.2 a 43.0% de proteína, 18.1-36.4% de carbohidratos, <0.1 -8.0% de lípidos, 0.8-16.2% de fibra y 13.4-44.8% de ceniza. Azim y Little (2008a), Becerril-Cortés *et al.* (2018) y López-Elías *et al.* (2015) describieron valores del 2.5% - 3.5% de lípidos y 24.1% - 42.0% de proteína para el floc en el cultivo de *O. niloticus*. Los valores de la proteína referidos están dentro del rango de este trabajo, pero el nivel de lípidos es menor al de todas estas referencias.

Asimismo, al comparar nuestros datos obtenidos en biofloc fotoautotrófico con resultados de Jung *et al.* (2017), con de proteína de (18.4%) y lípidos (5.9%) y los datos de Badwy *et al.* (2008) quienes implementaron una dieta con el 50 % de reemplazo de *Chlorella* spp., con valores obtenidos en proteína de 65.5%, de lípidos 13.8% y ceniza 18.1%, se observa que los valores de lípidos son inferiores a los presentados en este trabajo (Tabla XIX). Una respuesta al contenido de proteínas y lípidos podría ser el manejo de biofloc, la cosecha periódica de la fracción sólida, la inoculación de microalgas en el tratamiento fotoautotrófico y la implementación del 40% de la proteína en la alimentación.

En la presente investigación, los valores de proteína y lípidos presentaron los valores más altos en la fase de maternidad con (0.4 -1.1%) de lípidos crudos y (34.7-42.6%) proteína (Tabla XXII). Mabroke *et al.* (2019) probaron la sustitución de harina de pescado por harina de soja al 25% y 50% en sistema biofloc y encontraron

valores de 2.4% y 2.9% en lípidos y 34-36.3% de proteína en floc. Gallardo-Collí *et al.* (2019) obtuvieron niveles de proteína mayores en el floc de 31.9%-47.1% y 29.7%-46.6% donde la proteína aumento con el tiempo en el floc. En nuestro caso el mayor nivel de proteína obtenido en el tratamiento Q con 42.6% fue en la semana 10, en todos los casos los valores son menores y disminuyen con el tiempo en todos los tratamientos (Tabla XXII). Para la semana 30, el nivel de proteína se estabilizo, no presento una diferencia significativa (24.0 % – 27.6 %). Para los lípidos, el nivel es más alto que el nuestro, pero para la ceniza, la investigación actual muestra un nivel más alto (Tabla XXII). En ambos casos, el nivel de lípidos se reduce en el tiempo, 8.0 % a 1.8 % y 10.5 % a 1.1 % semana 14 a 25 y para este caso 1.2 % - 0.06% semana 10 – 40.

8.7.2 Análisis de aminácidos

La proteína del cuerpo del pez se compone de aproximadamente 20 aminoácidos, los aminoácidos esenciales se deben suministrar a través de alimentos (histidina, isoleucina, leucina, lisina, metionina, fenilalanina, treonina, triptófano y valina (Akiyama *et al.*, 1997). Santiago y Lovell (1988), describieron el requerimiento de aminoácidos para tilapia, lisina 5.1%, arginina 4.2%, histidina 1.7%, treonina 3.8%, valina 2.8%, leucina 3.4%, isoleucina 3.1%, metionina 2.7%, fenilalanina 3.8, y triptófano 1% de proteína. Köprücü y Özdemir (2005) obtuvieron el mejor resultado de crecimiento con un alimento compuesto por harina de anchoa, encontraron valores en la dieta de arginina 3.0%, histidina 1.2%, isoleucina 2.2%, leucina 3.5%, lisina 3.4%, metionina 1.2%, fenilalanina 2.0%, treonina 2.7% y valina 2.5%. La dieta utilizada en el presente trabajo muestra valores similares a los autores anteriores; arginina 3.4%, histidina 0.8%, isoleucina 1.4%, leucina 3.3%, lisina 3.5%, metionina 0.9 %, fenilalanina 1.8%, treonina 2.3%, valina 1.9% (Tabla X), pero difiere con Santiago y Lovell (1988) para el triptófano que no se detectó, y niveles más bajos de metionina, fenilalanina y treonina en la dieta (Tabla X).

Tasbozan *et al.* (2013) describieron la composición de aminoácidos para *O. niloticus* (60-10 g, de la granja). En el presente caso, se obtuvieron bajos niveles de casi todos los aminoácidos excepto leucina (Tabla XX). Jung *et al.* (2017) encontraron un nivel más alto en aminoácidos esenciales y no esenciales al usar biofloc con *C. vulgaris* y *Scenedesmus* que el agua con 50% de recarga. Si se comparan estos datos de aminoácidos esenciales con nuestro trabajo, se obtuvieron porcentajes mayores para arginina >2.1%, treonina >0.9%, valina >1.2%, isoleucina >1.0%, leucina >2.5%, metionina > 0.4%, lisina >0.6%, fenilalanina >1.5%, histidina >0.6% 1.1%, 0.7%, 0.8%, 0.7%, 1.2%, 0.5%, 1.4%, 0.7% y 0.5%, respectivamente, que el reportado por los autores mencionados.

Logan *et al.* (2010), obtuvieron valores de aminoácidos producidos en un biorreactor comercial a gran escala: arginina 3.6%, threonina 3.1%, valina 3.5%, isoleucina 3.4%, leucina 5.0%, metionina 1.4%, lisina 4.3%, fenilalanina 3.3%, %. Kuhn *et al.* (2010) al analizar el floc de una procesadora de alimento y efluentes encontraron valores de arginina 3.6%, treonina 1.7%, valina 2.4%, isoleucina 1.5%, leucina 2.3%, metionina 0.5%, lisina 1.5%, fenilalanina 2.0%, histidina 0.9% más alto que los valores reportados para el presente trabajo (Tabla XXI).

El análisis de las relaciones entre el contenido de aminoácidos en los alimentos, el contenido de aminoácidos en el biofloc y el contenido de aminoácidos en todo el cuerpo (cuerpo completo) de *O. niloticus* se presenta en las figuras 36 a-b, y muestra que la alimentación es deficiente en lisina, metionina y treonina, también se detectaron deficiencias sustanciales en lisina, arginina y taurina en el contenido de aminoácidos de biofloc, esto podría estar relacionado con un aumento en el uso de ingredientes vegetales en los alimentos (Akiyama *et al.*, 1997). Estos datos son relevantes, Furuya *et al.* (2001, 2004) indicaron que la lisina y la metionina (He *et al.*, 2013), entre otros, son los aminoácidos más limitantes en la nutrición de los peces, relacionados con el crecimiento de los peces, el rendimiento de los filetes y el costo de las dietas. Por lo tanto, es importante tener en cuenta estos resultados

en futuras investigaciones sobre el contenido de aminoácidos en los alimentos utilizados en la acuicultura de TBF para mejorar el uso de la proteína en el biofloc.

EXPERIMENTO III – Mineralización

8.8 Mineralización de la fracción particulada

8.8.1 Fracción particulada en SAR, TBF

Los residuales de la acuicultura son compuestos nitrogenados, fosforo, entre otros (Bao *et al.*, 2018). Desde años atrás se han descrito las características elementales de los residuales acuícolas sólidos y líquidos, y se han detectado condiciones favorables para su reutilización en cultivos agrícolas (Cripps y Bergheim, 2000; Guangzhi y Auðunsson, 2001; Dediu *et al.*, 2012), sin embargo, también poseen características que no son tan favorables o que impiden que su aplicación sea generalizada (acumulación de Na, antibióticos, patógenos) (Cole *et al.*, 2009; Sapkota *et al.*, 2008). La reutilización de los residuales acuícolas reside en mayor lugar en la fracción líquida, la cual ha sido incorporada a sistemas de acuaponía, hidroponía o en cultivo en suelo (Rakocy *et al.*, 2003; Turcios y Papenbrock, 2014).

Existen 15 nutrientes minerales, generalmente se agrupan en dos categorías: macronutrientes, incluidos nitrógeno (N), azufre (S), potasio (K), calcio (Ca), fósforo (P) y magnesio (Mg), los cuales se requieren en gran cantidad, y micronutrientes o minerales traza, como hierro (Fe), zinc (Zn), manganeso (Mn), flúor (F), cobre (Cu), boro (B), molibdeno (Mo), el cromo (Cr), el yodo (I) y el selenio (Se), que se necesitan en una cantidad relativamente pequeña ($\mu\text{g/d}$), y otros como el sodio (Na) y el cobalto (Co) que solo se requieren en casos específicos (plantas Halofitas), todos estos nutrientes se pueden encontrar en la fracción de particulada recuperada de la actividad acuícola (SAR y TBF) (Tablas XXIV y XXI).

Se ha calculado que del total del N y P contenido en el alimento, el 69- 86% del P (Lazzari y Baldisserotto, 2008) y 54- 72 % de N (Mallekh *et al.*, 2015), terminan como residuales. La relevancia de estos valores consiste en que el P es un recurso finito,

el cual es necesario para el crecimiento vegetal (Ragnarsdottir *et al.*, 2011; Sverdrup y Ragnarsdottir, 2011) con una carencia en muchos suelos agrícolas, por lo cual es aplicado a través de fertilizantes, con costos aproximados al 800% desde la última década (McGill 2012 en Goddek *et al.*, 2019). Su recuperación e implementación es necesaria, si se toma en cuenta que la acuicultura va en aumento tanto en producción como en intensidad, lo que indica de acuerdo con dicha tendencia que estos residuales se seguirán generando; por lo que acoplar esta fracción dentro de sistemas adjuntos es necesaria.

Es por eso que en los últimos años un avance de las nuevas tecnologías para la recuperación e implementación de nutrientes va en incremento (da Silva Cerozi, 2016; Lovley y Phillips, 1986; Parameswaran y Anderson, 2007; Summerfelt *et al.*, 1999), por ejemplo, la recuperación de la fracción de particulada y su uso en la nutrición de las plantas, es una actividad muy reciente (da Silva Cerozi, 2016; Pinho *et al.*, 2017). No obstante esta actividad nos permite recuperar nutrientes importantes como el fósforo, potasio, calcio, magnesio (Fimbres, 2015), por su papel en la nutrición de las plantas y alto precio en el mercado.

El análisis de la fracción particulada de SAR y TBF a los 65 y 70 días (Tabla XXV y XXVI), muestra para los macronutrientes una mayor recuperación de P y Ca en la fracción particulada de SAR y, mayor nivel de Na en TBF aunque con valores similares para K, Mg, S. Para los micronutrientes, SAR recupera mayores valores de Mn, Zn, y Ni, mientras que TBF de Fe, Mo, Cu (Tabla XXV y XXVI). En la comparación de la fracción líquida con la fracción particulada se encontró que el P, y los micronutrientes se acumulan principalmente en la fracción particulada, sin embargo, para el acoplamiento de la acuaponía se ha descrito que hace falta suplementar Fe y Mg, elementos que se encuentran en la fracción particulada (Delaide *et al.*, 2017). Por lo que implementar procesos que permitan recuperar e incorporar esta fracción son necesarios.

Dentro de los factores descritos por diversos autores para la acumulación de nutrientes son, el alimento, la cantidad de proteína que contiene, la densidad de cultivo y, la especie cultivada (Mallekh et al., 2015; Schneider et al., 2005, 2004; G. Sun et al., 2016a). En el presente caso, se utilizó el mismo alimento y la misma especie, por lo que la diferencia obtenida pudiera ser generada por los microorganismos contenidos en el biofloc, quienes secuestran elementos como Mg, Zn, o los factores fisicoquímicos del cultivo, como el pH (Emerenciano *et al.*, 2017).

8.8.2 Caracterización de los residual en el cultivo de *Oreochromis niloticus* en TBF

Los tres nutrientes esenciales principales para el crecimiento de las plantas son N, K y P, de los cuales P es un recurso no renovable y K es escaso para la acuicultura y la agricultura (Goddek *et al.*, 2019). La implementación de sistemas integrados y su importancia consisten en reutilizar estos recursos, ya que los efluentes de la acuicultura son ricos en N y P (Lazzari y Baldisserotto, 2008). Al mismo tiempo, la agricultura carece de estos nutrientes, por lo que aquí es donde la hidroponía tiene un papel importante al combinar esta técnica con la acuicultura para tener éxito. El acoplamiento más común es con SAR, pero TBF se ha adoptado con más frecuencia con *O. niloticus*, por lo que es necesario el acoplamiento con biofloc.

Por lo tanto, el análisis de la calidad nutricional de los residuos es necesario para la hidroponía ya que, en general, quince macro y micronutrientes son esenciales para las plantas (Das y Mandal, 2015; Fageria, 2015). Rakocy y colaboradores (1997) informaron que los efluentes de la acuicultura suministraban al menos 10 nutrientes requeridos por las plantas, aunque comúnmente se deben agregar Ca, K y Fe a las soluciones nutritivas de la acuicultura. Seawright *et al.*, (1998) indicaron que los cambios en la concentración de Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, P y Zn están en función del aumento de la biomasa de *O. niloticus*, situación que fue observado en esta investigación donde los macro nutrientes se acumularon a medida que los organismos crecieron (Tabla XXIV).

El análisis elemental en la fracción sólida (biofloc) de *O. niloticus* TBF mostró el nivel más alto de microelementos en contraste con la fracción líquida, que retuvo niveles más bajos, y con frecuencia carecía de elementos, como Fe, Mn, Mo y Ni (Tabla XXXII). En cambio, la fracción sólida retuvo el nivel más alto de micronutrientes Fe, Mn, Co y macronutrientes como P, Mg, K (Tabla XXV). Seawright y col. (1998) indicaron que la fracción sólida en comparación con *O. niloticus* y el contenido elemental de la planta retuvieron el mayor porcentaje de Cu, Ca, Fe y Zn; También observaron una reducción del porcentaje de contenido elemental en la fracción sólida a medida que aumentaba la biomasa en cultivo. Estos resultados difieren de los de esta investigación donde casi todos los nutrientes aumentaron a medida que aumentaba la biomasa en cultivo. Jiménez- Montealegre *et al.* (2002) encontraron valores de 20 mg/g a 40 mg/g de Fe en los residuales sólidos del cultivo de *O. niloticus*; en contraste, nuestros resultados mostraron valores más bajos de Fe (1.5-2.7 mg/g), lo que podría explicarse porque los tanques de cultivo fueron aislados del suelo en *O. niloticus* TBF.

Para integrar la hidroponía hortícola con *O. niloticus* TBF, es necesario desarrollar metodologías que permitan recuperar nutrientes contenidos en la fracción particulada de TBF, especialmente P, Fe y micronutrientes. Varios autores han descrito metodologías que permiten recuperar estos micronutrientes. mineralización aeróbica, anaeróbica, mezcla aeróbica-anaeróbica y digestión ácida (Crohn, 2004; da Silva Cerozi, 2016; Delaide *et al.*, 2018; Parameswaran y Anderson, 2007). El desarrollo de metodologías de mineralización (Goddek *et al.*, 2019), para procesar la fracción podría ser una forma sostenible de recuperar macro y micronutrientes importantes y dejar de liberar desechos en el medio ambiente; por ejemplo, P es un residuo importante que se encuentra en la fracción particulada en grandes cantidades; por lo tanto, la solubilización de la fracción sólida podría ser un proceso eficiente para reutilizar un recurso no renovable en una horticultura integrada de *O. niloticus* TBF e hidropónica.

8.8.3 Mineralización aeróbica en SAR

Los procesos más comunes para tratar la fracción particulada son: almacenarla en tanques de geo membrana (procesos anaeróbicos) y secarlos al sol, almacenarla en bolsas de polietileno y reutilizar los lixiviados para agricultura, o incluir procesos aeróbicos, sin embargo, su aplicación es escasa. Otro proceso que comienza a describirse y utilizarse es la mineralización; proceso que permite convertir los compuestos complejos de la materia orgánica a compuestos simples (elementos individuales) puede ser llevada por bacterias heterotróficas bajo condiciones aeróbicas y anaeróbicas (Goddek *et al.*, 2019).

La mineralización aeróbica se lleva a cabo por oxidación de la materia orgánica, que es llevada a cabo por la respiración de la comunidad heterotrófica (Goddek *et al.*, 2019). Al comparar los resultados de la fracción particulada de SAR y TBF contra los resultados de la mineralización aeróbica de SAR encontramos aumento en la liberación de P, Fe, Ca, pero una disminución importante de K, Zn y Ni (Tabla XXVII). En relación con la mineralización de la fracción líquida encontramos que es eficiente para macronutrientes como el Ca, Mg, Na pero no para micronutrientes (Tabla XXVI).

Monsees *et al.* (2017) indicaron que durante el proceso de mineralización aeróbica el pH cambio, lo que ocasiono mayor liberación de P, los resultados obtenidos concuerdan con lo descrito anteriormente ya que en este proceso fue donde se detectó mayor cantidad de P con valores de 21.7-23.9 g/L a los 65 días y 98-102.8 g/L para el día 120. También describieron que el P y el Ca fueron los elementos que se recuperaron en mayor cantidad resultados que concuerdan con el presente trabajo.

P, N presentaron variaciones entre incrementos y decrementos durante los 120 días de cultivo, pero K se mantuvo en acumulación constante (Fig. 37), sin embargo, los valores de K encontrados en la mineralización aeróbica fueron mayores que los presentados en SAR y TBF. Esto puede ser debido al secuestro de este elemento

por parte de los microorganismos, o la baja proporción de K en el alimento, por lo que para la reutilización de estos residuales es importante complementar con KOH el cual sirve para amortiguar las caídas de pH en los cultivos acuícolas y suplementar los bajos valores de K para los cultivos hidropónicos o implementar una mineralización química para liberar estos nutrientes. Otro factor importante es la acumulación de Na, este macro elemento puede limitar la reutilización de estos residuales.

Los macronutrientes en la mineralización aeróbica se incrementaron con el tiempo (P, K, Ca, Mg, S, Na, B, Mn, Zn), por lo que no solo es favorable para la liberación de P, sino para la mayoría de los elementos indispensables para la nutrición vegetal (Fageria, 2015; Graber y Junge, 2009); Goddek et al., (2019), indican que la maduración de la mineralización aeróbica se puede llevar de 5 a 30 días en dependencia del sistema, en nuestro caso, si se comparan los requerimientos nutricionales de los vegetales propuestos por Hoagland y Steiner (Hoagland y Arnon, 1950; Steiner, 1961), la mineralización aeróbica alcanzó sus valores desde los primeros días. Estos resultados muestran que la implementación de la mineralización aeróbica puede ser una vía para el manejo y la reutilización de la fracción particulada, al ser un proceso relativamente sencillo, lo que permitiría tener una fuente adicional de nutrientes que pueden ser incorporados conforme el sistema de cultivo lo requiera; lo que concuerda con lo indicado por Monsees *et al.*, (2017), quienes promueven el acoplamiento de un proceso aeróbico u anaeróbico como fuente de nutrientes, que pueden ser reincorporados a sistemas hidropónicos, existen desventajas como un costo adicional para mantener la aireación constante, sin embargo, el aprovechamiento de los nutrientes liberados, a la larga podría promover la independencia de fertilizantes químicos de alto costo. A pesar de que la mineralización aeróbica es un proceso conocido (Delaide *et al.*, 2018; Goddek *et al.*, 2019; Parameswaran y Anderson, 2007) su implementación todavía es poco común.

En el análisis de la Tabla XXIX se encuentra que la mineralización aeróbica nos permite tener un almacenaje de nutrientes de alto valor, inclusive la mineralización de la fracción líquida, al acumular buen nivel de nutrientes, pero este proceso requiere mayor tiempo por la complejidad en su manejo, implementación y costo.

8.8.4 Mineralizaciones químicas y soluciones hidropónicas

La información sobre el uso, aplicación y nutrición de las plantas a través de fertilizantes químicos es extensa (Wang *et al.*, 2008), no obstante es necesario desarrollar sistemas más sostenibles para reducir costos ambientales y económicos que estos fertilizantes generan (Bugbee, 2004) y, en esta línea los cultivos hidropónicos no están exentos

La búsqueda de procesos o metodologías que permitan recuperar elementos finitos como el P, ha ocasionado la implementación de mineralizaciones químicas y de incineración, entre otros. Endo y Takeuchi (2009) describieron la solubilización de macro elementos mediante la aplicación de H_2SO_4 y peróxido de hidrogeno a la fracción particulada recuperada de un cultivo de *O. niloticus*, también mencionan que la mineralización con H_2SO_4 (bajo diversas concentraciones) permite obtener mejores resultados para P, Ca, Fe, ZN, Mg y Cu.

Las soluciones Steiner y Hoagland son los fertilizantes comerciales más comunes en hidroponía y están diseñados para necesidades cosmopolitas (Hoagland y Arnon, 1950; Steiner, 1961), al comparar estas soluciones con los resultados obtenidos en las mineralizaciones químicas; se encontró que la implementación de un proceso de mineralización permite recuperar nutrientes importantes como el fósforo que en muchas regiones es escaso (Jones *et al.*, 2015; Sattari *et al.*, 2012; Wiel *et al.*, 2016). En la Tabla XXIX se presentan los valores obtenidos al aplicar las mineralizaciones químicas y físicas, lo que sugiere que las mineralizaciones acidas permiten mayor recuperación de P, aunque con la mineralización ácida con H_2SO_4 se logra una mayor recuperación de micro nutrientes (Tabla XXX).

Para las plantas de tomate y frutales, el fósforo es un elemento muy importante que promueve el crecimiento de las raíces, mejora la eficiencia en el uso de nutrientes y agua, aumenta el rendimiento (Sattari *et al.*, 2012). El mejor método para recuperar el fósforo son las mineralizaciones ácidas con HNO_2 que permite la recuperación de 312.8 mg/L y H_2SO_4 436.6 mg/L (Tabla XXXI). Además, el proceso de mineralización puede proporcionar algunos nutrientes importantes como el potasio, el calcio y podrían ser una buena fuente de micro elementos (Tabla XXXI).

El tomate es una planta con necesidades muy específicas de nutrientes, esta planta necesita nitrógeno, calcio y potasio en niveles muy altos (Herrera, 2000; Lopez *et al.*, 2011). Al analizar los nutrientes recuperados durante las mineralizaciones químicas y físicas y los requerimientos nutricionales, encontramos que con cualquier proceso se obtienen los valores necesarios de K y N que la planta necesita, pero es necesario complementar con Ca (Tabla XXXI). La complementación de K es necesaria en todos los procesos de mineralización, pero P, Ca y S son idóneos (Tabla XXXI). Sainju *et al.* (2003) indican que las plantas de tomate pueden desarrollarse en suelos con Na a tasas de 80-100 mg/L, solo con HNO_2 se obtuvo una tasa más baja (Tabla XXXI). Los valores obtenidos para P, K, Mg y Ca son mayores que los indicados como idóneos para el tomate por Bardoso (2018), aunque algo importante a considerar es que el tomate en primavera requiere mayores niveles de P, N y K (Sainju *et al.*, 2003). La formulación presente en este trabajo es referente a la primavera, por lo tanto, es importante considerar una formulación especial para diferentes estaciones.

En un cultivo de acuaponía con tilapia y fresa en un sistema de TFN (Villaruel *et al.*, 2011) se obtuvieron valores de K 7.98 ± 4.35 mg/L, Ca 13.0 ± 0.96 mg/L, Mg 1.39 ± 0.77 mg/L, en la solución control, nivel más bajo que el recuperado en el presente trabajo (Tabla XXXI). La fresa tiene un requisito menor que el tomate con relación al nitrógeno, magnesio y boro pero mayor de magnesio, en este caso la

mineralización con H_2SO_4 es adecuada para la recuperación de micro elementos (Tabla XXXI). También los nutrientes que contienen la fracción particulada son suficientes para el cultivo de fresa en soluciones hidropónicas. Solo es importante resaltar el nivel de Na, Villarroel *et al.* (2011) indicaron que el nivel de Na en fresa es 64.6 ± 20.03 a 96.9 ± 41.9 mg/L, por lo que HNO_2 y IN son una buena fuente para usar en cultivo de fresa (Tabla XXXI).

El pepino tiene el menor requerimiento de fósforo que las otras plantas, por lo que todos los procesos de mineralización son buenos, pero necesita complementación de magnesio y azufre. El melón necesita altos niveles de nitrógeno y calcio, pero los niveles que necesita esta planta están incluidos en casi todos los tratamientos (Tabla XXXI). La lechuga tiene el requerimiento más bajo de nutrientes por lo que todos los tratamientos arrojaron valores óptimos para esta planta (Tabla XXX). Todavía no se ha demostrado que el Na sea esencial para la mayoría de las plantas superiores (ciertos tipos de plantas C4 son una excepción). El repollo, los frijoles y el apio son un buen prototipo para usar en aguas hidropónicas con un alto nivel de Na superior a 5 ppm, en este caso, la solución de H_2SO_4 podrían ser una buena opción para este tipo de plantas (Tabla XXIX). Algo importante es el nivel de sodio, cobalto y selenio que se presenta durante el proceso de mineralización, solo la incineración no presentó el nivel de estos elementos.

Sahrawat *et al.* (2006) indican que el ácido sulfúrico permite recuperar mayor cantidad de elementos, también describen que es una manera fácil de usar en el laboratorio, aunque este método necesita un área húmeda, ventilada y segura para su manipulación (Endo y Takeuchi, 2009). El análisis de los resultados en la tabla XXIX, indica que éste es el mejor método para la recuperación de nutrientes. La incineración es un buen método para recuperar hierro y azufre, por lo que la mineralización con H_2SO_4 e incineración son buenas herramientas para la recuperación de microelementos (Tabla XXX).

Las mineralizaciones químicas con HNO_3 y H_2SO_4 permiten recuperar nutrientes de gran valor, sin embargo, esta técnica tiene un alto costo si se usa a gran escala además es necesario realizarla bajo supervisión especializada, debido a los vapores que se puedan liberar de la reacción, por lo que implementar alguna de estas técnicas por parte de los productores, o en granjas sin las instalaciones adecuadas, no se considera factible. Mayor investigación sobre los procesos de mineralización o de procesamiento de la fracción particulada son necesarios.

8.8.5 Manejo de la fracción particulada

La fracción sólida que es retirada de SAR y TBF no se implementa en otro cultivo con regularidad. Dentro de la circulación del flujo en SAR, la fracción particulada es retirada constantemente, a través de filtros, sedimentadores o fraccionadores de espuma, sin embargo, en TBF no existe un proceso en conjunto para retirar esta fracción, por lo que para la integración de sistemas acuícolas con sistemas hidropónicos sin recirculación es necesario unificar este proceso.

EXPERIMENTO IV- Hidroponía

8.9 Experimento hidropónico en TFN

8.9.1 Nutrientes en la fracción líquida

Quince macro y micronutrientes son esenciales para las plantas (Das y Mandal, 2015; Fageria, 2015). Delaide *et al.* (2017), Rafiee y Saad (2005) y Siddiqui y Al-Harbi (1999) observaron una deficiencia de elementos como P, K, Fe, Mn y S en efluentes SAR. En nuestra investigación, sólo cinco (P, Mg, Mo, B y Mn) macro y micronutrientes fueron detectados en cantidades óptimas; por lo tanto, sugerimos que Ca, K, N, S, Fe y Zn (solución de Hoagland) deben añadirse a los efluentes TBF (Tabla XXXII). A pesar de que faltaron algunos nutrientes o se encontraron en bajas concentraciones en nuestros tratamientos, se obtuvieron concentraciones más bajas de estos elementos en efluentes SAR (por ejemplo, Rafiee y Saad, 2005). Además, la retención de macronutrientes fue mayor en los tratamientos fotoautotróficos en comparación con los tratamientos H y Q (Tabla XXXII). Esto

puede estar relacionado con la formulación utilizada para el crecimiento microalgal (en el período de cultivo) y con la naturaleza de la composición microalgal (Mandalam y Palsson, 1998).

8.9.2 Calidad del agua y nutrientes en TBF

La temperatura es uno de los factores más importantes que determinan el crecimiento y desarrollo de peces y plantas (Yan y Hunt, 1999); también influye en la acumulación de agua y nutrientes en los cultivos (Trejo-Téllez y Gómez-Merino, 2012) y, tiene una relación directa con la cantidad de oxígeno consumido por la planta y una relación inversa con el oxígeno disuelto. La temperatura óptima para casi todas las plantas es de 15-30°C, sin embargo, pudiera no ser la ideal para cada especie vegetal, por ejemplo: espinaca (*S. oleracea*) (24-28°C), lechuga (*L. sativa*) (20-25°C) y pak-choi (*B. rapa*) (21°C ideal, 18-25°C) (Mahmud *et al.*, 1999; Trejo-Téllez y Gómez-Merino, 2012), con estos datos se considera que todas las plantas estuvieron dentro el valor óptimo (Tabla XXXIII)

El pH determina la disponibilidad de nutrientes para las plantas. El pH ideal para las plantas es 5.6-6.5 (Parks y Murray, 2011), por lo que las deficiencias de nutrientes podrían ocurrir por debajo de 5 y por encima de 7.5, ya que este parametro afecta la disponibilidad de algunos nutrientes (Parks y Murray, 2011). Si se considera este aspecto, en el presente caso, el pH se logró mantener en todos los tratamientos de 5.7 - 6.0, lo cual fue conveniente para la horticultura hidropónica TFN.

Los iones de sodio (Na⁺) deben de ser monitoreados en los sistemas de recirculación; el nivel de sodio en la solución nutritiva no debe exceder de 100 mg/L para lechuga (*L. sativa*) y 150 mg/L para verduras asiáticas de hoja como pak-choi (*B. rapa*) (Parks y Murray, 2011), teniendo en cuenta estos datos, todos estos niveles fueron superados durante el cultivo de *O. niloticus* en tratamientos heterotróficos, quimioautotróficos y fotoautotróficos de TBF (Tabla XXXII). En este caso, el exceso de Na⁺ podría haberse originado, entre otros factores: (a) a la

presencia de sodio en la solución nutritiva utilizada en el cultivo de los inoculos de *Chlorella*, que debería evitarse en futuras investigaciones, utilizando una solución nutritiva libre de sodio; (b) al contenido de sodio en los alimentos, el cual deben reducirse al nivel mínimo posible mediante una mejor selección de los ingredientes; (c) al contenido de Na⁺ en el agua utilizada en el cultivo de *O. niloticus* en TBF. Este parámetro es importante para manejar la integración de TBF con horticultura TFN. El agua residual de TBF puede ser utilizada en lotes, de acuerdo a las necesidades hidropónicas o cuando esta agua alcance valores críticos de Na, N y P. Para evitar estos problemas, los niveles de sodio pueden ser una referencia para transferir de nutrientes; si no es posible, se deben seleccionar especies vegetales tolerantes a la sal.

Con respecto a los parámetros fisicoquímicos obtenidos en el cultivo de *O. niloticus* en regiones áridas en invierno y verano, estos fueron ideales para el cultivo hidropónico (Tabla XXXIII). Dada la afinidad de las plantas por los nitratos y los fosfatos, los valores obtenidos en este estudio indican que el sistema funciona ya que el nivel de nitrógeno que pudo conservar en el sistema biofloc fue óptimo para el cultivo de plantas en comparación con la solución hidropónica con base en la solución de Hogland (220-240 mg/L de N y 20-32 mg/L de P). Nootong *et al.*, (2011) encontraron niveles de nitrito > 40 mg/L y nitrato > 80 mg/L, que fueron similares a los registrados en esta investigación para nitrato 136.2 -171.8 mg/L y superiores para nitrito 0.1-0.2 mg/L en sus valores finales (semana 40) (Tabla XXXIII).

El nitrato es una de las principales fuentes de N, es un nutriente clave para el crecimiento y desarrollo de las plantas (Wang *et al.*, 2012). Se sabe que el nivel de acumulación de residuos en biofloc es mayor que en aguas claras (SAR) (Fleckenstein *et al.*, 2018; Nootong *et al.*, 2011), pero depende del tipo de cultivo, del grado de nitrificación y eliminación de nitratos (van Rijn *et al.*, 2006), el tamaño del floc en los sistemas TBF (Ekasari *et al.*, 2014); además, estos valores podrían aumentar si se reutiliza el biofloc (Gallardo-Collí *et al.*, 2019b), por lo que es

importante controlar la acumulación en el sistema. Cuando se integra con la hidroponía, el nitrato es una fuente importante de N disponible en plantas superiores, pero un nivel alto puede ser contraproducente porque los nitratos se pueden acumular en las plantas (Medina *et al.*, 2016).

El aumento del nitrógeno residual $\text{NH}_4\text{-N}$ después de la semana 18 (Fig. 30; Tabla XXXIII) pudo ocurrir adicionalmente por el pH bajo, y/o a las cosechas de efluentes del biofloc, los cuales están relacionados con el proceso de nitrificación; Gallardo-Collí *et al.* (2019a) encontraron que la eliminación parcial del biofloc del tanque de cultivo podría estar involucrada en la disminución de la comunidad microbiana asociada al proceso quimioautotrófico, ocasionando variaciones en los procesos de nitrificación.

Los fosfatos requieren una cantidad considerable de energía; son caros y progresivamente escasos. Por lo tanto, es necesario buscar alternativas para este recurso en un futuro próximo (Khan *et al.*, 2009). Además, al encontrarse el fosfato en el suelo, desempeña un papel importante en el suministro de P en las plantas. Por lo que reciclar los efluentes de la acuicultura e implementarlos en un sistema que permitan su recuperación es una buena alternativa para las zonas áridas, se puede hacer un manejo respetuoso con el ambiente de forma eficiente y sostenible (Gyaneshwar *et al.*, 2002). En este estudio la cantidad de fosfatos fue mayor significativamente en los tratamientos autotróficos en la fase de maternidad (semana 1-20) (Tabla XXXIII); sin embargo, este residuo no mostró diferencias significativas entre los tratamientos durante la fase de engorda (Tabla XXXIII). En este sentido el uso de P en el sistema depende de los microorganismos y de la interacción entre las diferentes comunidades (Khan *et al.*, 2009). La transferencia de agua de los tanques TBF a la hidroponía comenzó en la semana 17 y continuó durante seis semanas, lo que podría haber causado la estandarización de la cantidad de fosfatos en los tratamientos (Tabla XXXIII).

González *et al.* (2009) indican que la combinación óptima de NO_3 con NH_4 produjo un mayor crecimiento en ciertas plantas, pero la proporción $\text{NH}_4:\text{NO}_3$ cambia con especies vegetales y con el nivel de desarrollo. La mejor relación $\text{NH}_4:\text{NO}_3$ para arándanos es 50:50 $\text{NH}_4:\text{NO}_3$ y 67:33 $\text{NH}_4:\text{NO}_3$, descrita por Crisóstomo *et al.* (2014), donde a estos valores se encontró mayor crecimiento en fruta. Sin embargo, el tratamiento sin NH_4 obtuvo los mejores resultados para la acumulación de K, Ca, Mg en hojas. Para la cebolla el mejor crecimiento se produjo en la relación 0:100 $\text{NH}_4:\text{NO}_3$; para la albahaca (*O. basilicum*) en 20:80 $\text{NH}_4:\text{NO}_3$; el crecimiento del eneldo no mostró diferencias significativas entre los tratamientos 10:80, 100:0, 0:100, 4:60 $\text{NH}_4:\text{NO}_3$ (González *et al.*, 2009). La mejor relación en el cultivo de tomate en TFN fue 0:100 $\text{NH}_4:\text{NO}_3$ y 12.5:87.5 $\text{NH}_4:\text{NO}_3$; estas proporciones obtuvieron el mejor crecimiento, la mayor superficie y el crecimiento en la hoja (Ismail y Othman, 1995). En este estudio la relación fue mayor en el período de maternidad con valores superiores a 150, que mostraron un desequilibrio con la concentración de estos residuales (alto nivel de $\text{NH}_4\text{-N}$); después de la semana 13 los valores disminuyeron cerca de uno, equivalente a 50:50 (Fig. 38a), lo cual está relacionado con el inicio de las cosechas del efluente en TBF para el experimento hidropónico.

Koerselman y Meuleman (2007), describieron la relación N:P en el tejido de las plantas, encontrando valores de 14:1; si esta relación es alta >16 , indica un exceso de nitrógeno y falta de fósforo; si la relación es baja < 14 , indica un exceso de P e insuficiencia de N. Teniendo en cuenta esta premisa, se compararon diversas soluciones hidropónicas con esta relación y se encontraron valores de 3.3 – 9.2 (Fig. 38b). Q y H en la fase de maternidad tuvieron una relación más alta que la recomendada en todas las soluciones hidropónicas, esto pudo ser ocasionado por la cantidad excesiva de amonio en la fracción líquida y la baja presencia de fósforo (Tabla XXXII). La relación óptima se obtuvo durante las semanas 16 y 22 en los tratamientos fotoautotróficos. La albahaca (*E. sativa*) y la lechuga (*L. sativa*)

crecieron bien en niveles de 150-200 mg/L de N en EC 2.0 dS/m y pH 5.6 (Petropoulos *et al.*, 2016).

La evaporación máxima (90 L por tanque) se produjo en la semana 18 en el tratamiento H (Fig. 39); en general, el promedio fue de 31.4 - 35 L por semana. Este parámetro es relevante en zonas áridas (Han *et al.*, 2019), ya que podría ayudar a diseñar mejores estrategias de cultivo. Las estrategias generales para controlar la evaporación son: cubrir con materiales reflectantes (Avnimelech, 2011), utilizar cubiertas suspendidas o flotantes (Han *et al.*, 2019), pero son costosas y difíciles de encontrar (Verdegem y Bosma, 2009), aumento de la producción por unidad de superficie, reducción de la superficie (modelo pequeño), implementación de un cultivo alternativo (hidroponía), reducción de los alimentos, implementando estrategias naturales (biofloc), lo que ocasiona un aumento en la producción con el mismo recurso hídrico. La unificación de los sistemas de cultivo TBF con hidroponía puede producir un sinergismo que permita explorar diferentes especies de plantas, utilizando el mismo recurso hídrico y aprovechando la gran cantidad de nutrientes residuales. Una de las mejores estrategias podría ser la implementación de cosechas parciales-continuas, que permitan tener a disposición efluentes ricos en nutrientes para hidroponía y un control en la acumulación de residuales de N, Na, y P para acuicultura.

Otra consideración importante para la integración de TBF y TFN son las características de los efluentes: TDS, parámetros físicos, especialmente la conductividad, y la cantidad de macro y micronutrientes que se pueden recuperar en la fracción líquida y sólida y que puede ser utilizada en hidroponía. Las plantas absorben y asimilan los compuestos solubles de las aguas residuales, aunque estas plantas no son eliminadores calificados de sólidos suspendidos (Pan *et al.*, 2007). Por lo tanto, el primer paso para reutilizar las aguas residuales de la acuicultura es asentar los sólidos, seguido de la filtración (Bao *et al.*, 2018). Pan *et al.* (2007) encontraron que la eficacia de la filtración estaba directamente relacionada con el

número de capas en el filtro; en otras palabras, el mayor número de capas en el filtro, ocasionaba el nivel más bajo de sólidos disueltos, totales y volátiles.

En el presente estudio, las aguas residuales se filtraron con un filtro de 5 μm antes de ser transferidas a los tanques hidropónicos; a pesar de las partículas de más de 5 μm dominaban la fracción sólida, las partículas de menos de 5 μm se adhirieron a las raíces de la arúgula (*E. sativa*) y de la espinaca (*S. oleracea*), lo que pudo haber afectado su crecimiento (Tabla XXXIV). Por lo tanto, la implementación de buenas técnicas de filtración es necesaria en estudios adicionales ya que el control del tamaño de las partículas puede ser beneficioso para la hidroponía.

La conductividad ideal para la hidroponía es de 1.5 a 2.5 dS/m. La tolerancia a la conductividad se puede clasificar como: sensible de 0 a 1.5 dS/m; moderadamente sensible de 1.5 a 3.0 dS/m, moderadamente tolerante de 3.0 a 6.0 dS/m y tolerante > 10 dS/m (Trejo-Téllez y Gómez-Merino, 2012). La Figura 40, muestra la clasificación de la conductividad; en este caso Q y H tienen el mejor perfil conductivo para plantas sensibles, por lo que los tratamientos fotoautotróficos fueron ideales para la tolerancia moderada en la fase de maternidad (Fig. 40). En la fase de engorda en las semanas 18-26, la conductividad no mostró diferencias significativas, y los valores fueron ideales para plantas con sensibilidad moderada (Fig. 40). Esta situación se produjo porque en la semana 17 la cosecha de agua comenzó para el experimento hidropónico y continuó durante seis semanas; estos resultados indican la importancia de cosechar agua regularmente del cultivo biofloc.

La concentración de nutrientes debe controlarse continuamente, por lo que el reemplazo del agua puede ser una herramienta para corregir las deficiencias de nutrientes y la conductividad. Shannon y Grieve, 1999, indican que la lechuga *Lactuca sativa* es moderadamente sensible a la sal (1.3 dS/m), y su tolerancia aumenta con la edad, ellos mencionan que las lechugas romanas son en general más tolerantes, el pak-choi (*B. rapa*) acepta valores 3-23 dS/m aunque reduce su

crecimiento 4% cada 1 dS/m; la arúgula (*E. sativa*) es relativamente tolerante a la sal en dependencia del linaje (hasta 30 dS/m) y las espinacas (*S. oleracea*) toleran de 2.0 a 4.4 dS/m. En el presente estudio, los efluentes del agua Q y H fueron ideales para plantas sensibles y moderadamente sensibles y, los tratamientos fotoautotróficos fueron buenos para plantas moderadamente tolerantes y tolerantes (Fig. 40; Tabla XXXII).

La conductividad es uno de los factores que más afecta el éxito del sistema hidropónico (Abou-Hadid *et al.*, 1996). Una ventaja para implementar residuos en biofloc para un cultivo hidropónico es la modulación de la calidad de estos. El tiempo de madurez del cultivo biofloc y la recolección de agua son buenas herramientas para la gestión residual ya que en los sistemas integrados, es importante tener en cuenta las necesidades de los peces y las plantas. La implementación de la gestión individual para biofloc y la hidroponía podría ser una buena técnica para zonas áridas, ya que esta metodología permite recoger agua cuando el sistema biofloc lo necesita y aplicar hidroponía cuando las plantas lo requieran.

La modulación de la conductividad es una herramienta indispensable para integrar TBF con hidroponía y contribuir a diversificar el potencial de la horticultura; por ejemplo Shannon y Grieve (1999) desarrollaron un extenso estudio sobre esta clasificación; las características de la conductividad que pudieran estar condicionadas al tipo de plantas: sensible (0 a 1.5 dS/m): lechuga, yuca, rábano, hinojo, perejil, apio, zanahoria, fresa, cebolla; moderadamente sensible (1.5 a 3.0 dS/m): brócoli, ajo, nabo, pak-choi, repollos, tomate, pepino, rábano y pimienta; moderadamente tolerante (3.0 a 6.0 dS/m): batata, remolacha de mesa, espárragos, espinacas, soja, col rizada, pasto de centeno, patata y verdolagas; tolerante (> 10 dS/m): bledos, césped, remolachas y algodón (Shannon y Grieve, 1999; Trejo-Téllez y Gómez-Merino, 2012).

El aumento de la conductividad observado en el presente estudio pudo deberse a las tasas de evaporación, al aumento de los residuos a lo largo del proceso de cultivo en TBF y a las posibles restricciones en la selección de especies vegetales derivadas de la tolerancia a la conductividad. Tener controlado este parámetro es importante para la integración de TBF y TFN.

8.9.3 Experimento de horticultura hidropónica con plantas de hojas verdes

Según Diem *et al.*, 2017; Licamele, 2009; Rakocy, 2012; Rakocy *et al.*, 1997; Turcios y Papenbrock, 2014, los efluentes de la acuicultura *O. niloticus* en sistemas acuaponicos son favorables para la lechuga (*L. sativa*) y la albahaca (*O. basilicum*); sin embargo, la implementación de efluentes de TBF en hidroponía apenas se han descrito (Pinho *et al.*, 2017); por lo tanto, hasta donde sabemos, este es uno de los pocos estudios donde el agua residual de *O. niloticus* TBF se describe y se utiliza con horticultura hidropónica. Según nuestros resultados, la albahaca (*O. basilicum*) podría alcanzar un buen crecimiento con efluentes TBF de *O. niloticus* a cualquier nivel trófico probado en este estudio; la arúgula (*E. sativa*) crece mejor con el tratamiento Q y la lechuga (*L. sativa*) con Hoagland, y el mejor crecimiento se observó en espinaca (*S. oleracea*) con el tratamiento CS (1228%; cinco semanas) (Tabla XXXIV). Salam *et al.* (2014) obtuvo el 926.18 % de crecimiento en espinaca utilizando un efluente de *O. niloticus* en SAR, y Liang y Chien (2013) obtuvieron el 175% del crecimiento en espinaca en cuatro semanas utilizando una frecuencia de alimentación de seis veces, en maternidad de tilapia roja en sistemas acuaponicos.

Pinho *et al.* (2017), implementaron biofloc heterotrófico con diferentes lechugas en ambiente hidropónico y obtuvieron resultados favorables para la lechuga mantequilla (17.7 SGR); en este estudio, el valor SGR obtenido para lechuga (*L. sativa*) fue de 8.9-17.4 SGR ($p > 0.05$). Castillo-Castellanos *et al.* (2016) refieren un peso húmedo de 18.8 g por planta de lechuga (*L. sativa*) con un rendimiento de 47.9 g m², con el uso de efluentes de acuaponía con *O. niloticus*. En el presente caso, el pesaje húmedo de lechuga (*L. sativa*) fue de 320 g por planta con Hoagland, y se

obtuvieron valores de 35.1-112.9 g por planta con el resto de los tratamientos ($p > 0.05$); por lo tanto, el crecimiento de la lechuga (*L. sativa*) fue irregular y altamente variable. Diver y Rinehart, (2010), declararon que la combinación más común en acuaponía es la tilapia con lechuga, mientras que nuestros resultados evidenciaron que para *O. niloticus* TBF, la mejor combinación se da con la espinaca (*S. oleracea*) y/o pak-choi (*B. rapa*) y/o lechuga (*L. sativa*).

da Rocha *et al.* (2017), compararon el crecimiento de lechuga (*L. sativa*) en hidroponía, acuaponía y acuaponía con biofloc con bagre, ellos encontraron bajo tratamientos similares a esta investigación el mejor peso fresco 38.9 g, peso fresco de raíz 32.1 g y altura de 14.5 cm en la acuaponía con biofloc. Los resultados del crecimiento de albahaca (*O. basilicum*), pak-choi (*B. rapa*) y la arúgula (*E. sativa*) utilizando efluentes de TBF es novedoso, también la descripción de los diferentes niveles tróficos de *O. niloticus* en TBF y la transferencia de lotes de agua a la horticultura hidropónica en lugar de implementar la recirculación como en el modelo de acuaponía.

Oreochromis niloticus en TBF puede contener microorganismos heterotróficos, autotróficos y fotoautotróficos (Burford *et al.*, 2003), pero la mayoría de los sistemas TBF en granjas comerciales utilizan sistemas biofloc "agua verde" (Hargreaves, 2013); en este sentido, los tratamientos fotoautotróficos pueden ser una guía para futuras investigaciones porque los diferentes niveles tróficos en *O. niloticus* en TBF son indispensables para ayudar en el diseño de diversos métodos de acoplamiento con horticultura hidropónica. El éxito en el futuro será la diversificación de sistemas y modelos de producción, por ejemplo, albahaca (*O. basilicum*), pak-choi (*B. rapa*) y arúgula (*E. sativa*) son plantas importantes en la horticultura que pueden ser cultivadas utilizando los residuales de TBF.

La tecnología biofloc es un sistema beneficioso para criar varias especies acuáticas, que incluyen a *Oreochromis* y *Penaeus*. Nuestros resultados constituyen una base

para integrar el cultivo biofloc + hidropónia exitosamente. Love, Fry, *et al.* (2015), utilizaron información de 22 países y detectaron un crecimiento en el cultivo y consumo de plantas combinadas con acuaponía, como albahaca (81%), verduras de ensalada (76%), hierbas (no albahaca) 73%, lechuga y tomates (68%), col rizada (56%), acelgas (55%), pak-choi (51%), pimientos (48%) y pepinos (45%). Esta información, junto con nuestros resultados, confirma que la implementación de efluentes de los sistemas acuícolas (en nuestro caso de TBF) para el crecimiento de plantas es una alternativa favorable para diversificar los modelos de producción.

Si bien, los efluentes de *O. niloticus* en TBF mostraron deficiencias en el contenido de micronutrientes en la fracción líquida, la implementación de procesos para la recuperación de nutrientes de la fracción particulada es una manera factible de desarrollar sistemas más sostenibles. Además, la escasez de agua en zonas áridas es un factor importante y relevante para integrar la acuicultura con la agricultura, donde el desarrollo de sistemas con uso del agua más eficiente es una prioridad. Por lo tanto, el cultivo de *O. niloticus* en TBF en modo fotoautotrófico y su integración con la horticultura hidropónica TFN en un sistema sin recirculación, es beneficiosa en zonas áridas costeras donde el agua escasa.

9. CONCLUSIONES

El diseño e implementación de la Ingesta Diaria de Proteína (IDP) permite mejorar la tasa de crecimiento, el FCA, la supervivencia durante todo el ciclo de cultivo de *O. niloticus* en SAR con biomásas de 50 kg/m³ hasta 80 kg/m³.

La IDP permite mejorar el rendimiento en de contenido de proteína y lípidos en el cuerpo de tilapia, pero no en el filete.

SAR es un modelo adecuado para el cultivo de *O. niloticus* a altas temperaturas y densidades.

La implementación del nivel fotoautotrófico permite mayor crecimiento, mejor rendimiento y supervivencia en cultivos de *O. niloticus* a densidades de 1 kg/m³.

La fase fotoautotrófica genera un ciclo de nitrógeno adecuado para sistemas integrados con horticultura hidropónica en TFN.

Los alimentos comerciales para tilapia muestran una deficiencia en metionina, lisina y treonina que se ve reflejada en el contenido de *O. niloticus* y el floc en los sistemas TBF.

La implementación de la mineralización permite acumular y recuperar nutrientes de alto valor generados en la fracción particulada de SAR y TBF y utilizarlos en horticultura hidropónica en TFN.

Los efluentes generados en un cultivo de TBF a distintos estados tróficos son adecuados para el cultivo hidropónico de lechuga (*Lactuca sativa*), pak-choi

(*Brassica rapa* subsp. *chinensis*), arugula (*Eruca sativa*), espinaca (*Spinacia oleracea*), y albahaca (*Ocimum basilicum*).

10. LITERATURA CITADA

Abdel-Tawwab, M. 2012. Interactive effects of dietary protein y live bakery yeast, *Saccharomyces cerevisiae* on growth performance of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (L.) fry and their challenge against *Aeromonas hydrophila* infection. *Aquac. Int.* 20:317–331.

Abdel-Tawwab, M., M. H. Ahmad, Y. A. E., Khattab, A. M. E., Shalaby. 2010. Effect of dietary protein level, initial body weight, and their interaction on the growth, feed utilization, and physiological alterations of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (L.). *Aquac.* 298:267–274.

Abdelghany, A. E., M. H., Ahmad. 2002. Effects of feeding rates on growth and production of Nile tilapia, common carp and silver carp polycultured in fertilized ponds. *Aqua. Res.* 33(6):415–423.

Abo-State, H. A., A. M. Tahoun, Y. A. Hamouda. 2009. Effect of replacement of soybean by DDGS combined with commercial phytase on Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fingerlings growth performance and feed utilization. *Am. J. Agric. Envir. Sci.* 5:473–479.

Abou-Hadid, A. F., E. M., Abd-Elmoniem, M. Z. El-Shinawy, M. Abou-Elsoud. Electrical conductivity effect on growth and mineral composition of lettuce plants in hydroponic system. *Act. Hort.* 434(199):59-66.

Ahmad, M. H., M. Abdel-Tawwab, Y. a. E. Khattab. 2004. Effect of dietary protein levels on growth performance and protein utilization in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) with different initial body weights. *Proc. 6th Int. Symp. Tilapia Aquac.* 249–263.

Ahmed, N., S. Thompson, M. Glaser. 2018. Global aquaculture productivity, environmental sustainability, and climate change adaptability. *Environ. Manage.* 159–172.

Ahn, Y. H. 2006. Sustainable nitrogen elimination biotechnologies: A review. *Process Biochem.* 41:1709–1721.

Akiyama, T., I. Oohara, T. Yamamoto. 1997. Comparison of essential amino acid requirements with A/E ratio among fish species (Review Paper). *Fish. Sci.* 63:963–970.

- Al Hafedh, Y. S. 1999. Effects of dietary protein on growth and body composition of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* L. *Aquac. Res.* 30:385–393.
- Ali, A., N. Al-Asgah. 2001. Effect of feeding different carbohydrate to lipid ratios on the growth performance and body composition of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fingerlings. *Anim. Res.* 50:91–100.
- Amirkolaie, A. K. 2011. Reduction in the environmental impact of waste discharged by fish farms through feed and feeding. *Rev. Aquac.* 3:19–26.
- Amirkolaie, A. K., J. I. Leenhouders, J. A. J. Verreth, J. W., Schrama. 2005. Type of dietary fibre (soluble versus insoluble) influences digestion, faeces characteristics and faecal waste production in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.). *Aquac. Res.* 36:1157–1166.
- Avnimelech, Y. 2011. Tilapia production using Biofloc Technology saving water, waste recycling improves economics. *Glob. Aquac. Adv.* 66–68.
- Avnimelech, Y. 2007. Feeding with microbial flocs by tilapia in minimal discharge bio-flocs technology ponds. *Aquac.* 264:140–147.
- Avnimelech, Y. 2006. Bio-filters: The need for an new comprehensive approach 34:172–178. 001
- Avnimelech, Y. 2003. Biofloc Technology – A practical guide book control of microbial activity in aquaculture systems: active suspension ponds. *World Aquac.* 34: 19–21.
- Avnimelech, Y. 1999. Carbon/nitrogen ratio as a control element in aquaculture systems. *Aquac.* 176:227–235.
- Ayisi, C. L., J. Zhao, E. J., Rupia. 2017. Growth performance, feed utilization, body and fatty acid composition of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fed diets containing elevated levels of palm oil. *Aquac. Fish.* 2:67–77.
- Azad, A.K., K. Ishikawa, J. C. Diaz-Perez, T. E. –J. Eaton, N., Takeda. 2013. Growth and development of komatsuna (*Brassica rapa* L. *Nothovar*) in NFT (nutrient film technique) system, as influenced by natural mineral. *Agric. Sci.* 04:1–7.
- Azim, M. E., D. C., Little. 2008. The biofloc technology (BFT) in indoor tanks: Water quality, biofloc composition, and growth and welfare of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquac.* 283:29–35.
- Badiola, M., D. Mendiola, J., Bostock. 2012. Recirculating aquaculture systems (RAS) analysis: Main issues on management and future challenges. *Aquac. Eng.* 51:26–35.

- Badwy, T. M., E. M. Ibrahim, M. M. Zeihom. 2008. Partial Replacement of fish meal with dried microalga (*Chorella* spp. and *Scenedesmus* spp) in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). 8th Int. Symp. Tilapia Aquac. 801–808.
- Bahnasawy, M. H. 2009. Effect of dietary protein levels on growth performance and body composition of monosex Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* L. reared in fertilized tanks 8:674–678.
- Bao, W., S. Zhu, G. Jin, Z., Ye. 2018. Generation, characterization, perniciousness, removal and reutilization of solids in aquaculture water: a review from the whole process perspective. Rev. Aquac. 1–25.
- Cardoso, F. B., H. E. Martinez, S. Prieto, J. H. da M. Derly, C. do Carmo, J. G. Barbosa. 2018. Yield and quality of tomato grown in a hydroponic system, with different planting densities and number of bunches per plant. Pesq. Agro. Trop. 48(4), 340-349
- Barrington, K., N. Ridler, T. Chopin, S. Robinson, B. Robinson. 2010. Social aspects of the sustainability of integrated multi-trophic aquaculture. Aquac. Int. 18:201–211.
- Becerril-Cortés, D., M. D. C. Monroy-Dosta, G. M. Emerenciano-Coelho, G. Castro-Mejía, B. S., Schettino Bermúdez, G. Vela Correa. 2018. Effect on nutritional composition of produced bioflocs with different carbon sources (Molasses, coffee waste and rice bran) in Biofloc system. Int. J. Fish. Aquat. Stud. 6:541–547.
- Belal, I. E. H. 2005. A review of some fish nutrition methodologies. Bioresour. Technol. 96:395–402.
- Béné, C., R., Arthur, H. Norbury, E. H. Allison, M. Beveridge, S. Bush, L. Campling, L., W. Leschen, D. Little, D. Squires, S. H. Thilsted, M. Beveridge, M. Troell, M., Williams. 2016. Contribution of fisheries and aquaculture to food security and poverty reduction: Assessing the current evidence. World Dev. 79:177–196.
- Bergheim, A., S. J. Cripps, H. Liltved. 1998. A system for the treatment of sludge from land-based fish-farms. Aquat. Living Resour. 11:279–287.
- Bergheim, A., R. Kristiansen, L. A., Kelly. 1993. Treatment and utilization of sludge from landbased farms for salmon. Tech. Mod. Aquac. 486–495.

- Biswas, A. K., T. Takeuchi. 2003. Effects of photoperiod and feeding interval on food intake and growth rate of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* L. *Fish. Sci.* 69:1010–1016.
- Blidariu, F., A. Grozea. 2011. Increasing the economical efficiency and sustainability of indoor fish farming by means of aquaponics. *Anim. Sci. Biotechnol.* 44:1–8.
- Bolivar, R. B., E. B. T. Jimenez. 2006. Alternate-day feeding strategy for Nile tilapia grow out in the Philippines: Marginal cost – revenue analyses. *N. Am. J. Aquac.* 68:192–197.
- Bosma, R. H., L. Lacambra, Y. Landstra, C. Perini, J. Poulie, M. J. Schwaner, Y. Yin. 2017. The financial feasibility of producing fish and vegetables through aquaponics. *Aquac. Eng.* 78:146–154.
- Brooks, B. W., J. L., Conkle. 2019. Commentary: Perspectives on aquaculture, urbanization and water quality. *Comp. Biochem. Physiol. Part - C Toxicol. Pharmacol.* 217:1–4.
- Brown, J. J., E. P. Glenn, K. M. Fitzsimmons, S. E., Smith. 1999. Halophytes for the treatment of saline aquaculture effluent. *Aquac.* 175:255–268.
- Brune, D. E., G. Schwartz, A. G. Eversole, J. A. Collier, T. E. Schwedler. 2003. Intensification of pond aquaculture and high rate photosynthetic systems. *Aquac. Eng.* 28:65–86.
- Budzich-Tabor, U., A. Rigaud, S. Gomes da Silva, G. van de Walle. 2018. Integrating aquaculture within local communities. Guide. European Commission. 41 pp.
- Bugbee, B., 2004. Nutrient management in recirculating hydroponic culture. In: Proceedings of the south pacific soilless culture conference. M. Nichols, (ed.). *Acta Hort.* 648:99-112. Nutrient management in recirculating hydroponic culture.
- Buhmann, A., J. Papenbrock. 2013. Biofiltering of aquaculture effluents by halophytic plants: Basic principles, current uses and future perspectives. *Environ. Exp. Bot.* 92:122–133.
- Burford, M. A., P. J. Thompson, R. P. McIntosh, R. H. Bauman, D. C. Pearson. 2003. Nutrient and microbial dynamics in high-intensity, zero-exchange shrimp ponds in Belize. *Aquac.* 219:393–411.
- Buzby, K. M., L. S. Lin. 2014. Scaling aquaponic systems: Balancing plant uptake with fish output. *Aquac. Eng.* 63:39–44.

- Campbell, B. M., P. Thornton, R. Zougmore, P. van Asten, L., Lipper. 2014. Sustainable intensification: What is its role in climate smart agriculture? *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 8:39–43.
- Cao, L., Y. Yang, W. M. Wang, A. Yakupitiyage, D. R., Yuan, J. S. Diana. 2008. Effects of pretreatment with microbial phytase on phosphorous utilization and growth performance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquac. Nutr.* 14:99–109.
- Casillas-Hernández, R., F. Magallón-Barajas, G. Portillo-Clarck, F., Páez-Osuna. 2006. Nutrient mass balances in semi-intensive shrimp ponds from Sonora, Mexico using two feeding strategies: Trays and mechanical dispersal. *Aquac.* 258:289–298.
- Castillo-Castellanos, D., I. Zavala-Leal, J. M. J. Ruiz-Velazco, A. Radilla-García, J. T., Nieto-Navarro, C. A., Romero-Bañuelos, J. González-Hernández. 2016. Implementation of an experimental nutrient film technique-type aquaponic system. *Aquac. Int.* 24:637–646.
- Castine, S. A., N. A. Paul, N. M. Magnusson, M. I. R. Bird, M. I. de Nys. 2013. Algal bioproducts derived from suspended solids in intensive land-based aquaculture. *Bioresour. Technol.* 131:113–120.
- Cavalheiro, M. O., E. O. De Souza, P. S. Bora. 2007. Utilization of shrimp industry waste in the formulation of tilapia (*Oreochromis niloticus* Linnaeus) feed. *Bioresour. Technol.* 98:602–606.
- Cerozi, B. S., K. Fitzsimmons. 2017. Phosphorus dynamics modeling and mass balance in an aquaponics system. *Agric. Syst.* 153:94–100.
- Chan, Y. J., M. F., Chong, C. L. Law, D. G. Hassell. 2009. A review on anaerobic-aerobic treatment of industrial and municipal wastewater. *Chem. Eng. J.* 155:1–18.
- Chávez-Crooker, P., J. Obreque-Contreras. 2010. Bioremediation of aquaculture wastes. *Curr. Opin. Biotechnol.* 21:313–317.
- Chen, S., D. Stechey, R. F., Malone. 1994. Suspended solids control in recirculating aquaculture systems. *Develop. Aquac. Fish. Sc.* 27:61-61.
- Chen, S. L., D. E. Coffin, R. F. Malone. 1997. Sludge production and management for recirculating aquacultural systems. *J. World Aquac. Soc.* 28:303–315.
- Jhansi, S. C, S. K. Mishra. 2013. Wastewater treatment and reuse: sustainability options. *Cons. J. Sustain. Dev.* 10:1–15.

- Cho, C. Y., D. P. Bureau. 2001. A review of diet formulation strategies and feeding systems to reduce excretory and feed wastes in aquaculture. *Aquac. Res.* 32:349–360.
- Cho, C. Y., D. P. Bureau. 1997. Reduction of waste output from salmonid aquaculture through feeds and feeding. *Progress. Fish-Culturist* 59:155–160.
- Choo, H. X., C. M. A. Caipang. 2015. Biofloc technology (BFT) and its application towards improved production in freshwater tilapia culture. *Aquac. Aqua. Conserv. Legis.* 8:362–366.
- Chopin, T., J. A. Cooper, G. Reid, S. Cross, S. C. Moore. 2012. Open-water integrated multi-trophic aquaculture: Environmental biomitigation and economic diversification of fed aquaculture by extractive aquaculture. *Rev. Aquac.* 4:209–220.
- Chou, B. S., S. Y. Shiau. 1996. Optimal dietary lipid level for growth of juvenile hybrid tilapia, *Oreochromis niloticus* x *Oreochromis aureus*. *Aquac.* 143:185–195.
- Chou, B. S., S. Y. Shiau, S. S.O. Hung. 2001. Effect of dietary cod liver oil on growth and fatty acids of juvenile hybrid tilapia. *N. Am. J. Aquac.* 63:277–284.
- Clarkson, R., P. South. 1991. Use of a small-scale nutrient-film hydroponic technique to reduce mineral accumulation in aquarium water. *Aquac. Fish. Manag.* 22:37–45.
- Cole, D. W., R. Cole, S. J. Gaydos, J. Gray, G. Hyland, M. L. Jacques, N. Powell-Dunford, C. Sawhney, W. W., Au. 2009. Aquaculture: Environmental, toxicological, and health issues. *Int. J. Hyg. Environ. Health* 212:369–377.
- Coyle, S. D., G. J. Mengel, J. H. Tidwell, C. D., Webster. 2004. Evaluation of growth, feed utilization, and economics of hybrid tilapia, *Oreochromis niloticus* x *Oreochromis aureus*, fed diets containing different protein sources in combination with distillers dried grains with solubles. *Aquac. Res.* 35:365–370.
- Crab, R., Y. Avnimelech, T. Defoirdt, P. Bossier, W. Verstraete. 2007. Nitrogen removal techniques in aquaculture for a sustainable production. *Aquac.* 270(1-4):1-14.
- Crab, R., T. Defoirdt, P. Bossier, W. Verstraete. 2012. Biofloc technology in aquaculture: Beneficial effects and future challenges. *Aquac.* 356–357:351–356.

- Crab, R., M. Kochva, W. Verstraete, Y. Avnimelech. 2009. Bio-flocs technology application in over-wintering of tilapia. *Aquac. Eng.* 40:105–112.
- Craig, S., L. Helfrich. 2017. Understanding fish nutrition, feeds, and feeding. *Virginia Coop. Ext.* 420–256: 1–6.
- Cripps, S. J., A. Bergheim. 2000. Solids management and removal for intensive land-based aquaculture production systems. *Aquac. Eng.* 22(1–2):33–56.
- Crisóstomo, C. M. N., R. A. O. Hernández, M. J. López, C. Manjarrez-Dominguez, A. Pinedo-Alvárez. 2014. Relaciones amonio/nitrato en soluciones nutritivas ácidas y alcalinas para arándano* Ammonium/nitrate ratios in acid and alkaline solutions nutritious blueberry Resumen. *Rev. Mex. Cien. Agríc.* 5:525–532.
- Crohn, D., 2004. Nitrogen Mineralization and its importance in organic waste recycling. *Natl. Alfalfa Symp.* 13-15.
- Crovatto-Veras, G., L. D. Solis-Murgas, P. Vieira-Rosa, Gilberto-Zangeronimo, M., M. S., da Silva-Ferreira, J. A. Solis-De Leon. 2013. Effect of photoperiod on locomotor activity, growth, feed efficiency and gonadal development of Nile tilapia. *Rev. Bras. Zootec.* 42:844–849.
- da Rocha, F. A., F. M. L. Biazetti, M. R. Stech, R. P. da Silva. 2017. Lettuce production in aquaponic and biofloc systems with silver catfish *Rhamdia quelen* L. *Bol. do Inst. Pesca Sao Paulo* 44:64–73.
- da Silva Cerozi, B. 2016. Phosphorus dynamics, mass balance and mineralization in aquaponics systems. PhD Thesis. Univ. Arizona. 132 pp.
- Das, D.K., M., Mandal. 2015. Advanced technology of fertilizer uses for crop production, in: *Fertilizer Technology-I synthesis*. Stud. Press. USA. 18–68 pp.
- Dato-Cajegas, C. R. S., A. Yakupitiyage. 1996. The need for dietary mineral supplementation for Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*, cultured in a semi-intensive system. *Aquac.* 144:227–237.
- Davidson, J., S. T. Summerfelt. 2005. Solids removal from a coldwater recirculating system - Comparison of a swirl separator and a radial-flow settler. *Aquac. Eng.* 33:47–61.
- Day, S. B., K. Salie, H. B. Stander. 2016. A growth comparison among three commercial tilapia species in a biofloc system. *Aquac. Int.* 24:1309–1322.
- De Araújo, M. T., Í. F. M., Braga, S. V. Cisneros S. M. B. C., da Silva, A. O. Galvez, E. de Souza Correia. 2019. The intensive culture of Nile tilapia supplemented

- with the microalgae *Chlorella vulgaris* in biofloc system. Bol. do Inst. Pesca 45(2):1–9.
- De Oliveira A. F. G., F. A. F. Araújo, de A. E. Ramos, T. E., Maldonado, de S. A. Benvindo, T. E. de Alencar. 2017. Effect of the transfer at different moments of juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) to the biofloc system in formation. Aquac. 479:564-570.
- De Schryver, P., R. Crab, T. Defoirdt, N. Boon, W. Verstraete. 2008. The basics of bio-flocs technology: The added value for aquaculture. Aquac. 277:125–137.
- De Silva, S. S., R. M. Gunasekera, K. F., Shim. 1991. Interactions of varying dietary protein and lipid levels in young red tilapia: Evidence of protein sparing. Aquac. 95:305–318.
- De Sousa, A. A., S. M. Pinho, A. N., Rombenso, D. De Mello, G. Lemos, G. Lemos, M. G. C. Emerenciano. 2019. Pizzeria by-product: A complementary feed source for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) raised in biofloc technology? Aquac. 501:359–367.
- Delaide, B., G. Delhaye, M. Dermience, J. Gott, H. Soyeurt, M. H. M. Jijakli. 2017. Plant and fish production performance, nutrient mass balances, energy and water use of the PAFF Box, a small-scale aquaponic system. Aquac. Eng. 78:130–139.
- Delaide, B., S. Goddek, K. J. Keesman, M. H. M. Jijakli. 2018. A methodology to quantify the aerobic and anaerobic sludge digestion performance for nutrient recycling in aquaponics. Biotechnol. Agron. Soc. Environ. 22:106–112.
- DeLong, D. P., T. M. Losordo, J. E. Rakocy. 2009. Tank culture of tilapia. South. Reg. Aquac. Cent. 523–529.
- Diana, J. S., H. S. Eгна, T. Chopin, M. S. Peterson, L. Cao, R. Pomeroy, M. Verdegem, W. T. Slack, M. G. Bondad-Reantaso, F. Cabello. 2013. Responsible aquaculture in 2050: Valuing local conditions and human innovations will be key to success. Biosc. 63:255–262.
- Diem, T. N. T., D. Konnerup, H. Brix. 2017. Effects of recirculation rates on water quality and *Oreochromis niloticus* growth in aquaponic systems. Aquac. Eng. 78:95–104.
- Diop, D., J. Fall, M. Sagne, A. Loum, D. Ndong, M. Diouf, A. Sarr, N. Ayessou, O. T. Thiaw. 2013. Use of biochemically improved shrimp industry waste in fry tilapia (*Oreochromis niloticus*, Linnaeus 1758) Diets: effects on growth performance and carcass composition. J. Biol. Life Sci. 4:328-340.

- Diver, S., L. Rinehart. 2010. Aquaponics — Integration of Hydroponics with Aquaculture. Attra Editorial, USA. 28 pp.
- Dongmeza, E., P. Siddhuraju, G. Francis, K. Becker. 2006. Effects of dehydrated methanol extracts of moringa (*Moringa oleifera* Lam.) leaves and three of its fractions on growth performance and feed nutrient assimilation in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* (L.)). *Aquac.* 261:407–422.
- Ebeling, J. M., M. B. Timmons, J. J. Bisogni. 2006. Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotrophic, autotrophic, and heterotrophic removal of ammonia – nitrogen in aquaculture systems. *Aquac.* 257:346–358. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.03.019>
- Edwards, P., 2015. Aquaculture environment interactions: Past, present and likely future trends. *Aquac.* 447:2–14.
- Ekasari, J. A., S. H. Waluyo, T. Bachtiar, E. H. Surawidjaja, P. Bossier, P. De Schryver. 2014. The size of biofloc determines the nutritional composition and the nitrogen recovery by aquaculture animals. *Aquac.* 426–427:105–111.
- Ekasari, J. A., R. Crab, W. Verstraete. 2010. Primary nutritional content of bio-flocs cultured with different organic carbon sources and salinity. *Hayati J. Biosci.* 17:125–130.
- Ekasari, J. A., D. R. Rivandi, A. P. Firdausi, E. H. Surawidjaja, M. Zairin, P. Bossier, P. De Schryver. 2015a. Biofloc technology positively affects Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) larvae performance. *Aquac.* 441:72–77.
- Ekasari, J., M. Zairin, D. U. Putri, N. P. Sari, E. H. Surawidjaja, P. Bossier. 2015b. Biofloc-based reproductive performance of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* L. broodstock. *Aquac. Res.* 46:509–512.
- El-dahhar, A. A., 2007. Review article on protein and energy requirements of Tilapia and Mullet 2. *J. Arab. Aquac. Soc.* 2(1):28-32.
- El-Saidy, D. M. S. D., M. M. A. Gaber. 2002. Complete replacement of fish meal by soybean meal with dietary L-lysine supplementation for Nile tilapia *Oreochromis niloticus* (L.) Fingerlings. *J. World Aquac. Soc.* 33:297–306.
- El-Saidy, D. M. S. D., M. M. A. Gaber. 2005. Effect of dietary protein levels and feeding rates on growth performance, production traits and body composition of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (L.) cultured in concrete tanks. *Aquac. Res.* 36:163–171.

- El-Sayed, a-F. M. 2004. Protein nutrition of farmed tilapia: searching for unconventional sources. *New Dimens. farmed tilapia Proc. Sixth Int. Symp. Tilapia Aquac.* 364–378.
- El-Sayed, a-F. M., A. G. J. Tacon, A. G. J., 1997. Fishmeal replacers for tilapia: A review. *Cah. Options Méditerranéennes* 22:205–224.
- El-Sayed, a-F. M., 2002. Effects of stocking density and feeding levels on growth and feed efficiency of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) fry. *Aquac. Res.* 33:621–626.
- El-Sayed, a-F. M., 1998. Total replacement of fish meal with animal protein sources in Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (L.), feeds. *Aquac. Res.* 29:275–280.
- El-Sayed, a-F. M., M. Kawanna. 2008. Optimum water temperature boosts the growth performance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fry reared in a recycling system. *Aquac. Res.* 39:670–672.
- El-Sayed, a-F. M., M. Kawanna. 2004. Effects of photoperiod on the performance of farmed Nile tilapia *Oreochromis niloticus*: I. Growth, feed utilization efficiency and survival of fry and fingerlings. *Aquac.* 231:393–402.
- Emerenciano, C. G. M., G. Gaxiola, G. Cuzon. 2013. Biofloc Technology (BFT): A review for aquaculture application and animal food industry, in: *Biomass now - cultivation and utilization.* USA. 301–328 pp.
- Emerenciano, C. G. M., L. R. Martínez-Córdova, M. Martínez-Porchas, A. Miranda-Baeza. 2017. Biofloc Technology (BFT): A tool for water quality management in aquaculture. *World's Larg. Sci., Technol. Med. Open Access B. Chapter 5., USA*, 91–109 pp.
- Endo, M. 2012. Nitrogen and mineral budgets in a 189-day feeding experiment with tilapia *Oreochromis niloticus* in recirculating fish culture system. *The Books of Abstracts of JSPS-NRCT Inter. Symp. Joint Seminar, Sufficiency Ec. Phil. Sust. Developpt. of Fishery*, 1-45.
- Endo, M., T. Takeuchi. 2009. Solubilization of solid waste discharged from freshwater recirculating fish culture system by chemical digestion for production of liquid fertilizer. *Eco-Engineer.* 21:103–109.
- Endut, A., A. Jusoh, N. Ali, W. B. Wan Nik, W., A. Hassan. 2010. A study on the optimal hydraulic loading rate and plant ratios in recirculation aquaponic system. *Bioresour. Technol.* 101:1511–1517.
- Endut, A., Lananan, F., S. H. Abdul Hamid, A. Jusoh, W. N. Wan Nik. 2016. Balancing of nutrient uptake by water spinach (*Ipomoea aquatica*) and

- mustard green (*Brassica juncea*) with nutrient production by African catfish (*Clarias gariepinus*) in scaling aquaponic recirculation system. *Desalin. Water Treat.* 3994:1–10.
- Ergün, S., M. Soyutürk, B. Güroy, D. Güroy, D. Merrifield. 2009. Influence of Ulva meal on growth, feed utilization, and body composition of juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) at two levels of dietary lipid. *Aquac. Int.* 17:355–361.
- Essa, M. A., S. S. El-Serafy, M. M. El-Ezabi, S. M. Daboor, N. A., Esmael, S. P. Lall. 2010. Effect of different dietary probiotics on growth, feed utilization and digestive enzymes activities of Nile tilapia. *J. Arab. Aquac. Soc.* 5: 143–162.
- Fageria, V. D. 2015. Nutrients interactions in crop plants. *J. Plant Nutr.* 4167:1269–1290.
- FAO, 2018. The State of world Fisheries and Aquaculture. Meeting the sustainable goals. Rome, Italy. 2010 pp.
- FAO, 2016. The State of World Fisheries and Aquaculture. Rome, Italy. 200 pp.
- FAO, 2009a. How to Feed the World in 2050? Rome, Italy. 220 pp.
- FAO, 2009b. Global agriculture towards 2050. The challenge. Rome, Italy. 200 p.
- FAO, 2017. World Aquaculture 2015: A Brief overview. FAO Fisheries and Aquaculture Report. 1140.
- FAO, 2014. The State of World Fisheries and Aquaculture. Rome, Italy, 200 pp.
- Fasakin, E. A., R. D. Serwata, S. J. Davies. 2005. Comparative utilization of rendered animal derived products with or without composite mixture of soybean meal in hybrid tilapia (*Oreochromis niloticus* x *Oreochromis mossambicus*) diets. *Aquac.* 249:329–338.
- Figueroa, L. A., J. Silverstein. 1992. The effect of particulate organic matter on biofilm nitrification. *Water Environ. Res.* 64(5):728-733.
- Fimbres, 2015. Caracterización de los nutrientes de interés hidropónico contenidos en la fracción particulada residual de cultivo de tilapia (*Oreochromis* spp.). Tesis Maestría. Centro de Investigaciones Biologicas del Noroeste, S. C., 120 pp.
- Fisheries Agency of Japan, 1995. A report of research for measures of fish culture - investigation program for creation of guidelines for fish culture- (in Japanese)

- 水産庁, 1995: 魚類養殖対策調査報告書-養殖ガイドライン作成検討事業-. 水産庁, 東京. Fish. Agency Japan. Tokyo, Japan. 312 pp.
- Fitzsimmons, K. M. 2000. Tilapia: the most important aquaculture species of the 21st century, in: Proceedings from the Fifth Inter. Symp. on Tilapia Aquac.. Rio de Janeiro, Brazil. 3-8.
- Fleckenstein, L. J., T. W. Tierney, A. J. Ray. 2018. Comparing biofloc, clear-water, and hybrid recirculating nursery systems (Part II): Tilapia (*Oreochromis niloticus*) production and water quality dynamics. *Aquac. Eng.* 82:80–85.
- Fontainhas-Fernandes, A., E. Gomes, M. A. Reis-Henriques, J. Coimbra. 1999. Replacement of fish meal by plant proteins in the diet of Nile tilapia: Digestibility and growth performance. *Aquac. Int.* 7:57–67.
- Fournier, V., R. Me, C. Vachot, J. Moriceau, H. Le Delliou, C. Huelvan, E. Desbruyeres, S. J. Kaushik. 2003. Excess dietary arginine affects urea excretion but does not improve N utilisation in rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* and turbot *Psetta maxima*. *Aquac.* 217(1-4):559–576.
- Froehlich, H. E., C. A. Runge, R. R. Gentry, S. D. Gaines, B. B. Halpern. 2018. Comparative terrestrial feed and land use of an aquaculture-dominant world. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 115:5295–5300.
- Furuya, W. M., L. E. Pezzato, M. M. Barros, A. C. Pezzato, V. R. B., Furuya, E. C. De Miranda. 2004. Use of ideal protein concept for precision formulation of amino acid levels in fish-meal-free diets for juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.). *Aquac. Res.* 35:1110–1116.
- Furuya, W. M., L. E. Pezzato, A. C. Pezzato, M. M. Barros, E. C. De Miranda. 2001. Coeficientes de digestibilidade e valores de aminoácidos digestíveis de alguns ingredientes para tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*). *Rev. Bras. Zootec.* 30:1143–1149.
- Gaber, M. M. 2006. The effects of plant-protein-based diets supplemented with *Yucca* on growth, digestibility, and chemical composition of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*, L) fingerlings. *J. World Aquac. Soc.* 37:74–81.
- Gallardo-Collí, A., C. I. Pérez-Rostro, M. P. Hernández-Vergara. 2019a. Reuse of water from biofloc technology for intensive culture of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*): effects on productive performance, organosomatic indices and body composition. *Int. Aquat. Res.* 11(1):43-55.

- Gallardo-Collí, A., C. I. Pérez-Rostro, M. P. Hernández-Vergara, I. A. Pérez-Legaspi. 2019b. Microeukaryote community and the nutritional composition of the biofloc during Nile tilapia culture in water-reusing biofloc systems. *Aquac. Int.* 27(2):381-398.
- Ganguly, S., K. C. Dora, S. Sarkar, S. Chowdhury. 2013. Supplementation of prebiotics in fish feed: A review. *Rev. Fish Biol. Fish.* 23:195–199.
- García-Ríos, L., A. Miranda-Baeza, C. M. G. Coelho-Emerenciano, J. A. Huerta-Rábago, P. Osuna-Amarillas. 2019. Biofloc technology (BFT) applied to tilapia fingerlings production using different carbon sources: Emphasis on commercial applications. *Aquaculture* 502:26–31.
- Garfí, M., J. Martí-Herrero, A. Garwood, I. Ferrer. 2016. Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 60: 599–614.
- Ghazalah, A. A., H. M. Ali, E. A. Gehad, Y. A. Hammouda, H. A. Abo-State. 2010. Effect of probiotics on performance and nutrients digestibility of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fed low protein diets. *Nat. Sci.* 8:46–53.
- Goddek, S., B. Delaide, U. Mankasingh, K. V. Ragnarsdottir, H. Jijakli, R. Thorarinsdottir. 2015. Challenges of sustainable and commercial aquaponics. *Sustain.* 7:4199–4224.
- Goddek, S., A. Joyce, B. Kotzen, G. M. Burnell. 2019. Aquaponics food production systems. combined aquaculture and hydroponic production technologies for the future. Springer. USA. 630 pp.
- Godfray, H. C. J., J. R. Beddington, I. R. Crute, L. Haddad, D. Lawrence, J. F. Muir, J. Pretty, S. Robinson, S. M. Thomas, C. Toulmin. 2010a. Food security: the challenge of feeding 9 billion people. *Science* 327:812–8.
- Godfray, H. C., J. Charles, I. R. Crute, L. Haddad, D. Lawrence, J. F. Muir, N. Nisbett, J. Pretty, S. Robinson, C. Toulmin, R. Whiteley. 2010b. Introduction: The future of the global food system. *Philos. Trans. Biol. Sci.* 365:2769–2777.
- González, G. J. L., M. M. de las N. Rodríguez, G. P. Sánchez, A. E. A. Gaytán. 2009. Relación amonio/nitrato en la producción de hierbas aromáticas en hidroponía* Ammonium/nitrate ratio in the production of aromatic herbs in hydroponics. *Agric. Técnica en México* 35: 5–11.
- Graber, A., R. Junge. 2009. Aquaponic Systems: Nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. *Desalin.* 246(1-3):147–156. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.03.048>

- Green, B. W., S. D. Rawles, K. K. Schrader, G. Gaylord, M. E. McEntire. 2019. Effects of dietary protein content on hybrid tilapia (*Oreochromis aureus* × *O. niloticus*) performance, common microbial off-flavor compounds, and water quality dynamics in an outdoor biofloc technology production system. *Aquac.* 503:571-582.
- Guangzhi, G., G A. Auðunsson. 2001. Mass balance and water quality in aquaculture tanks. *Fish. Traininig. Prog. Icelandic Fish. Lab.* 31 pp.
- Guimarães, I. G., L. E. Pezzato, M. M. Barros. 2008. Amino acid availability and protein digestibility of several protein sources for Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Aquac. Nutr.* 14:396–404.
- Gullian-Klanian, M., C. Aramburu-Adame. 2013. Performance of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* fingerlings in a hyper-intensive recirculating aquaculture system with low water exchange. *Lat. Am. J. Aquat. Res.* 41(1):150–162.
- Gupta, M. V, B. O. Acosta. 2014. A review of global tilapia farming practices. *Aquac. Asia.* 9:7-12.
- Gustafsson, C., P. M. Gschwend. 1997. Aquatic colloids: Concepts, definitions, and current challenges. *Limnol. Oceanogr.* 42:519–528.
- Gyaneshwar, P., G. N. Kumar, L. J. Parekh, P. S. Poole. 2002. Role of soil microorganisms in improving P nutrition of plants. *Plant. Soil.* 245: 83–93.
- Hagopian, D. S., J. G. Riley. 1998. A closer look at the bacteriology of nitrification. *Aquac. Eng.* 18:223–244.
- Han, K.-W., K.-B. Shi, X.-J. Yan, Y. Y. Cheng. 2019. Water savings efficiency of counterweighted spheres covering a plain reservoir in an arid area. *Water Resour. Manag.* 33:1867–1880.
- Hargreaves, J. A. 2013. Biofloc production systems for aquaculture. *SRAC Publ.* 1–12 pp.
- Hargreaves, J. A. 1998. Nitrogen biogeochemistry of aquaculture ponds. *Aquaculture* 166:181–212.
- Hassaan, M. S., M. A. Soltan, A. M. Abdel-Moez. 2015. Nutritive value of soybean meal after solid state fermentation with *Saccharomyces cerevisiae* for Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Anim. Feed Sci. Technol.* 201:89–98.

- Hassaan, M. S., M. A. Soltan, S. Jarmołowicz, H. S. Abdo. 2017. Combined effects of dietary malic acid and *Bacillus subtilis* on growth, gut microbiota and blood parameters of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquac. Nutr.* 24(1):83–93.
- He, J. Y., L. X. Tian, A. Lemme, C. Figueiredo-Silva, W. Gao, H. J. Yang, B. Han, S. L. Zeng, Y. J. Liu. 2016. The effect of dietary methionine concentrations on growth performance of juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fed diets with two different digestible energy levels. *Aquac. Nutr.* 23(1):76-89.
- He, J. Y., L. X. Tian, A. Lemme, W. Gao, H. J. Yang, J. Niu, G. Y. Liang, P. F. Chen, Y. J. Liu. 2013. Methionine and lysine requirements for maintenance and efficiency of utilization for growth of two sizes of tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquac. Nutr.* 19:629–640.
- Heinsbroek, L. T. N., A. Kamstra.1990. Design and performance of water recirculation systems for eel culture. *Aquac. Eng.* 9:187–207.
- Herrera, A. L. 2000. Nutrient Solution Management in the Hydroponic Production of Tomato.
- Hilborn, R., J. M. L. Orensanz, A. M. Parma. 2005. Institutions, incentives and the future of fisheries. *Phil. Tran. of the Royal Soc. B: Biolog. Sci.* 360(1453):47-57.
- Hoagland, D. R., D. I. Arnon. 1950. The water-culture method for growing plants without soil. *Calif. Agric. Exp. Stn. Circ.* 347:1–32.
- Horwitz, W., G. Latimer (Eds.). 2005. Official methods of analysis of AOAC International., 18th ed. Association of Official Analytical Chemistry International, Maryland, USA. 138 pp.
- Hubacek, K., D. Guan, A. Barua. 2007. Changing lifestyle ad cosumption patterns in developing contries. *White Rose Res. Online* 39:1084–1096.
- Hunter, M. C., R. G. Smith, M. E. Schipanski, L. M. Atwood, D. A. Mortensen. 2017. Agriculture in 2050: Recalibrating targets for sustainable intensification. *Biosc.* 67:386–391.
- Hussein, E. E. S., K. Dabrowski, D. M. S. D., El-Saidy, B. J. Lee. 2013. Enhancing the growth of Nile tilapia larvae/juveniles by replacing plant (gluten) protein with algae protein. *Aquac. Res.* 44:937–949.
- Hutchinson, W., M. Jeffrey, D. O’Sullivan, D. S. Casement, S. Clarke. 2004. Recirculating aquaculture systems minimum standards for design, construction and managment. *Intl. Aquac. Assoc. South Aust. Inc.* 70.

- Ismail, M. R., A. A. Othman. 1995. Ammonium (NH_4^+): Nitrate (NO_3^-) ratio and its relation to the changes in solution pH, growth, mineral nutrition and yield of Tomatoes grown in Nutrient Film Technique. *J. Trop. Agric.* 18:149–157.
- Jaeger, C., P. Foucard, A. Tocqueville, S. Nahon, J. Aubin. 2019. Aquacultural Engineering Mass balanced based LCA of a common carp-lettuce aquaponics system. *Aquac. Eng.* 84:29–41.
- Jiménez- Montealegre, R., M. Verdegem, J. E. Zamora, J. Verreth. 2002. Organic matter sedimentation and resuspension in tilapia (*Oreochromis niloticus*) ponds during a production cycle. *Aquac. Eng.* 26:1–12.
- Jones, C., S. Nomosatryo, S. A. Crowe, C. J. Bjerrum, D. E. Canfield. 2015. Iron oxides, divalent cations, silica, and the early earth phosphorus crisis 135–138.
- Jones, Jr. J. B. 2004. Hydroponics: A practical guide for the soilless grower. Second Edition. CRC Press. USA. 440 pp.
- Hermoso, J. P., E. P. Messina, A. M. Baeza, L. R. Córdoba, M. T. Wing, M. Segovia. 2016. Effect of four different pretreatments in nitrogen and phosphorus flow and mass balance in effluents of a recirculating aquaculture system 31: 21–34.
- Jung, J., J. H. Damusari, Y. Park, K. Kim, M. Seong, H-W. Je, S. Kim, S. C. Bai. 2017. Autotrophic biofloc technology system (ABFT) using *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus obliquus* positively affects performance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Algal Res.* 27:259–264.
- Kasper, C. S., P. B. Brown. 2003. Growth improved in juvenile Nile tilapia fed phosphatidylcholine. *N. Am. J. Aquac.* 65:39–43.
- Kasper, C. S., M. R. White, P. B. Brown. 2000. Choline is required by tilapia when methionine is not in excess. *J. Nutr.* 130:238–242.
- Khan, A. Z. M. S., M. Ahemad, M. Oves. 2009. Plant growth promotion by phosphate solubilizing bacteria. *Acta Microbiol. Immunol. Hung.* 56:263–284.
- Khan, M. S. K., M. A. M. Siddique, H. Zamal. 2013. Replacement of fish meal by plant protein sources in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) diet: Growth performance and utilization. *Iran. J. Fish. Sci.* 12:855–863.
- Klinger, D., R. Naylor. 2012. Searching for Solutions in Aquaculture: Charting a Sustainable Course. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 37:247–276.

- Koch, J. F., S. D. Rawles, C. D. Webster, V. Cummins, Y. Kobayashi, K. R. Thompson, A. L. Gannam, R. G. Twibell, N. M. Hyde. 2016. Optimizing fish meal-free commercial diets for Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Aquac.* 452:357–366.
- Koerselman, W., A. F. M. Meuleman. 2007. The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation. *J. Appl. Ecol.* 33:1441–1450.
- Köprücü, K., Y. Özdemir. 2005. Apparent digestibility of selected feed ingredients for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquac.* 250:308–316.
- Kuhn, D. D., A. L. Lawrence, G. D. Boardman, S. Patnaik, L. Marsh, G. J. Flick. 2010. Evaluation of two types of bioflocs derived from biological treatment of fish effluent as feed ingredients for Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*. *Aquac.* 303:28–33.
- Kumar, G., C. R. Engle. 2016. Technological advances that led to growth of shrimp, salmon, and Tilapia farming. *Rev. Fish. Sci. Aquac.* 24:136–152.
- Lara-Flores, M., M. A. Olvera-Novoa, B. E. Guzmán-Méndez, W. López-Madrid. 1995. Use of the bacteria *Streptococcus faecium* and *Lactobacillus acidophilus*, and the yeast *Saccharomyces cerevisiae* as growth promoters in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquac.* 216:193–201.
- Lara, G., D. Krummenauer, P. C. Abreu, L. H. Poersch, W. Jr. Wasielesky. 2017. The use of different aerators on *Litopenaeus vannamei* biofloc culture system: effects on water quality, shrimp growth and biofloc composition. *Aquac. Int.* 25:147–162.
- Larumbe-Morán, E., M. P. Hernandez-Vergara, M. A. Olvera-Novoa, C. Pérez-Rostro. 2010. Protein requirements of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fry cultured at different salinities. *Aquac. Res.* 41(8):1150–1157.
- Lazzari, R., B. Baldisserotto. 2008. Nitrogen and phosphorus waste in fish farming. *Bol. do Inst. Pesca Sao Paulo* 34:591–600.
- Leenhouders, J. I., R. C. Ortega, J. A. J. Verreth, J. W. Schrama. 2007. Digesta characteristics in relation to nutrient digestibility and mineral absorption in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) fed cereal grains of increasing viscosity. *Aquac.* 273:556–565.
- Lekang, O.-I., A. Bergheim, H. Dalen. 2000. An integrated wastewater treatment system for land-based fish farming. *Aquac. Eng.* 22:199–211.

- Lenz, G. L., E. G. Durigon, K. R. Lapa, M. G. C. Emerenciano. 2017. Produção de alface (*Lactuca sativa*) em efluentes de um cultivo de tilápias mantidas em sistema BFT em baixa salinidade. Bol. do Inst. Pesca Sao Paulo 43:614–630.
- Li, L., W. Ren, C. Liu, S. Dong, Y. Zhu. 2018. Comparing trace element concentrations in muscle tissue of marbled eel *Anguilla marmorata* reared in three different aquaculture systems. Aquac. Environ. Interact. 10:13–20.
- Liang, J. Y., Y. H. Chien. 2013. Effects of feeding frequency and photoperiod on water quality and crop production in a tilapia-water spinach raft aquaponics system. Int. Biodeterior. Biodegrad. 85:693–700.
- Licamele, J. 2009. Biomass production and nutrient dynamics in an aquaponics system. PhD Thesis. In Partial fulfillment of the requirements for the degree of the Graduate College. University of Arizona Arizona, USA. 173 pp.
- Lin, J.-H., Y. Cui, S. S. O. Hung, S.-Y. Shiau, 1997. Effect of feeding strategy and carbohydrate source on carbohydrate utilization by white sturgeon (*Acipenser transmontanus*) and hybrid tilapia (*Oreochromis niloticus* x *O. aureus*). Aquac. 148(2-3):201-211.
- Lin, S., L. Luo. 2011. Effects of different levels of soybean meal inclusion in replacement for fish meal on growth, digestive enzymes and transaminase activities in practical diets for juvenile tilapia, *Oreochromis niloticus* x *O. aureus*. Anim. Feed Sci. Technol. 168:80–87.
- Lin, Y. F., S. R. Jing, D. Y. Lee, T. W. Wang. 2002. Nutrient removal from aquaculture wastewater using a constructed wetlands system. Aquac. 209:169–184.
- Little, D. C., F. J. Murray, E. Azim, W. Leschen, K. Boyd, A. Watterson, J. A. Young. 2008. Options for producing a warm-water fish in the UK: limits to “Green Growth”? Trends Food Sci. Technol. 19:255–264.
- Liu, W., H. Wen, Z. Luo. 2018. Effect of dietary protein levels and feeding rates on the growth and health status of juvenile genetically improved farmed tilapia (*Oreochromis niloticus*) Aquac. Int. 26(1):153–167.
- Liu, X., H. Xu, X. Wang, Z. Wu, X. Bao. 2014. An ecological engineering pond aquaculture recirculating system for effluent purification and water quality control. Clean - Soil, Air, Water 42:221–228.
- Long, L., J. Yang, Y. Li, Y. C. Guan, F. Wu. 2015. Effect of biofloc technology on growth, digestive enzyme activity, hematology, and immune response of

- genetically improved farmed tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquac.* 448: 135–141.
- López-Elías, J. A., A. Moreno-Arias, A. Miranda-Baeza, L. R. Martínez-Córdova, M. E. Rivas-Vega, E. Márquez-Ríos. 2015. Proximate composition of bioflocs in culture systems containing hybrid red tilapia fed diets with varying levels of vegetable meal inclusion. *T. N. Am. J. Aquac.* 77:102–109.
- López, A. P. P., M. A. Cano-Montes, G. Rodríguez De la Rocha, F. N. Torres, R. S. M. Rodríguez, R. E. Rodríguez. 2011. Efecto de diferentes concentraciones de potasio y nitrógeno en la productividad de tomate en cultivo hidropónico. *Tecn. Chih.* 52(2):98–104.
- Dediu, L., V. Cristea, Z. Xiaoshuan. 2012. Waste production and valorization in an integrated aquaponic system with bester and lettuce. *African J. Biotechnol.* 11(9):2349–2358.
- Losordo, T. M., M. P. Masser, J. E. Rakocy. 1999. Recirculating aquaculture tank production systems: An overview of critical considerations. *SRAC, Publication.* 451-451:18–31.
- Loum, A., M. Sagne, J. Fall, D. Ndong, M. Diouf, A. Sarr, T. O. Thiom. 2013. Effects of dietary protein level on growth performance, carcass composition and survival rate of fry monosex Nile Tilapia, *Oreochromis niloticus* reared under re-circulating system. *J. Biol. Life Sci.* 4:13–22.
- Love, D. C., J. P. Fry, X. Li, E. S. Hill, L. Genello, K. Semmens, R. E. Thompson. 2015a. Commercial aquaponics production and profitability: Findings from an international survey. *Aquac.* 435:67–74.
- Love, D. C., M. S. Uhl, L. Genello. 2015b. Energy and water use of a small-scale raft aquaponics system in Baltimore, Maryland, United States. *Aquac. Eng.* 68:19–27.
- Lovley, D. R., E. J. P. Phillips. 1986. Organic matter mineralization with reduction of ferric iron in anaerobic sediments. *Appl. Environ. Microbiol.* 51:683–689.
- Luo, G., Q. Gao, C. Wang, W. Liu, D. Sun, L. Li, H. Tan. 2014. Growth, digestive activity, welfare, and partial cost-effectiveness of genetically improved farmed tilapia (*Oreochromis niloticus*) cultured in a recirculating aquaculture system and an indoor biofloc system. *Aquac.* 422–423:1–7.
- Mabroke, R. S., O. M. El-husseiny, A. E. F. A. Zidan, A. Tahoun, A. Suloma. 2019. Floc meal as potential substitute for soybean meal in tilapia diets under biofloc system conditions *. *J. Oceanol. Limnol.* 37:313–320.

- Mahmud, T. M. M., J. G. Atherton, C. J. Wright, M. F. Ramlan, S. H. Ahmad. 1999. Pak choi (*Brassica rapa* spp. *Chinensis* L) quality response to pre-harvest salinity and temperature. *J. Sci. Food Agric.* 79:1698–1702.
- Mallekh, R., T. Boujard, J. O. Lagardère. 2015. Evaluation of retention and environmental discharge of nitrogen and phosphorus by farmed Turbot (*Scophthalmus maximus*). *N. Am. J. Aquac.* 62:141–145.
- Mamun, S. M., U. Focken, K. Becker. 2007. Comparison of metabolic rates and feed nutrient digestibility in conventional, genetically improved (GIFT) and genetically male (GMNT) Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (L.). *Comp. Biochem. Physiol. - A Mol. Integr. Physiol.* 148:214–222.
- Mandalam, R. K., B. Ø. Palsson. 1998. Elemental balancing of biomass and medium composition enhances growth capacity in high-density *Chlorella vulgaris* cultures. *Biotechnol. Bioeng.* 59:605–611.
- Mansour, A. T., E. A. Omar, T. M. Srour, M. I. Yousef. 2018. Effect of three natural phytochemicals supplementation on growth performance, testosterone level and feed utilization of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquac. Nutr.* 24:408–415.
- Martínez-Córdova, L. R., M. G. C. Emerenciano, A. Miranda-Baeza, M. Martínez-Porchas. 2015. Microbial-based systems for aquaculture of fish and shrimp: An updated review. *Rev. Aquac.* 7:131–148.
- Martínez-Córdova, L. R., M. Martínez-Porchas, M. G. C., Emerenciano, A. Miranda-Baeza, T. Gollas-Galván. 2017. From microbes to fish the next revolution in food production. *Crit. Rev. Biotechnol.* 37: 287–295.
- Martínez-Porchas, M., F. Vargas-Albores. 2017. Microbial metagenomics in aquaculture: a potential tool for a deeper insight into the activity. *Rev. Aquac.* 9:42–56.
- Martins, C. I. M., E. H. Eding, M. C. J. Verdegem, L. T. N. Heinsbroek, O. Schneider, J. P. Blancheton, E. Roque d'Orbcastel, J. A. J. Verreth. 2010. New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability. *Aquac. Eng.* 43:83–93.
- Martins, C. I. M., D. Ochola, S. S. W. Ende, E. H. Eding, J. A. J. Verreth. 2009. Is growth retardation present in Nile tilapia *Oreochromis niloticus* cultured in low water exchange recirculating aquaculture systems? *Aquac.* 298: 43–50.

- Masser, M. P., J. E. Rakocy, T. M. Losordo, 1999. Recirculating aquaculture tank production systems - Management of recirculating systems. Souther Reg. Aquac. Cent. SRAC. 452.
- McKennedy, J., O. Sherlock. 2015. Anaerobic digestion of marine macroalgae: A review. *Renew, Sust. Energy Rev.* 52:1781-1790.
- Medina, M., K. Jayachandran, M. G. Bhat, A. Deoraj. 2016. Assessing plant growth, water quality and economic effects from application of a plant-based aquafeed in a recirculating aquaponic system. *Aquac. Int.* 24:415–427.
- Michael-Kordatou, I., C. Michael, X. Duan, X. He, D. D. Dionysiou, M. A. Mills, D. Fatta-Kassinos. 2015. Dissolved effluent organic matter: Characteristics and potential implications in wastewater treatment and reuse applications. *Water Res.* 77:213–248.
- Michelato, M., W. M. Furuya, D. M. Gatlin III. 2018. Metabolic responses of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* to methionine and taurine supplementation. *Aquaculture* 485:66–72.
- Midilli, A., H. Kucuk, I. Dincer. 2012. Environmental and sustainability aspects of a recirculating aquaculture system. *Environ. Sci. Technol.* 33:482–489.
- Milstein, A., M. Zoran, M. Kochba, Y. Avnimelech. 2002. Effect of different management practices on water quality of intensive tilapia culture systems in Israel. *Aquac. Int.* 9:133–152.
- Fernandes, P., L. F. Pedersen, P. B. Pedersen. 2015. Interactions between micro-particles and the rearing environment in recirculating aquaculture systems. PhD Thesis. Technical University of Denmark. 117 pp.
- Mirzoyan, N., R. C. McDonald, A. Gross. 2012. Anaerobic treatment of brackish aquaculture sludge: An alternative to waste stabilization ponds. *J. World Aquac. Soc.* 43:238–248.
- Mjoun K, A. Kurt, M. L. Brown. 2010. Tilapia: Environmental biology and nutritional requirements. South Dakota State University. 8 pp.
- Mohanta, K. N., S. C. Rath, K. C. Nayak, C. Pradhan, T. K. Mohanty, S. S. Giri. 2016. Effect of restricted feeding and refeeding on compensatory growth, nutrient utilization and gain, production performance and whole body composition of carp cultured in earthen pond. *Aquac. Nutr.* 23(3):460-469.
- Monroy-Dosta, M. del C., R. De Lara-Andrade, J. Castro-Mejía, G. Castro-Mejía, M. G. C. Emerenciano. 2013. Composición y abundancia de comunidades

- microbianas asociadas al biofloc en un cultivo de tilapia. *Rev. Biol. Mar. Oceanogr.* 48:511–520.
- Monsees, H., J. Keitel, M. Paul, W. Kloas, S. Wuertz. 2017. Potential of aquacultural sludge treatment for aquaponics: Evaluation of nutrient mobilization under aerobic and anaerobic conditions. *Aquac. Environ. Interact.* 9:9–18.
- Moura, R. S. T., W. C. Valenti, G. G. Henry-Silva. 2016. Sustainability of Nile tilapia net-cage culture in a reservoir in a semi-arid region. *Ecol. Indic.* 66: 574–582.
- Muga, H. E., J. R. Mihelcic. 2008. Sustainability of wastewater treatment technologies. *J. Environ. Manage.* 88:437–447.
- Nahar, A., A. B. M. Siddik, M. R. Chaklader, M.A. Hanif, M. R. Sharker, M. M. Rahman. 2015. Biofloc technology in aquaculture systems generates higher income in mono-sex Nile tilapia farming in Bangladesh. *Adv. Biol. Res. (Rennes)*. 9:236–241.
- Natale, F., J. Hofherr, G. Fiore, J. Virtanen. 2013. Interactions between aquaculture and fisheries. *Mar. Policy* 38:205–213.
- Natrah, F. M. I., P. Bossier, P. Sorgeloos, F. M. Yusoff, T. Defoirdt. 2014. Significance of microalgal-bacterial interactions for aquaculture. *Rev. Aquac.* 6:48–61.
- Naylor, R. L., R. J. Goldberg, J. H. Primavera, N. Kautsky, M. C Beveridge, J. Clay, C. Folke, J. Lubchenco, H. Mooney, M. Troell. 2000. Effect of aquaculture on world fish supplies. *Nature* 405:1017–24.
- Naylor, R. L., R. W. Hardy, D. P. Bureau, A. Chiu, M. Elliott, A. P. Farrell, I. Forster, D. M. Gatlin, R. J. Goldberg, K. Hua, P. D. Nichols. 2009. Feeding aquaculture in an era of finite resources. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 106:15103–15110.
- Ng, W. K., C. Y. Chong, Y. Wang, N. Romano. 2013. Effects of dietary fish and vegetable oils on the growth, tissue fatty acid composition, oxidative stability and vitamin E content of red hybrid tilapia and efficacy of using fish oil finishing diets. *Aquac.* 372:97-110.
- Ng, W. K., N. Romano. 2013. A review of the nutrition and feeding management of farmed tilapia throughout the culture cycle. *Rev. Aquac.* 5:220–254. <https://doi.org/10.1111/raq.12014>

- Nguyen, T. N., D. A. Davis, I. P. Saoud. 2009. Evaluation of alternative protein sources to replace fish meal in practical diets for juvenile tilapia, *Oreochromis* spp. *J. World Aquac. Soc.* 40:113–121.
- Nguyen, V. C. N., K. Fricke. 2015. Application of co-anaerobic digester's effluent for sustainable agriculture and aquaculture in the Mekong Delta, Vietnam. *Environ. Technol.* 36:2991–2999.
- Nootong, K., P. Pavasant, S. Powtongsook. 2011. Effects of organic carbon addition in controlling inorganic nitrogen concentrations in a biofloc system. *J. World Aquac. Soc.* 42:339–346.
- Norman-López, A., T. Bjørndal. 2009. Is Tilapia the same product worldwide or are markets segmented? *Aquac. Econ. Manag.* 13:37–41.
- Novak, J. T., S. Banjade, S. N. Murthy. 2011. Combined anaerobic and aerobic digestion for increased solids reduction and nitrogen removal. *Water Res.* 45:618–624.
- Ogello, E. O., J. M. Munguti, Y. Sakakura, A. Hagiwara. 2014. Complete replacement of fish meal in the diet of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) grow-out with alternative protein sources. A review. *Int. J. Adv. Res.* 2: 962–978.
- Ogunji, J. O., M. Wirth 2000. Effect of dietary protein content on growth, food conversion and body composition of tilapia *Oreochromis niloticus* fingerlings fed fish meal diet. *J. Aquac. Trop.* 15:381–389.
- Okemwa, E. 2015. Effectiveness of aquaponic and hydroponic gardening to traditional gardening. *Int. J. Sci. Res. Inn. Tech.* 2(12):21–52.
- Osti, J. A. S., M. A. B. Moraes, C. F. Carmo, C. T. J. Mercante. 2018. Nitrogen and phosphorus flux from the production of Nile tilapia through the application of environmental indicators. *Brazilian J. of Biol.* 78:25–31.
- Ozório, R. O., L. Portz, R. Borghesi, J. E. Cyrino. 2012. Effects of dietary yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) supplementation in practical diets of tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Animals* 2(1):16–24.
- Páez- Osuna, F., S.R. Guerrero-Gálvan, A. C. Ruiz-Fernández, R. Espinoza-Angulo. 1997. Fluxes and mass balances of nutrients in a semi-intensive shrimp farm in north-western Mexico. *Mar. Pol. Bol.* 34(5):290-297.

- Pan, J., H. Sun, A. Nduwimana, Y. Wang, G. Zhou, Y. Ying, R. Zhang. 2007. Hydroponic plate/fabric/grass system for treatment of aquacultural wastewater. *Aquac. Eng.* 37(3):266-273.
- Parameswaran, P., P. R. Anderson. 2007. Biosolids mineralization in an anaerobic-aerobic combined reactor system. *Water Res.* 41:2739–2747.
- Parks, S., C. Murray. 2011. Leafy asian vegetables and their nutrition in hydroponics. *Ind. Invest.* 1–24.
- Pérez-Fuentes, J. A., C. I. Pérez-Rostro, M. P. Hernández-Vergara, M. del C. Monroy-Dosta. 2018. Variation of the bacterial composition of biofloc and the intestine of Nile tilapia *Oreochromis niloticus*, cultivated using biofloc technology, supplied different feed rations. *Aquac. Res.* 49:3658–3668.
- Petropoulos, S. A., E. Chatzieustratiou, G. Constantopoulou, G. Kapotis. 2016. Yield and quality of lettuce and rocket grown in floating culture system. *Not. Bot. Horti Agrobot. Cluj-Napoca* 44:603–612.
- Piedrahita, R. H., 2003. Reducing the potential environmental impact of tank aquaculture effluents through intensification and recirculation. *Aquac.* 226: 35–44.
- Pinho, S. M., D. Molinari, G. L. de Mello, K. M. Fitzsimmons, M. G. C. Emerenciano, 2017. Effluent from a biofloc technology (BFT) tilapia culture on the aquaponics production of different lettuce varieties. *Ecol. Eng.* 103:146–153.
- Plascencia-Jatomea, M., M. A. Olvera-Novoa, J. L. Arredondo-Figueroa, G. M. Hall, K. Shirai. 2002. Feasibility of fishmeal replacement by shrimp head silage protein hydrolysate in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L) diets. *J. Sci. Food Agric.* 82:753–759.
- Quadros, M., E. A. T. Lanna, J. L. Donzele, M. L. T. Abreu, F. B. de Ribeiro, F. S. S. Takishita. 2009. Crude protein reduction and digestible methionine+cystine and threonine to digestible lysine ratios in diets for Nile tilapia fingerlings. *Rev. Bras. Zootec.* 38:1400–1406.
- Rafiee, G., C. R. Saad. 2005. Nutrient cycle and sludge production during different stages of red tilapia (*Oreochromis* spp.) growth in a recirculating aquaculture system. *Aquac.* 244:109–118.
- Ragnarsdottir, K. V., H. U. Sverdrup, D. Koca. 2011. Challenging the planetary boundaries I: Basic principles of an integrated model for phosphorous supply dynamics and global population size. *Appl. Geochemistry* 26: 2–5.

- Rakocy, J. E. 2007. Ten guidelines for aquaponic systems. *Aquaponics J.* 46:14–17.
- Rakocy, J. E. 2012. Aquaponics - Integrating fish and plant culture. *Aquac. Prod. Syst.* 1:343-386.
- Rakocy, J. E., D. S. Bailey, K. A. Shultz, W. M. Cole. 1997. Development of an aquaponics system for the intensive production of tilapia and hydroponic vegetables. *Aquap. J.* 2:12–13.
- Rakocy, J. E., M. P. Masser, T. M. Losordo. 2006. Recirculating aquaculture tank production systems: Aquaponics- integrating fish and plant culture. SRAC Publ. - South. Reg. Aquac. Cent. 16.
- Rakocy, J. E., R. C. Shultz, D. S. Bailey, E. S. Thoman. 2003. Aquaponic production of Tilapia and basil: comparing a batch and staggered cropping system, in: South Pacific Soilless Culture Conference-SPSCC. 63–69 pp.
- Ray, A. J., B. L. Lewis, C. L. Browdy, J. W. Leffler. 2010. Suspended solids removal to improve shrimp (*Litopenaeus vannamei*) production and an evaluation of a plant-based feed in minimal-exchange, superintensive culture systems. *Aquac.* 299:89–98.
- Riche, M., D. Garling. 2003. Feeding tilapia in intensive recirculating systems. Iowa State University. North Cent. Reg. Aquac. Cent. (NCRAC). 1-6 pp.
- Richter, N., P. Siddhuraju, K. Becker. 2003. Evaluation of nutritional quality of moringa (*Moringa oleifera* Lam.) leaves as an alternative protein source for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.). *Aquac.* 217:599–611.
- Robinson, S., T. Chopin, N. Ridler, B. Robinson, K. Barrington. 2008. Social aspects of the sustainability of integrated multi-trophic aquaculture. *Aquac. Int.* 18:201–211.
- Roosta, H. R., S. Afsharipoor. 2012. Effects of different cultivation media on vegetative growth, ecophysiological traits and nutrients concentration in strawberry under hydroponic and aquaponic cultivation systems. *Adv. Environ. Biol.* 6:543–555.
- Roosta, H. R., M. Hamidpour. 2011. Effects of foliar application of some macro- and micro-nutrients on tomato plants in aquaponic and hydroponic systems. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 129:396–402.
- Ru, D., J. Liu, Z. Hu, Y. Zou, L. Jiang, X. Cheng, Z. Lv. 2017. Improvement of aquaponic performance through micro- and macro-nutrient addition. *Env. Sci. Poll. Res.* 24(19):16328–16335.

- Rupasinghe, J. W., J. O. S. Kennedy. 2010. Economic benefits of integrating a hydroponic-lettuce system into a Barramundi fish production system. *Aquac. Econ. Manag.* 14:81–96.
- Rurangwa, E., M. C. J. Verdegem. 2015. Microorganisms in recirculating aquaculture systems and their management. *Rev. Aquac.* 7:117–130.
- Sahrawat, K. L., G. R. Kumar, K. V. S. Murthy. 2006. Communications in soil science and plant analysis sulfuric acid – selenium digestion for multi-element analysis in a single plant digest for multi-element analysis in. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 33:1532–2416.
- Sainju, U. M., R. Dris, B. Singh. 2003. Mineral nutrition of tomato. *Food Agric. Environ.* 1: 176-183.
- Salam, M. A., S. Hashem, M. Asadujjaman, F. Li. 2014. Nutrient recovery from in fish farming wastewater: an aquaponics system for plant and fish integration. *World J. Fish Mar. Sci.* 6:355–360.
- Santiago, C. B., R. T. Lovell. 1988. Amino acid requirements for growth of Nile tilapia. *J. Nutr.* 118:1540–1546.
- Santos, J. F., C. R. D. Assis, C. K. L. S. Soares, R. E. Q. Rafael, V. M. Oliveira, J. E. De Vanconcelos Filho, R. C. P. França, D. Lemos, R. S. Bezerra. 2019. A comparative study on Nile tilapia under different culture systems: Effect on the growth parameters and proposition of new growth models. *Aquac.* 503:128–138.
- Santos, J. F., K. L. S. Soares, C. R. D. Assis, C. A. M. Guerra, D. Lemos, L. B. Carvalho, R. S. Bezerra. 2016. Digestive enzyme activity in the intestine of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) under pond and cage farming systems. *Fish Physiol. Biochem.* 42(5):1259-1274.
- Sapkota, A., A. R. Sapkota, M. Kucharski, J. Burke, S. McKenzie, P. Walker, R. Lawrence. 2008. Aquaculture practices and potential human health risks: Current knowledge and future priorities. *Environ. Int.* 34:1215–1226.
- Sattari, S. Z., A. F. Bouwman, K. E. Giller, M. K. Van Ittersum. 2012. Residual soil phosphorus as the missing piece in the global phosphorus crisis puzzle *Proc. Nat. Ac. Sci.* 109(16):6348-6353.
- Saveyn, H., P. Eder. 2014. End-of-waste criteria for biodegradable waste subjected to biological treatment (compost & digestate): Technical proposals. IPTS. Sevilla, Spain. 312 pp.

- Schneider, O., A. K. Amirkolaie, J. Vera-Cartas, E. H. Eding, J. W. Schrama, J. A. J. 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. *Aquac. Res.* 35:1370–1379.
- Schneider, O., V. Sereti, E. H. Eding, J. A. J. Verreth. 2005. Analysis of nutrient flows in integrated intensive aquaculture systems. *Aquac. Eng.* 32:379–401.
- Schnell, A. K., F. Seebacher. 2008. Can Phenotypic Plasticity Facilitate the Geographic Expansion of the Tilapia *Oreochromis mossambicus*? *Physiol. Biochem. Zool.* 81:733–742.
- Schveitzer, R., R. Arantes, P. F. S. Costódio, C. M. do Espírito Santo, L. V. Arana, W. S. Quadros, E. R., Andreatta. 2013. Effect of different biofloc levels on microbial activity, water quality and performance of *Litopenaeus vannamei* in a tank system operated with no water exchange. *Aquac. Eng.* 56:59–70.
- Seawright, D. E., R. R. Stickney, R. B. Walker. 1998. Nutrient dynamics in integrated aquaculture-hydroponics systems. *Aquac.* 160:215–237.
- Serra, F. P., C. A. P. Gaona, P. S. Furtado, L. H. Poersch, W. J. Wasielesky, 2015. Use of different carbon sources for the biofloc system adopted during the nursery and grow-out culture of *Litopenaeus vannamei*. *Aquac. Int.* 23:1325–1339.
- Shannon, M. C., C. M. Grieve. 1999. Tolerance of vegetable crops to salinity. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 78:5–38.
- Shiau, S. Y., J. C. Chuang. 1995. Utilization of Disaccharides by juvenile tilapia, *Oreochromis niloticus* x *O. aureus*. *Aquac.* 133: 249–256.
- Shnel, N., Y. Barak, T. Ezer, Z. Dafni, J. van Rijn. 2002. Design and performance of a zero-discharge tilapia recirculating system. *Aquac. Eng.* 26:191–203.
- Siddiqui, A. Q., A. H. Al-Harbi. 1999. Nutrient budgets in tanks with different stocking densities of hybrid tilapia. *Aquac.* 170:245–252.
- Siddiqui, A. Q., M. S. Howlader, A. A. Adam. 1988. Effects of dietary protein levels on growth, feed conversion and protein utilization in fry and young Nile Tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Aquac.* 70:63–73.
- Simpson, R. J., M. R. Neuberguer, T. Y. Liu. 1976. Complete amino acid analysis of proteins from a single hydrolysate. *J. Biol. Chem.* 251:1936–1940.

- Sindilariu, P. D., C. Schulz, R. Reiter. 2007. Treatment of flow-through trout aquaculture effluents in a constructed wetland. *Aquaculture* 270:92–104.
- Somerville, C., M. Cohen, E. Pantanella, A. Stankus, A. Lovatelli. 2014. Small-scale aquaponic food production. *Integrated fish and plant farming, FAO Fisheries and Aquaculture*. 52:42 pp.
- Soto-Zarazua, G. M., G. Herrera-Ruiz, E. Rico-Garcia, M. Toledano-Ayala, R. Peniche-Vera, R. Ocampo-Velazquez, R. G. Guevara-Gonzalez. 2010. Development of efficient recirculation system for Tilapia (*Oreochromis niloticus*) culture using low cost materials. *African J. Biotechnol.* 9:5203–5211.
- Standen, B. T., D. L. Peggs, M. D. Rawling, A. Foey, S. J. Davies, G. A. Santos, D. L. Merrifield, 2016. Dietary administration of a commercial mixed-species probiotic improves growth performance and modulates the intestinal immunity of tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Fish Shellfish Immunol.* 49:427–435.
- Steiner, A. A. 1961. A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant Soil.* 15(29):134–154.
- Subasinghe, R., D. Soto, J. Jia. 2009. Global aquaculture and its role in sustainable development. *Rev. Aquac.* 1:2–9.
- Summerfelt, S., S. Bebak-Williams, S. Tsukuda. 2001. Controlled Systems: Water Reuse and Recirculation. *Fish Hatch. Manag.* 285–395.
- Summerfelt, S. T., P. R. Adler, D. M. Glenn, R. N. Kretschmann 1999. Aquaculture sludge removal and stabilization within created wetlands. *Aquac. Eng.* 19:81–92.
- Sun, G., Y. Liu, D. Qiu, M. Yi, X. Li, Y. Li. 2016a. Effects of feeding rate and frequency on growth performance, digestion and nutrients balances of Atlantic salmon (*Salmo salar*) in recirculating aquaculture systems (RAS). *Aquac. Res.* 47:176–188.
- Sun, M., S. G. Hassan, D. Li. 2016b. Models for estimating feed intake in aquaculture: A review. *Comput. Electron. Agric.* 127:425–438.
- Suresh, A. V., C. K. Lin. 1992. Effect of stocking density on water quality and production of red tilapia in a recirculated water system. *Aquac. Eng.* 11:1–22.
- Sverdrup, H. U., K. V. Ragnarsdottir. 2011. Challenging the planetary boundaries II: Assessing the sustainable global population and phosphate supply, using a systems dynamics assessment model. *Appl. Geochemistry* 26:307-310.

- Tahan, J. E., V. A. Granadillo, J. M. Sanchez, H. S. Cubillan, R. A. Romero. 1993. Mineralization of biological-materials prior to determination of total mercury by cold vapor atomic-absorption spectrometry. *J. Anal. At. Spectrom.* 8:1005–1010.
- Tampio, E., T. Salo, J. Rintala. 2016. Agronomic characteristics of five different urban waste digestates. *J. Environ. Manage.* 169:293–302.
- Taşbozan, O., F. Özcan, C. Erbaş, E. Ündağ, A. A. Atici, A. Adakli. 2013. Determination of proximate and amino acid composition of five different tilapia species from the Cukurova Region (Turkey). *J. Appl. Biol. Sci.* 7:17–22.
- Thompson, K. R., A. Velasquez, J. T. Patterson, L. S. Metts, C. D. Webster, Y. J. Brady, A. L. Gannam, R. G. Twibell, S. L. Ostrand. 2012. Evaluation of plant and animal protein sources as partial or total replacement of fish meal in diets for Nile tilapia fry and juvenile stages. *N. Am. J. Aquac.* 74:365–375.
- Tidwell, J. H. 2012. *Aquaculture Production Systems*. World Aquaculture Society. Willey-Blackwell. John Wiley & Sons, Inc. Iowa, USA. 415 pp.
- Tran-Duy, A., J. W. Schrama, A. A. van Dam, J. A. J. Verreth. 2008. Effects of oxygen concentration and body weight on maximum feed intake, growth and hematological parameters of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Aquac.* 275:152–162.
- Trang, N., H. –H. Schierup, H. Brix. 2010. Leaf vegetables for use in integrated hydroponics and aquaculture systems: Effects of root flooding on growth, mineral composition and nutrient uptake. *African J. Biotechnol.* 9:4186–4196.
- Trejo-Téllez, L., F. C. Gómez-Merino. 2012. Nutrient solutions for hydroponics systems, in: *Hydroponics - A standard methodology for plant biological researches* -Toshiki Asato. 244 pp.
- Trosvik, K. A., C. D. Webster, K. R. Thompson, L. A. Metts, A. R. Gannam, Twibell. 2013. Effects on growth performance and body composition in Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*, fry fed organic diets containing yeast extract and soyabean meal as a total replacement of fish meal without amino acid supplementation. *Biol. Agric. Hortic.* 29:173–185.
- Trzcinski, A. P., D. C. Stuckey. 2009. Continuous treatment of the organic fraction of municipal solid waste in an anaerobic two-stage membrane process with liquid recycle. *Water Res.* 43:2449–2462.

- Turcios, A. E., J. Papenbrock. 2014. Sustainable treatment of aquaculture effluents, What can we learn from the past for the future? *Sustain.* 6:836–856.
- Twibell, R. G., P. B. Brown. 1998. Optimal dietary protein concentration for hybrid tilapia *Oreochromis niloticus* x *O. aureus* fed all-plant diets. *J. World Aquac. Soc.* 29: 9–16.
- Uggetti, E., I. Ferrer, E. Llorens, J. García. 2010. Sludge treatment wetlands: A review on the state of the art. *Bioresour. Technol.* 101:2905–2912.
- Valente, L. M. P., F. Linares, J. L. R. Villanueva, J. M. G. Silva, M. Espe, C. Escórcio, M. A. Pires, M. J. Saavedra, P. Borges, F. Medale, B. Álvarez-Blázquez, J. B. Peleteiro. 2011. Dietary protein source or energy levels have no major impact on growth performance, nutrient utilisation or flesh fatty acids composition of market-sized Senegalese sole. *Aquac.* 318:128–137.
- Van de Wiel, C. C., C. van der Linden, C. G. Linden, O. E. Scholten. 2016. Improving phosphorus use efficiency in agriculture: Opportunities for breeding. *Euphytica* 207(1):1–22.
- van Rijn, J. 1996. The potential for integrated biological treatment systems in recirculating fish culture—A review. *Aquac.* 139:181–201.
- van Rijn, J. 2013. Waste treatment in recirculating aquaculture systems. *Aquac. Eng.* 53:49-56.
- van Rijn, J., Y. H. Tal, J. Schreier. 2006. Denitrification in recirculating systems: Theory and applications. *Aquac. Eng.* 34:364–376.
- Van Trung, D. D., N. T. Hao, B. Glencross. 2011. Development of a nutritional model to define the energy and protein requirements of tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Aquac.* 320:69–75.
- Vandamme, D., I. Foubert, I. Fraeye, B. Meesschaert, K. Muylaert. 2012. Flocculation of *Chlorella vulgaris* induced by high pH: Role of magnesium and calcium and practical implications. *Bioresour. Technol.* 105:114–119.
- Verdegem, M. C. J., R. H. Bosma. 2009. Water withdrawal for brackish and inland aquaculture, and options to produce more fish in ponds with present water use. *Water Policy.* 11:52–68.
- Verdegem, M. C. J., R. H. Bosma, J. A. J. Verreth. 2006. Reducing Water Use for Animal Production through Aquaculture. *Int. J. Water Resour. Dev.* 22:101–113.

- Veuger, B., A. Pitcher, S. Schouten, D. J. S. Sinninghe, J. J. Middelburg. 2013. Nitrification and growth of autotrophic nitrifying bacteria and Thaumarchaeota in the coastal North Sea. *Biogeosci.* 10:1775–1785.
- Villarroel, M., J. M. R. Alvariño, J. M. Duran. 2011. Aquaponics: integrating fish feeding rates and ion waste production 9: 537–545.
- Wang, M., M. Lu. 2016. Tilapia polyculture: a global review. *Aquac. Res.* 47, 2363–2374.
- Wang, Y., P. Hsu, Y. Tsay. 2012. Uptake, allocation and signaling of nitrate. *Trends Plant Sci.* 17:458–467.
- Wang, Z., S. Li, S. Malhi. 2008. Effects of fertilization and other agronomic measures on nutritional quality of crops 23:7–23.
- Wardlow, G. W., D. M. Johnson, C. L. Mueller, C. E. Hilgenberg. 2002. Enhancing student interest in the agricultural sciences through Aquaponics. *J. Nat. Resour. Life Sci. Educ.* 31:55–58.
- Watanabe, T. 1982. Lipid nutrition in fish. *Comp. Biochem. Physiol.* 73:3–15.
- Watanabe, T., T. Takeuchi, A. Murakami, C. Ogino. 1980. The availability to *Tilapia nilotica* of phosphorus in white fish meal. *Bull. Japanese Soc. Sci. Fish.* 46:897–899.
- Watanabe, T., T. M. Losordo, K. Fitzsimmons, F. Hanley. 2002. Tilapia production systems in the Americas: Technological advances, trends, and challenges. *Rev. Fish. Sci.* 10:465–498.
- Wille, K., E. McLean, J. S. Goddard, J. C. Byatt. 2002. Dietary lipid level and growth hormone alter growth and body conformation of blue tilapia, *Oreochromis aureus*. *Aquac.* 209:219–232.
- Wu, Y. V., R. R. Rosati, D. J. Sessa, P. B. Brown. 1995. Evaluation of corn gluten meal as a protein source in tilapia diets. *J. Agric. Food Chem.* 43:1585–1588.
- Wu, Y. V., R. R. Rosati, D. J. Sessa, P. B. Brown. 1994. Utilization of protein-rich ethanol co-products from corn in tilapia feed. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 71:1041–1043.
- Wu, Y. V., R. R. Rosati, P. B. Brown. 1997. Use of corn-derived ethanol coproducts and synthetic lysine and tryptophan for growth of tilapia (*Oreochromis niloticus*) Fry. *J. Agric. Food Chem.* 45:2174–2177.

- Yan, W., L. A. Hunt. 1999. An equation for modelling the temperature response of plants using only the cardinal temperatures. *Ann. Bot.* 84:607–614.
- Yangthong, M., S. Oncharoen, J. Sripanomyom. 2014. Effect of sargassum meal supplementation on growth performance of sex-reversed Tilapia (*Oreochromis niloticus* Linn.).
- Yeo, S. E., F. P. Binkowski, J. E. Morris. 2004. Aquaculture effluents and waste by-products: characteristics, potential recovery, and beneficial reuse. Iowa State University. NCRAC. Technical Bolletin 6:63 pp.
- Yigit, N. O., M. Olmez. 2009. Canola meal as an alternative protein source in diets for fry of tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Isr. J. Aquac.* - Bamidgeh 61:35–41.
- Yogev, U., A. Barnes, A. Gross. 2016. Nutrients and energy balance analysis for a conceptual model of a three loops off grid, aquaponics. *Water.* 8(12):1-16
- Yogev, U., K. R. Sowers, N. Mozes, A. Gross. 2017. Nitrogen and carbon balance in a novel near-zero water exchange saline recirculating aquaculture system. *Aquaculture* 467:118–126.
- Zech, W., N. Senesi, G. Guggenberger, K. Kaiser, J. Lehmann, T. M. Miano, A. Miltner, G. Schroth. 1997. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. *Geoderma* 79:117–161.
- Zhang, S., J.-D. Herbell, B. Gaye-Haake. 2004. Biodegradable organic matter in municipal solid waste incineration bottom ash. *Waste Manag.* 24:673–679.
- Zhang, S. Y., G. Li, H. B. Wu, X. G. Liu, X.Y. H. Yao, L. H. Tao, L. Liu. 2011. An integrated recirculating aquaculture system (RAS) for land-based fish farming: The effects on water quality and fish production. *Aquac. Eng.* 45:93–102.