



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ingeniería de Calidad y Productividad

*Efecto de temperatura y tres densidades de población sobre rendimiento y calidad nutricional para producción intensiva de tilapia (*Oreochromis niloticus*)*

Opción de titulación  
**Tesis**

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de Maestría en Ingeniería de Calidad y Productividad.


**Presenta:**

Abel Francisco Rojas Hernández

Dirigido por:

Dr. Juan Fernando García Trejo

Dr. Juan Fernando García Trejo  
Presidente



Firma

Dra. Marcela Gaytán Martínez  
Secretario




Firma

MI Javier García Pérez  
Vocal




Firma

M.A.P Agustín Martínez Rodríguez  
Suplente



Firma


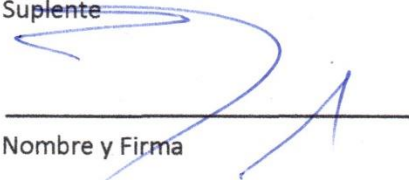
M.C Guillermo Hiyane Nashiro  
Suplente



Firma

Nombre y Firma

Dr. Manuel Toledano Ayala



Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña  
Directora de Investigación y Posgrado

## RESUMEN

El cultivo de tilapia (*Oreochromis niloticus*) es una buena opción para producción en acuicultura debido a que es una especie que se adapta a gran variedad de condiciones ambientales. El cultivo de esta especie se ha hecho más relevante, siendo la densidad de población y la temperatura dos de los factores más importantes para su producción. El objetivo de este trabajo fue determinar las mejores condiciones de temperatura y densidad de población para obtener los mayores niveles de crecimiento, rendimiento y calidad nutricional de la tilapia (*Oreochromis niloticus*) en condiciones de invernadero en la Universidad Autónoma de Querétaro campus Amazcala. Se midió la tasa de supervivencia y estimadores de crecimiento, se determinó el porcentaje de humedad, cenizas totales, grasas totales y proteínas de tres densidades de población (67 org/m<sup>3</sup>, 135 org/m<sup>3</sup> y 270 org/m<sup>3</sup>) de tilapia bajo dos tratamientos, uno sin control de temperatura y otro con control de temperatura en un sistema de recirculación acuícola a nivel experimental. Ambos sistemas (Sin control y con control de temperatura) se mantuvieron dentro de los rangos aceptados de temperatura, pH, oxígeno disuelto, nitratos, nitritos y amonio. Los resultados demuestran que la temperatura y la densidad poblacional no mostraron un efecto sobre la sobrevivencia. En general, existió una diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) en crecimiento en peso y longitud al comparar los tratamientos con control de temperatura y sin control de temperatura. Los tratamientos T1 y T2 mostraron el mayor crecimiento en peso de 28.74± 9.31 g y 30.02±12.07 g, mientras que el tratamiento T6 presentó el menor crecimiento en peso de 9.82±2.61 g. Se presentó el mismo comportamiento para la longitud donde el tratamiento T6 alcanzó la menor talla de 80.13±6.77 mm y los tratamientos T1 y T2 mostraron una mayor talla de 112.61±11.49 mm y 113.81±16.78 respectivamente. Se destaca que *O. niloticus* presentó una diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) para el porcentaje de T.E.C en el tratamiento T2 de 4.78±0.25, mientras que T6 mostró 2.82±0.18, indicando otra variable a favor de los tratamientos con control de temperatura. Además se observó una tendencia de mayores valores de porcentaje de humedad en los tratamientos con control de temperatura, los tratamientos sin control de temperatura presentaron valores mayores de porcentaje de cenizas y grasas totales. Adicionalmente los resultados bromatológicos indicaron que los tratamientos T2 y T4 mostraron una diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) en el porcentaje de humedad. El tratamiento T2 presentó el mayor porcentaje de humedad de 79.04±0.02, mientras que T4 obtuvo el menor valor 77.86±0.25. No existió diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) entre los tratamientos en relación al porcentaje de cenizas totales y cantidad de proteína. Los tratamientos T4 y T1 presentaron la mayor diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) en porcentaje de grasas totales. Los resultados indican que los peces cultivados en tratamientos con control de temperatura mostraron los mayores crecimientos en peso y longitud. Este conocimiento permitirá desarrollar paquetes tecnológicos de cultivo de tilapia para obtener un buen rendimiento de producción con buena calidad nutricional bajo condiciones de invernadero.

**(Palabras clave:** *Oreochromis niloticus*, supervivencia, densidad de cultivo, calidad nutricional.)

## SUMMARY

The culture of tilapia (*Oreochromis niloticus*) is a good option for production in aquaculture because it is a species that adapts to a wide variety of environmental conditions. The cultivation of this species has become more relevant, with stocking density and temperature being two of the most important factors for its production. The objective of this work was to determine the best conditions of temperature and stocking density to obtain the highest levels of growth, yield and nutritional quality of the tilapia (*Oreochromis niloticus*) under greenhouse conditions at the Autonomous University of Querétaro Amazcala campus. The survival rate and growth estimators were measured, the percentage of body moisture, total ash, total fat and protein of three population densities (67 org / m<sup>3</sup>, 135 org / m<sup>3</sup> and 270 org / m<sup>3</sup>) of tilapia was determined under two treatments, one without temperature control and the other with temperature control in an experimental aquaculture recirculation system. Both systems (uncontrolled and with temperature control) were kept within the accepted ranges of temperature, pH, dissolved oxygen, nitrates, nitrites and ammonium. The results showed that the temperature and stocking density did not show an effect on survival rate. In general, there was a significant difference ( $P < 0.05$ ) in growth and length when comparing treatments with temperature control and without temperature control. The treatments T1 and T2 showed the highest growth in weight of  $28.74 \pm 9.31$  g and  $30.02 \pm 12.07$  g, while the treatment T6 had the lowest growth in weight of  $9.82 \pm 2.61$  g. The same behavior was observed for the length where the T6 treatment reached the shortest size of  $80.13 \pm 6.77$  mm and the T1 and T2 treatments showed a larger size of  $112.61 \pm 11.49$  mm and  $113.81 \pm 16.78$  mm. It is noted that *O. niloticus* presented a significant difference ( $P < 0.05$ ) for the percentage of T.E.C in the T2 treatment of  $4.78 \pm 0.25$ , while T6 showed  $2.82 \pm 0.18$ , indicating another variable in favor of the treatments with temperature control. In addition, a trend of higher moisture percentage values was observed in the treatments with temperature control, the treatments without temperature control showed higher values of percentage of ash and total fat. Additionally the bromatological results indicated that the treatments T2 and T4 showed a significant difference ( $P < 0.05$ ) in the percentage of body moisture. Treatment T2 had the highest percentage of body moisture of  $79.04 \pm 0.02$ , while T4 obtained the lowest value  $77.86 \pm 0.25$ . There was no significant difference ( $P < 0.05$ ) between the treatments in relation to the percentage of total ashes and protein. The treatments T4 and T1 presented the greatest significant difference ( $P < 0.05$ ) in percentage of total fats. Results indicate that the fish grown in treatments with temperature control showed the greatest growths in weight and length. This knowledge will allow the development of technological tilapia culture packages to obtain a good production yield with good nutritional quality under greenhouse.

**(Key words:** *Oreochromis niloticus*, survival rate, stocking density, nutritional quality.)

## DEDICATORIAS

A Dios por permitirme terminar este objetivo con salud y a lado de mis seres queridos.

A mis padres y mis hermanos por su comprensión y apoyo incondicional.

A mis compañeros de maestría porque gracias a su apoyo y paciencia me ayudaron cada uno con sus conocimientos a concluir cada etapa de la Maestría.

A la familia de mi esposa por la motivación y apoyo.

A todos mis sobrinos, por sus ocurrencias y hacerme pasar instantes amenos en los momentos de mayor presión.

Muy especialmente agradezco a mi esposa Lupita por su comprensión y apoyo incondicional durante estos dos años, porque nunca me soltaste de la mano. El compartir mi vida contigo es una de las mejores decisiones que he tomado en mi vida. TE AMO.

A mi hijo Saúl, por venir a alegrarnos la vida y permitirme experimentar uno de los mejores sentimientos de la vida, ser padre. TE AMAMOS.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Dr. Juan Fernando García Trejo por su confianza para integrarme a su equipo de trabajo, por su paciencia y apoyo para realizar este proyecto.

A mi sínodo por sus valiosas aportaciones para mejorar el presente proyecto.

A todos los integrantes del equipo del laboratorio de Bioingeniería y compañeros de Amazcala por su paciencia y ayuda en el desarrollo del presente proyecto.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por su apoyo económico para poderme dedicar a este trabajo de investigación.

A mis profesores del Posgrado de Ingeniería de Calidad y Productividad, gracias a ellos y sus conocimientos compartidos durante la maestría fueron importantes para el desarrollo de este proyecto.

A ti Lupita, por no soltarme de la mano en los momentos más complicados, por motivarme a ser cada día mejor.

A mi familia por su apoyo y comprensión.

# ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	i
<b>SUMMARY</b> .....	ii
<b>DEDICATORIAS</b> .....	iii
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	iv
<b>ÍNDICE</b> .....	v
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	viii
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	xi
<b>LISTA DE ECUACIONES</b> .....	xiii
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>2. HIPÓTESIS</b> .....	4
<b>3. OBJETIVOS</b> .....	4
3.1 Objetivo general.....	4
3.2 Objetivos específicos .....	4
<b>4. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	5
4.1 Acuicultura.....	5
4.1.1 Actualidad de la acuicultura.....	5
4.2 Sistemas de producción acuícola.....	6
4.3 Cultivo en sistemas de recirculación.....	7
4.4 Tilapia.....	8
4.4.1 Temperatura del agua .....	9
4.4.2 Salinidad.....	9
4.4.3 Oxígeno disuelto .....	9
4.4.4 Potencial de hidrógeno.....	10
4.4.5 Amonio $\text{NH}_4^+$ .....	10
4.4.6 Nitrito $\text{NO}_2^-$ .....	10
4.4.7 Nitrato $\text{NO}_3^-$ .....	11
4.5 Requerimientos nutricionales de la tilapia.....	11
4.5.1 Proteínas.....	11

4.5.2 Lípidos .....	11
4.5.3 Carbohidratos .....	12
4.6 Densidad de población en el cultivo de tilapia .....	12
4.7 Calidad nutrimental de la tilapia.....	13
<b>5. METODOLOGÍA .....</b>	<b>16</b>
5.1 Sitio experimental .....	16
5.2 Conformación del sistema de recirculación acuícola para el cultivo de tilapia .....	16
5.2.1 Invernadero.....	16
5.2.2 Sistema de recirculación acuícola. ....	17
5.2.3 Construcción del sistema de recirculación.....	18
5.2.4 Distribución del sistema de recirculación .....	20
5.3 Diagrama general de proceso.....	22
5.4 Material biológico .....	23
5.4.1 Alimentación .....	23
5.5 Métodos .....	24
5.5.1 Diseño de experimento .....	24
5.5.2 Determinación de las condiciones físicas y químicas del agua.....	27
5.5.3 Estimadores del crecimiento del material biológico .....	27
5.5.4 Sistema de medición .....	29
5.5.5 Estimadores del análisis proximal .....	30
5.6 Análisis Estadístico.....	33
5.6.1 Análisis de la varianza (ANOVA) .....	33
<b>6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>35</b>
6.1 Análisis del sistema de medición.....	35
6.1.1 Análisis de medición de balanza analítica marca precisa .....	35
6.1.2 Análisis de medición de vernier marca mitutoyo .....	37
6.1.3 Análisis de medición del multimedidor de dos canales HQ40 .....	39
6.2 Monitoreo de las condiciones físicas del agua .....	40
6.2.1 Temperatura .....	40
6.2.2 pH.....	42
6.2.3 Oxígeno Disuelto.....	44
6.3 Monitoreo de las condiciones químicas del agua.....	46

6.3.1 Compuestos Nitrogenados ( $\text{NO}_2$ $\text{NO}_3$ y $\text{NH}_3$ ).....	46
6.4 Análisis Estadístico.....	48
6.4.1 Análisis del supuesto de normalidad.....	48
6.4.1 Análisis de homogeneidad de varianzas.....	50
6.5 Estimadores de crecimiento de tilapia.....	52
6.5.1 Alimentación.....	52
6.5.2 Supervivencia.....	52
6.4.2 Peso inicial y final promedio.....	55
6.5.3 Longitud inicial y final promedio.....	59
6.5.4 Relación peso talla del modelo potencial.....	63
6.5.5 Estimadores del crecimiento.....	65
6.6 Análisis de los efectos principales sobre el crecimiento de tilapia.....	68
6.7 Estimadores del análisis proximal.....	70
6.7 Análisis económico.....	75
<b>7. CONCLUSIONES</b> .....	<b>78</b>
<b>8. RECOMENDACIONES</b> .....	<b>79</b>
<b>9. REFERENCIAS</b> .....	<b>80</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Laboratorio de bioingeniería Campus Amazcala. Fuente: Elaboración propia. ....	16
Figura 2. Exterior de invernadero acuícola. Campus Amazcala. Fuente: Elaboración propia. ....	17
Figura 3. Equipo empleado en los sistemas de recirculación. Tanques de cultivo (A), colector de agua (B), bomba sumergible (C), filtro (D), calentador de agua (E) y oxigenador (D). Fuente: Elaboración propia. ....	18
Figura 4. Sistema de cultivo con tubo de PVC para dar nivel a 300 L. Fuente: Elaboración propia. ....	18
Figura 5. Salida de agua hacia colector y bombeo de agua hacia tanques de cultivo. Fuente: Elaboración propia. ....	19
Figura 6. Paso de agua a través de filtro y retorno a tanques de cultivo. Fuente: Elaboración propia. ....	20
Figura 7. Esquema del sistema de recirculación con calefactor de agua (A) y sistema de recirculación con agua a temperatura ambiente (B). Fuente: Elaboración propia ....	21
Figura 8. Diagrama de proceso para el cultivo de tilapia en un sistema de recirculación.....	22
Figura 9. Alevines de tilapia de granja Zidedho, Ixmiquilpan, Hidalgo. Fuente: Elaboración propia. ....	23
Figura 10. Distribución de los diferentes tratamientos propuestos en los sistemas de recirculación de cultivo de tilapia. Fuente: Elaboración propia. ....	26
Figura 11. Gráfica de estudio Gage tipo 1 del multimedidor de dos canales HQ40D.....	39
Figura 12. Comportamiento de los valores de temperatura en los sistemas con control y sin control de temperatura durante el periodo de experimentación. ....	41
Figura 13. Comportamiento de los valores de temperatura en los sistemas de control y sin control de temperatura en un ciclo de 24 h.....	41
Figura 14. Comportamiento de los valores de pH en los sistemas con control y sin control de temperatura durante el periodo de experimentación.....	42

Figura 15. Comportamiento de los valores de pH en los sistemas de control y sin control de temperatura en un ciclo de 24 h.....	43
Figura 16. Comportamiento de los valores de oxígeno disuelto en los sistemas con control y sin control de temperatura durante el periodo de experimentación. ....	44
Figura 17. Comportamiento de los valores de oxígeno disuelto en los sistemas de control y sin control de temperatura en un ciclo de 24 h. ....	45
Figura 18. Tendencia del comportamiento para los compuestos nitrogenados (NO <sub>2</sub> NO <sub>3</sub> y NH <sub>3</sub> ) durante una semana. ....	47
Figura 19. Tendencia del comportamiento para los compuestos nitrogenados (NO <sub>2</sub> NO <sub>3</sub> y NH <sub>3</sub> ) durante el periodo de experimentación. ....	47
Figura 20. Comparación del comportamiento del crecimiento en peso (g) para <i>O. niloticus</i> variedad supermacho para los tratamientos T1 y T4. ....	55
Figura 21. Comparación del comportamiento del crecimiento en peso (g) para <i>O. niloticus</i> variedad supermacho para los tratamientos T2 y T5. ....	56
Figura 22. Comparación del comportamiento del crecimiento en peso (g) para <i>O. niloticus</i> variedad supermacho para los tratamientos T3 y T6. ....	57
Figura 23. Comparación del comportamiento del crecimiento en peso (g) para <i>O. niloticus</i> variedad supermacho para los tratamientos sin control de temperatura T4, T5 y T6.....	57
Figura 24. Comparación del comportamiento del crecimiento en peso (g) para <i>O. niloticus</i> variedad supermacho para los tratamientos con control de temperatura T1, T2 y T3. ....	58
Figura 25. Comparación del comportamiento del crecimiento en longitud (mm) para <i>O. niloticus</i> variedad supermacho para los tratamientos T1 y T4. ....	59
Figura 26. Comparación del comportamiento del crecimiento en longitud (mm) para <i>O. niloticus</i> variedad supermacho para los tratamientos T2 y T5. ....	60
Figura 27. Comparación del comportamiento del crecimiento en longitud (mm) para <i>O. niloticus</i> variedad supermacho para los tratamientos T3 y T6. ....	60

Figura 28. Comparación del comportamiento del crecimiento en longitud para <i>O. niloticus</i> variedad supermacho para los tratamientos sin control de temperatura T4, T5 y T6.....	61
Figura 29. Comparación del comportamiento del crecimiento en longitud (mm) para <i>O. niloticus</i> variedad supermacho para los tratamientos con control de temperatura T1, T2 y T3. ....	62
Figura 30. Regresiones que relacionan el peso (g) y la longitud total (mm) para el periodo experimental de los tratamientos T1, T2, T3, T4, T5 y T6. ....	64
Figura 31. Grafica de los efectos principales sobre el crecimiento de tilapia. ....	68
Figura 32. Gráfica del efecto de la interacción entre la temperatura y la densidad de cultivo sobre el crecimiento de tilapia. ....	69
Figura 33. Comparativo del porcentaje de humedad para los seis tratamientos de cultivo.....	70
Figura 34. Comparativo del porcentaje de cenizas totales para los seis tratamientos de cultivo. ....	72
Figura 35. Comparativo del porcentaje de grasas totales para los seis tratamientos de cultivo..	73
Figura 36. Comparativo del porcentaje de proteína para los seis tratamientos de cultivo.....	73
Figura 37. Comparativo de la tasa interna de retorno (TIR) entre los tratamientos T2 con control de temperatura y T5 sin control de temperatura. ....	77

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Factores y niveles del diseño de experimentos. Fuente: Elaboración propia .....	24
Tabla 2. Combinación de tratamientos del diseño de experimentos. Fuente: Elaboración propia .....	25
Tabla 3. Análisis de varianza para las mediciones de peso en la balanza analítica marca Precisa .....	35
Tabla 4. Análisis RyR cruzado para las mediciones de peso en la balanza analítica marca Precisa .....	36
Tabla 5. Análisis de varianza para las mediciones de longitud total de peces con un vernier marca mitutoyo .....	37
Tabla 6. Análisis RyR cruzado para las mediciones de longitud total de peces con un vernier marca mitutoyo .....	38
Tabla 7. P-value del análisis de normalidad para los datos de peso (g) registrados durante 8 semanas. ....	48
Tabla 8. P-value del análisis de normalidad para los datos de longitud (mm) registrados durante 8 semanas .....	49
Tabla 9. P-value del análisis de normalidad para los datos de porcentaje de humedad, cenizas, grasas totales y proteína. ....	50
Tabla 10. P-value para el análisis de homogeneidad de varianzas para los datos de peso (g) y longitud (mm) registrados durante 8 semanas.....	51
Tabla 11. P-value para el análisis de homogeneidad de varianzas (Bartlett y Levene) para los datos de humedad, cenizas, grasas totales y proteína. ....	51
Tabla 12. Parámetros bromatológicos del alimento Nutripec marca Purina. ....	52
Tabla 13. Parámetros de crecimiento para <i>O. niloticus</i> en seis tratamientos de densidad y temperatura durante 60 días (media $\pm$ DS) <sup>z</sup> .....	53
Tabla 14. Parámetros de la relación peso-talla al inicio y final del experimento. ....	63

Tabla 15. Estimadores de crecimiento para *O. niloticus* en seis tratamientos de densidad y temperatura durante 60 días (media ± DS)<sup>z</sup> .....66

Tabla 16. Resultados del análisis bromatológico para *O. niloticus* en seis tratamientos de densidad y temperatura durante 60 días (media ± DS)<sup>z</sup> .....71

## LISTA DE ECUACIONES

(1) Peso inicial promedio (PIP).....	27
(2) Peso final promedio (PFP).....	28
(3) Talla inicial promedio (TIP).....	28
(4) Talla final promedio (TFP).....	28
(5) Peso ganado (PG).....	28
(6) Tasa de crecimiento específico TCE (%/día).....	28
(7) Tasa de supervivencia (TS).....	28
(8) Modelo para la relación peso talla bajo la ecuación potencial.....	28
(9) Fuente de variación total.....	29
(10) Repetibilidad y reproducibilidad.....	29
(11) R y R.....	29
(12) Contenido de humedad (%).....	30
(13) Peso de la muestra (g).....	30
(14) Peso de cenizas (g).....	31
(15) Cenizas base seca (%).....	31
(16) Cenizas base húmeda (%).....	31
(17) Materia orgánica (%).....	31
(18) Porcentaje de nitrógeno (%).....	32
(19) Porcentaje de grasa total (%).....	32
(20) Hipótesis Nula.....	33

(21) Hipótesis Alternativa 1 .....33

(22) Hipótesis Alternativa 2 .....33

## 1. INTRODUCCIÓN

Los pronósticos en seguridad alimentaria indican que la acuicultura tiene un gran potencial para producir más pescado en el futuro y compensar el estancamiento de suministro de la pesca de captura (Nadarajah and Flaaten, 2017). Esto se reflejó por primera vez en 2014, cuando la contribución del sector acuícola de pescado para consumo humano superó a la del pescado capturado en el medio natural. Este incremento de producción ha impulsado a la acuicultura a ser uno de los sectores con mayor crecimiento y abastece más de la mitad del pescado consumido en el mundo (FAO, 2016).

De acuerdo a los más recientes datos se prevé que la población mundial alcance los 9,700 millones de habitantes en 2050, esto nos coloca en una situación de enfrentar el reto de alimentar a las futuras generaciones y debido al inminente aumento de la población y continua demanda de pescado cultivado, la producción segura y de buena calidad proveniente de la acuicultura será de principal interés en los siguientes años (Ottinger et al., 2016). Debido al crecimiento poblacional, el hambre y la malnutrición se han vuelto problemas devastadores en el mundo y están vinculados a la pobreza. Hay 795 millones de personas subalimentadas en el mundo. Debido a esto se ha centrado la atención en el pescado como alimento nutritivo de origen animal que contiene múltiples nutrientes para el crecimiento, desarrollo y bienestar del ser humano (Béné et al., 2015).

Se estima que el consumo de pescado aumentará aún más en los países de Asia, África, América y regiones europeas durante 2010 y 2030 (Kobayashi et al., 2015). El consumo per cápita a nivel mundial ha registrado aumentos graduales. En 2013 se registró un consumo de 19.7 Kg y seguirá aumentando hasta superar los 20 Kg en 2015 (FAO, 2016), en México el consumo de pescado ha alcanzado los 12.01 Kg en 2015 (CONAPESCA, 2014).

La producción en la acuicultura comprende más de 600 especies diferentes, la cría de tilapias, es uno de los cultivos acuícolas más extendidos en el mundo (FAO,



2014) y se ha convertido en uno de los más importantes productos para consumo humano y comercialmente es la segunda especie más cultivada después de la carpa. Esta popularidad se debe a las cualidades que presenta, crece rápidamente, se adapta a vivir en altas densidades, se desarrolla bien en aguas poco oxigenada, dulce y salada. Los volúmenes de producción de tilapia han ido incrementando de 4.5 millones de toneladas en 2012, alcanzando la cantidad de 5.3 millones de toneladas en 2014 (Yacout et al., 2016). En México la tilapia es el principal pescado cultivado, en 2014 se obtuvo 128.8 mil toneladas (CONAPESCA, 2014).

Para el cultivo de tilapia se emplean sistemas extensivos, semi-intensivos e intensivos, los cuales se distinguen en función de la densidad de población del cultivo. La producción de tilapia suele ser muy versátil debido a que se adapta fácilmente al medio que se cultiva y a diferentes tipos de infraestructura como estanques, jaulas flotantes, canales de corriente o flujo rápido y tanques de geomembrana con o sin recirculación de agua (SAGARPA, 2011).

Los cultivos tradicionales enfrentan algunas problemáticas actualmente, los efectos negativos incluyen la contaminación orgánica, en la cual existe un exceso de nutrientes, provocando el agotamiento de oxígeno, la reducción en la calidad del agua, crecimiento de microorganismos que afectan a los peces y finalmente causa la muerte de los organismos cultivados (Boesch et al., 2001; Aubin et al., 2006).

Debido a las consecuencias negativas que existen sobre los hábitats naturales son requeridas tecnologías que disminuyan el daño al medio ambiente. Los sistemas de recirculación en la acuicultura son considerados sustentables, debido a que el agua se reutiliza parcialmente después de someterse a varios tratamientos, en donde cada etapa tiene el objetivo de reducir la cantidad de productos de desecho excretados por los peces (Martins et al., 2010; Badiola et al., 2012; Bregnballe, 2015). Además, ofrecen ventajas como: reducir el consumo de agua, ofrece un mejor manejo de residuos sólidos, aumenta la higiene del sistema y disminuye el riesgo de enfermedades en el cultivo (Piedrahita, 2003; Verdegem et al., 2006; Murray et al., 2014).

Otra problemática, es que durante décadas, las prácticas de la acuicultura se han centrado únicamente en aumentar la productividad, dejando de lado el mejoramiento de la calidad nutricional de los filetes de pescado (Garduño-Lugo et al., 2007; Muchiri et al., 2015).

Uno de los factores más importantes en los cultivos de tilapia es la densidad de población, que está relacionada con la competencia por el alimento, territorialidad relacionada a agresiones, la disminución del crecimiento, supervivencia y afecta el rendimiento y la calidad nutricional del pescado (Conte, 2004; Ashley, 2007; Abdelhamid et al., 2017). Otro elemento importante para el desarrollo de la tilapia es la temperatura, debido a que afecta el crecimiento, el consumo de oxígeno y se ha observado que tiene influencia en la composición química del pescado, principalmente proteínas y ácidos grasos (Al-Asgah and Ali, 1997; XIE et al., 2011). Es por esto que la determinación de las condiciones ambientales para el cultivo de tilapia es esencial para obtener buenos rendimientos en la producción (El-Sayed, 2006).

Sin embargo, se tiene poca información acerca del efecto que tiene la densidad de población y la temperatura sobre el rendimiento y la calidad nutricional en los cultivos de tilapia, se debe considerar que las condiciones ambientales y las prácticas de acuicultura varían en gran medida de una región a otra, es por esto que es importante se realicen más estudios de este tipo (Mohanty et al., 2017; Nunoo and Asase, 2017). Durante este estudio se pretende determinar la capacidad de crecimiento y perfil bromatológico de la tilapia bajo dos tratamientos de temperatura (Controlada y sin control) y utilizando tres densidades de cultivo, realizando esta comparación se podrá identificar el tratamiento más viable para obtener un buen rendimiento y asegurar una buena calidad nutricional.

## 2. HIPÓTESIS

El cultivo de tilapia en condiciones de temperatura a 28°C y densidad poblacional de 270 org/m<sup>3</sup> tienen efecto en el crecimiento, rendimiento y calidad nutricional de la tilapia (*Oreochromis niloticus*) al menos de un 5%.

## 3. OBJETIVOS

### 3.1 Objetivo general

Determinar las mejores condiciones de temperatura y densidad de población para obtener los mayores niveles de crecimiento, rendimiento y calidad nutricional de la tilapia (*Oreochromis niloticus*) en condiciones de invernadero en la Universidad Autónoma de Querétaro campus Amazcala.

### 3.2 Objetivos específicos

- Determinar el crecimiento, rendimiento y calidad nutricional en tres diferentes densidades de cultivo.
- Determinar el crecimiento, rendimiento y calidad nutricional de la tilapia (*Oreochromis niloticus*) en un sistema de recirculación acuícola con temperatura regulada en tres densidades de cultivo.
- Determinar el crecimiento, rendimiento y calidad nutricional de la tilapia (*Oreochromis niloticus*) en un sistema de recirculación acuícola sin temperatura regulada en tres densidades de cultivo.
- Determinar la densidad de cultivo óptima de tilapia (*Oreochromis niloticus*) en un sistema de recirculación acuícola en condiciones de invernadero en la Universidad Autónoma de Querétaro campus Amazcala.

## 4. REVISIÓN DE LITERATURA

### 4.1 Acuicultura

El concepto de acuicultura se refiere al cultivo de especies acuáticas vegetales y animales en un ambiente controlado. Esta actividad implica algún tipo de intervención en el proceso de crianza, como la regulación de la densidad de cultivo, condiciones ambientales favorables, intervalos de alimentación, tipo de alimentos y ofrecer protección contra los depredadores con la finalidad de mejorar la producción de la especie cultivada (Troell et al., 2013).

El cultivo de plantas y animales acuáticos es una actividad que tiene cientos de años. La acuicultura fue practicada en Egipto y China en los años 2500 a.c y 1100 a.c respectivamente, los cultivos eran tradicionales y se caracterizó por ocupar pocos insumos y bajas densidades de población (Sapkota et al., 2008). Además fue una actividad que tuvo un desarrollo después de la segunda guerra mundial. En 1950, la producción mundial de pescado fue de 2 millones de toneladas (Troell et al., 2013).

La acuicultura ha sido muy importante para mantener la demanda de pescado durante siglos y se ha convertido en una industria muy importante en el mundo, hoy en día suministra un tercio del pescado consumido en el mundo. Esta actividad será el principal medio de obtención de alimentos en un futuro, durante las últimas tres décadas su producción a incrementado de 7-11% al año (FAO, 2016).

#### 4.1.1 Actualidad de la acuicultura

La producción mundial de pescado sigue creciendo, la acuicultura se mantiene como uno de los sectores de producción de alimentos de más rápido crecimiento. En 1974 la acuicultura proporcionó solo el 7% del pescado para consumo humano, este porcentaje aumentó a 26% en 1994 y al 39% en 2004. En 2012, la acuicultura proporcionó casi la mitad del pescado destinado a la alimentación humana. Para 2014 el sector acuícola superó por primera vez la producción de pescado capturado en el medio natural (FAO, 2016). En México la tilapia es el principal pescado cultivado,

obteniéndose un total nacional de 128 mil 526 toneladas en 2014, Jalisco fue el estado con mayor producción con el 20.76 %, seguido por Chiapas con el 18.58% y Michoacán con el 12.10%, acumulando el 51.44 % de la producción total (SAGARPA, 2015).

La contribución a la dieta de la acuicultura es importante en términos de proteína animal, lípidos y micronutrientes. El mundo hoy en día se está enfrentando a un desafío crítico que es alimentar la creciente población, la cual se espera que llegue a 9.7 mil millones para el 2050 (FAO, 2016). A consecuencia del crecimiento de la población, el consumo aparente de pescado per cápita a nivel mundial registró un aumento en un promedio de 9.9 kg en la década de 1960 a 14.4 kg en la década de 1990 y 19.7 kg en 2013 (Nadarajah and Flaaten, 2017) y seguirá aumentando hasta superar los 20 kg en 2015, en México el consumo de pescado estaba en 8.91 kg y al cierre del 2015 aumentó 3.1 kg llegando a 12.01 kg (CONAPESCA, 2014). Si se desarrolla y practica responsablemente, la acuicultura puede generar beneficios duraderos para la seguridad alimentaria mundial y crecimiento económico (FAO, 2014).

#### 4.2 Sistemas de producción acuícola

La acuicultura implica el confinamiento de una especie en un sistema seguro bajo condiciones ambientales controladas en las cuales puede prosperar sin predadores naturales (Troell et al., 2013). La tilapia puede ser cultivada en diferentes medios siendo el más común los estanques y por lo general se maneja el monocultivo. El cultivo de peces en estanques se puede clasificar en tres tipos: extensivos, semi-intensivos e intensivos (Atlatenco, 2007).

En los sistemas extensivos la alimentación de los peces se da de forma natural y el manejo se limita a la siembra y cosecha de los peces, la participación del factor humano es mínima. En el sistema semi-intensivo se tiene más control del ambiente para obtener una mayor capacidad de producción, se requiere de la adición de fertilizantes orgánicos y alimento comercial balanceado, con niveles de proteína desde 30 a 35% de proteína dependiendo de la fase de producción para suplementar la dieta de los peces debido a que se incrementa la densidad de población cultivada (Celik, 2012), en estos sistemas son importantes los niveles de temperatura, amonio, pH y

nivel de oxígeno disuelto, la participación del humano es vital puesto que se requiere una supervisión al sistema cada determinado tiempo (Atlatenco, 2007).

En los cultivos intensivos la calidad del agua suministrada es importante, también el cuidado y atención que se le debe dar al sistema. En este sistema es importante conocer constantemente el nivel de oxígeno disuelto, ajustar las densidades de cultivo y tasa de alimentación para reducir la mortalidad (Atlatenco, 2007).

#### 4.3 Cultivo en sistemas de recirculación

Los sistemas de recirculación han ganado gran interés en los recientes años debido a la importancia que tienen en la producción de sistemas intensivos mientras que al mismo tiempo minimizan el impacto ambiental del gasto de agua (Dalsgaard et al., 2013).

La investigación científica más temprana sobre los sistemas de recirculación tuvo su origen en Japón en la década de 1950, se centró en el diseño de biofiltros para la producción de la carpa y fue impulsada por la necesidad de utilizar recursos hídricos que fueran más productivos (Murray et al., 2014).

Los sistemas de recirculación son una tecnología para el cultivo de organismos acuáticos utilizando el reúso de agua, pueden ser definidos como sistemas que incorporan tratamientos y reutilización de agua, en los que se renueva al menos el 10% del volumen total. En un sistema de recirculación es necesario tratar el agua de proceso continuamente para eliminar los productos de desecho excretados por los peces y agregar el oxígeno para mantener los peces vivos y en buenas condiciones de salud, los principales procesos utilizados de estos sistemas son: la eliminación de sólidos, biofiltración, aireación y desgasificación, oxigenación y desinfección (Bregnballe, 2015).

En un estudio de evaluación del rendimiento de tilapia en cultivos hiper-intensivos con recirculación y con recambio de agua del 2.1% diario, utilizaron densidades de 400, 500 y 600 org/m<sup>3</sup>. Encontraron que la densidad de cultivo no afectó la sobrevivencia (89.5 a 93.6%), la tasa de crecimiento fue significativamente mayor

0.96 g/día y 0.92 g/día en los tratamientos de 400 y 500 org/m<sup>3</sup> que en el de 600 org/m<sup>3</sup> (83 g/día). También observaron que el tratamiento con la mayor densidad de cultivo (600 org/m<sup>3</sup>) se vio afectado el tamaño de los peces y su homogeneidad (Gullian-Klanian and Arámburu-Adame, 2013).

En los sistemas de recirculación se ofrecen varias ventajas como: cultivar peces en un ambiente controlado, reducción del uso de suelo y agua, disminución de costos energéticos, se controla la población de peces en los tanques de producción, existe la posibilidad de cosechar el producto en cualquier época del año, se puede controlar el tamaño del pescado, se ofrece una calidad constante al mercado y los cultivos son libres de químicos y metales pesados (Timmons and Ebeling, 2010).

#### 4.4 Tilapia

El nombre de tilapia fue empleado por primera vez por Smith en 1840, es un pez de agua dulce que pertenece a la familia Cichlidae, la palabra que le da el nombre a esta especie se deriva de la palabra nativa de Bechuana (África) “thlape” que significa pez. Su nombre común es Tilapia sin embargo este también se utiliza para describir tres géneros de peces, *Tilapia*, *Sarotherodon* y *Oreochromis*. Habitan las aguas dulces y salobres de África, el Medio Oriente, las zonas costeras de la India, América central, del Sur y el Caribe. Se le considera la segunda especie más cultivada en el mundo en lo que a agua dulce se refiere (El-Sayed, 2006).

Las tilapias han sido introducidas a países tropicales y subtropicales, debido a su gran facilidad para ser cultivadas, tiene otras ventajas como: alta adaptabilidad a diferentes condiciones del medio, fácil reproducción, alta resistencia a enfermedades, alta productividad, buen sabor y textura de su carne y aceptan todo tipo de alimentos lo que las convierte en peces omnívoros. En México se introdujeron por primera vez en 1964, en el centro Acuícola de Temazcal, en el estado de Oaxaca, allí se realizaron los primeros estudios y se desarrollaron técnicas para su cultivo bajo las condiciones de medio ambiente de la zona (SAGARPA, 2012). La principal razón de esta introducción fue el obtener una proteína de alta calidad a un bajo costo, específicamente en las zonas rurales (Fitzsimmons, 2000).

#### 4.4.1 Temperatura del agua

Los organismos acuáticos susceptibles de cultivo de aguas frías, templadas y cálidas tienen un rango óptimo de temperatura, así, por debajo o por encima del rango óptimo pueden ser letales, afectando el metabolismo de los peces. Los peces son animales poiquilotermos, o sea, que su temperatura corporal depende de la temperatura del medio y altamente termófilos, dependientes y sensibles a los cambios de temperatura (El-Sayed, 2006). La tilapia es intolerante a bajas temperaturas siendo un factor muy serio a considerar. A los 16°C su crecimiento se detiene y ya no se alimenta. Puede soportar temperaturas de 10°C solo por un breve tiempo, su temperatura óptima de crecimiento y reproducción está en el rango de 25 a 36 °C (Celik, 2012).

#### 4.4.2 Salinidad

Las tilapias son especies eurihalinas, significa que pueden vivir en aguas dulces, salobres y marinas, por lo que conservan en menor o mayor grado la capacidad de adaptarse a vivir en aguas de diferentes concentraciones de salinidad (El-Sayed, 2006). La tilapia puede adaptarse tanto en agua dulce como en agua de mar. Sin embargo, en estas condiciones disminuyen su tasa de fecundidad lo que hace que los reproductores tengan pérdidas.

#### 4.4.3 Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto es uno de los factores ambientales más importantes que afectan la alimentación, crecimiento y metabolismo de los peces, su grado de saturación es directamente proporcional a la temperatura y al pH (El-Sayed, 2006). Se sugiere que la tasa de crecimiento específica (SGR) se encuentra correlacionada con los niveles de oxígeno disuelto, los resultados fueron: Concentración: 90-100% de saturación (>7 mg/L), SGR: 100%. Fluctuación a lo largo de día: entre 7-3 mg/L, SGR: 56%. Concentraciones medias: 40-50% de saturación entre 3-4 mg/L, SGR: 41%. Concentración baja <40% de saturación 0.2-2.2 mg/L, SGR: 16% (Celik, 2012).



#### 4.4.4 Potencial de hidrógeno

Es la concentración de iones de hidrógeno en el agua. Los organismos acuáticos sobreviven sin problemas en aguas neutras ( $\text{pH} = 7.0$ ) o ligeramente alcalinas, en peces el rango normal se encuentra entre 6.5 y 9, estas condiciones las permite la secreción normal del mucus en la piel. La tilapia muestra un mayor crecimiento en aguas con un pH cercano a 7. Por lo general el agua dulce presenta un pH entre 6.5-8.5, pero de no ser así se puede agregar sistemas tampón a base de carbonatos. Se debe considerar que durante el día la actividad fotosintética hace que los niveles de  $\text{CO}_2$  bajen ocasionando un incremento en el pH, por la noche ocurre lo contrario y se forma ácido carbónico y el pH baja (El-Sayed, 2006).

#### 4.5.5 Amonio $\text{NH}_4^+$

Es el principal metabolito de desecho que los organismos excretan vía branquias u orina. En el agua se puede encontrar como  $\text{NH}_3$  (tóxica para los peces) y como  $\text{NH}_4^+$  (menos tóxica). A bajas concentraciones de oxígeno disuelto el amonio eleva su toxicidad y a pH superiores a la neutralidad hay una porción mayor que se convierte de la forma iónica a la no ionizada (El-Sayed, 2006). La concentración letal es aquella superior a los 2 mg/L en los organismos adultos, mientras que en juveniles es de 1mg/L cuando se combina con bajas concentraciones de oxígeno disuelto. Concentraciones muy bajas de la forma no ionizada provoca en los peces una disminución de su apetito. Por lo tanto, es recomendable crear un sistema que garantice la mínima concentración posible de la forma no ionizada o tóxica para los organismos (Celik, 2012).

#### 4.4.6 Nitrito $\text{NO}_2^-$

Los nitritos son producto de la actividad biológica relacionada con la descomposición de los componentes proteicos de la materia orgánica. Son generados de la transformación del amoniaco a nitratos, Niveles tóxicos de nitrito son comunes en sistemas de recirculación y altas densidades de producción, para prevenir su aumento, se debe hacer recambios de agua, limitar la alimentación y evitar concentraciones altas

de amonio en el agua. Los nitritos interfieren en la habilidad de la sangre de los organismos para absorber oxígeno (Atlatenco, 2007).

#### 4.4.7 Nitrato $\text{NO}_3^-$

La concentración de nitratos parece no tener efecto sobre la tilapia, pero peces expuestos a altos niveles de nitrato disminuyeron considerablemente su actividad inmunológica (Timmons and Ebeling, 2010).

### 4.5 Requerimientos nutricionales de la tilapia

La alimentación es muy importante para la tilapia, si el alimento no cubre su demanda nutricional, esto puede reducir su crecimiento y producción lo que provocará pérdidas económicas.

#### 4.5.1 Proteínas

Las proteínas están formadas por aminoácidos. La tilapia no puede sintetizar algunos aminoácidos que son indispensables en su dieta. Estos aminoácidos son: valina, arginina, histidina, treonina, lisina, isoleucina, metionina, fenilalanina, leucina, y triptófano. La selección de los niveles de proteína en el alimento depende del peso del pez, del tipo de cultivo, función fisiológica y el factor económico (El-Sayed, 2006). Los requerimientos en proteína de un adulto están entre un 20-30%, mientras que para un juvenil se necesita entre un 30-40% de proteína (Celik, 2012).

#### 4.5.2 Lípidos

Los lípidos en el alimento para tilapia son importantes, funcionan como fuente de energía metabólica y como fuente de ácidos grasos esenciales (Atlatenco, 2007). Se ha observado que se puede reducir el consumo de proteína a la tilapia de 33.2 a 25.7% al aumentar su dieta en lípidos en un 5.7 a 9.4% y de carbohidratos de 31.9 a 36.9%. Sin embargo, una dieta con el 12% de lípidos afecta el crecimiento de los juveniles e incrementa la acumulación de grasa en la tilapia. Normalmente el contenido de aceite en el alimento de las tilapia debe ser de un 4-5% (Celik, 2012).

La relación proteína-grasa es crucial para cualquier dieta, un exceso de grasa en el alimento podría contaminar el agua y una insuficiencia afecta el crecimiento. Para niveles de 40% de proteína se recomienda niveles de grasa de 6 a 8%, con 35% de proteína el nivel de grasa es de 4.5 a 6% y con niveles de 25 a 30% de proteína se recomienda de 3 a 3.5% de grasa. Las grasas requeridas para los peces son poliinsaturadas que son más fácilmente asimilables (Atlatenco, 2007).

#### 4.5.3 Carbohidratos

La tilapia no tiene un requerimiento específico de carbohidratos sin embargo son utilizados como fuente de energía. Los carbohidratos pueden tener factores anti-nutricionales los cuales pueden afectar su metabolismo, como por ejemplo el salvado de trigo que contiene un inhibidor de proteasa que puede afectar la digestibilidad de la tilapia (El-Sayed, 2006).

#### 4.6 Densidad de población en el cultivo de tilapia

La densidad poblacional es un factor esencial que afecta la salud de los peces en la industria de la acuicultura, este término es utilizado para referirse al peso de los peces por unidad de volumen y está relacionado también con el número máximo de peces que un sistema de cultivo puede soportar a través del suministro de oxígeno y eliminación de desechos metabólicos como el CO<sub>2</sub> y amonio (Ellis et al., 2001). Los efectos de las densidades de población son asociadas con el incremento de competencia por el alimento, tamaño de pescado, agresión, lesiones físicas y contribuye a la baja calidad del agua. Existe una correlación positiva entre la densidad de población y el rendimiento en un cultivo de tilapia, mientras que se observa una correlación negativa entre la densidad de población y el crecimiento individual de los peces dentro del cultivo (El-Sayed, 2006).

En un estudio se reportó que la tasa de crecimiento y el peso final del cultivo de tilapias fue significativamente mayor en un grupo de una densidad de población de 50 ind/m<sup>3</sup> y la tasa de crecimiento más baja se presentó en el grupo de 150 ind/m<sup>3</sup>. También que los pescados del grupo de 100 ind/m<sup>3</sup> tuvieron la mayor tasa de

sobrevivencia (88.6%), mientras que la menor tasa de sobrevivencia (81.3%) la obtuvo el grupo de 50 ind/m<sup>3</sup> (Nunoo and Asase, 2017).

Existen otras especies con las cuales se ha estudiado el efecto de la densidad de población, Turnbull et al., (2005) cultivó Salmón del Atlántico en jaulas marinas y observaron que las densidades por encima de 22Kg/m<sup>3</sup> están asociadas con la reducción de la salud del Salmón.

En Noruega la media de la densidad de población de sus cultivos es de 40-50 Kg/m<sup>3</sup>, mientras que en Europa, Norte América y Australia manejan un máximo de densidad de población en sus cultivos de 60 kg/m<sup>3</sup>, es por este motivo que en la Unión Europea se planea introducir un máximo de 25-30 Kg/m<sup>3</sup>, pero estas regulaciones no han sido aún establecidas (Çagiltay et al., 2015).

En diferentes sistemas y con diferentes especies la forma en que los efectos de la densidad poblacional como: competencia de alimento, tamaño de pescado, territorialidad y baja calidad del agua se combinan para afectar la salud de los peces difiere, por lo que es difícil proporcionar guías para obtener una densidad de cultivo óptima para todo tipo de cultivos. En los cultivos de tilapia, el suministro y la demanda del mercado determinan el precio de los productos, así que el acuicultor debe determinar una densidad de cultivo adecuada que le permitan producir el pescado adecuado para la demanda del consumidor (El-Sayed, 2006).

#### 4.7 Calidad nutrimental de la tilapia

Uno de los sectores de producción de alimentos de mayor crecimiento es la acuicultura, la cual puede tener un rol importante en la erradicación del hambre y malnutrición. El pescado representa un alimento nutritivo y provee al menos el 20% de la ingestión de proteínas animales para un tercio de la población mundial (Mohanty et al., 2017).

Una dieta saludable debe incluir suficientes proteínas que contengan todos los aminoácidos y ácidos grasos esenciales, vitaminas y minerales. El pescado es una fuente rica en proteínas de alta calidad y fácil digestión, también aporta grasas

insaturadas, estos nutrientes tienen beneficios para la salud en la protección de enfermedades cardiovasculares, contribuyen al desarrollo del cerebro y sistema nervioso en fetos y niños (FAO, 2016).

Sin embargo, para aprovechar el potencial nutritivo del pescado sugiere hacer estudios de su composición nutricional, debido a que no puede ser generalizada ya que existen una gran diversidad de especies que viven en diferentes tipos de condiciones climáticas y pueden diferir en su composición nutricional (Mohanty et al., 2017). La composición corporal del pescado puede ser afectado por varios factores que incluyen, la densidad de población, la especie, condiciones ambientales, tamaño del pescado, nivel de proteína en la dieta, tipo de alimento y calidad del agua (Garduño-Lugo et al., 2003).

Samy Yehya El-Zaeem, (2012) realizó un estudio acerca de la variación en la composición química entre tilapia cultivada (*Oreochromis niloticus*) y tilapias nativas colectadas de diferentes lagos en Egipto. Se observó una diferencia significativa en el contenido de humedad siendo la tilapia cultivada la que obtuvo mayor cantidad ( $80.32 \pm 0.39\%$ ) que las tilapias nativas ( $72.94 \pm 0.76\%$ ). En cuanto a la cantidad de proteína y lípidos, en las tilapias cultivadas se encontraron valores de 58.14% y 21.95% (base seca) respectivamente, y en las tilapias nativas 55.8% y 21.74% respectivamente, pero no hubo diferencia significativa.

Por su parte, Garduño-Lugo et al., (2007) comparó la calidad nutricional de dos variedades de tilapia, la variedad del Nilo (*Oreochromis niloticus*) y la variedad Florida red. En este estudio no se encontró diferencias significativas para el contenido de humedad, cenizas y proteína, pero la variedad del Nilo (*Oreochromis niloticus*) contenía significativamente más lípidos (0.97%) que la variedad Florida red (0.7%).

En otro estudio con otra especie, se mostró el efecto que tienen los sistemas de cultivo extensivo y semi-intensivo sobre el contenido de lípidos en un cultivo de carpa. Encontró que los peces cultivados en un sistema extensivo contenían una cantidad de lípidos significativamente menor ( $2.3 \pm 0.8\%$ ) que los peces cultivados en el sistema semi-intensivo ( $4.3 \pm 1.2\%$ ) (Másílko et al., 2015).

El factor más evidente que dificulta el aumento del consumo de pescado es su disponibilidad a precios bajos para la gente de bajos recursos económicos. Los precios suben como consecuencia del crecimiento de la población, aumento de la demanda y limitaciones de suministro. La acuicultura ha ayudado a reducir esta diferencia, los cultivos de tilapia contribuyen a que los productos de pescado sea más accesible y precio bajo (FAO, 2016).

## 5. METODOLOGÍA

### 5.1 Sitio experimental

El trabajo se llevó a cabo en el área experimental acuícola del laboratorio de bioingeniería ubicado en el campus Amazcala de la Universidad Autónoma de Querétaro, el poblado de Amazcala pertenece al municipio del Marqués, Querétaro. Colinda al Norte con el municipio de Querétaro, el estado de Guanajuato y el municipio de Colón; al Este con el municipio de Colón; al Sur con los municipios de Huimilpan, Pedro Escobedo y Querétaro; al Oeste con el municipio de Querétaro.



Figura 1. Laboratorio de bioingeniería Campus Amazcala. Fuente: Elaboración propia.

### 5.2 Conformación del sistema de recirculación acuícola para el cultivo de tilapia

#### 5.2.1 Invernadero

Se utilizó un invernadero cubierto en su totalidad por plástico blanco con un 30% de sombra. El invernadero tenía forma rectangular (Figura 2), con medidas de 45m de largo por 16m de ancho con un área total de 720m<sup>2</sup>. Se ventiló por medio de dos ventanas laterales y una frontal. Las ventanas laterales y frontal del invernadero contaban con una tela protectora.



Figura 2. Exterior de invernadero acuícola. Campus Amazcala. Fuente: Elaboración propia.

#### 5.2.2 Sistema de recirculación acuícola.

Para este experimento se utilizaron como unidades experimentales 18 tanques pequeños de PVC cuadrados con puntas redondeadas, con una capacidad de 360L y dimensiones de 50cm de ancho, 120 cm de largo y 60 cm de profundidad (Figura 3A).

Se utilizaron dos colectores de agua (Figura 3B) con una capacidad de 1000L cada uno que hizo la función de mantener el nivel de los tanques experimentales pequeños. De los colectores el agua fue transportada hacia los tanques experimentales con una bomba sumergible marca BOYU para 10,000L7H (Figura 3C). Para la fase mecánica y biológica de filtración se empleó un filtro comerciales (Figura 3D) de la marca Boyu EFU-13500 Pond Filter con luz UV, de 115V, 50W/60W, de una capacidad de 8,000 a 15,000L/h de 54cm x 37.9cm x 55.2cm. En la parte de la calefacción, la temperatura fue regulada con un equipo Electro EVO 230V Electric Swimming Pool Heater Titanium Element (Figura 3E) de la marca Electro Engineering para un flujo de agua de 1,000 a 17,000L/h. Para oxigenar el agua se utilizó un generador de oxígeno marca Airsep modelo topaz (Figura 3F), con dimensiones 48 x 25 x 69 cm (largo-ancho-altura), el cual genera un flujo de oxígeno de 0.31 Nm<sup>3</sup>/hr y trabaja con una presión de 62 Kpa (9 psig) produciendo oxígeno con una pureza del 93%.





Figura 3. Equipo empleado en los sistemas de recirculación. Tanques de cultivo (A), colector de agua (B), bomba sumergible (C), filtro (D), calentador de agua (E) y oxigenador (D). Fuente: Elaboración propia.

### 5.2.3 Construcción del sistema de recirculación

Cada sistema se conformó de 9 tanques de cultivo colocados de tres en tres formando tres líneas. En cada tanque se conectó un tubo (PVC 1 1/2") de 50 cm de alto, el cual permitía dar el nivel máximo de 300 L a cada uno de los tanques de cultivo (Figura 4).



Figura 4. Sistema de cultivo con tubo de PVC para dar nivel a 300 L. Fuente: Elaboración propia.

Cuando los tanques de cultivo llegaban a su capacidad máxima de agua, el sobrante de agua era transportada por gravedad por la línea principal para drenar al tinaco colector completamente enterrado, donde el agua caía a una altura de 30 cm, esta acción tenía la ventaja de oxigenar el agua, además se colocaron mangueras con difusores para suministrar oxígeno al agua contenida en los tinacos (Figura 5).



Figura 5. Salida de agua hacia colector y bombeo de agua hacia tanques de cultivo.  
Fuente: Elaboración propia.

El agua del interior del tinaco colector enterrado fue transportada hacia el filtro biológico por una bomba sumergible, después de pasar por el proceso de filtración, el agua regresaba a cada uno de los tanques de cultivo a través de una tubería (PVC 1") con una válvula que regulaba el flujo a 2 L/min (Figura 6). Antes de introducir los peces el agua se dejó ciclar durante 30 días con el sistema en funcionamiento, este periodo de maduración es necesario para que se asiente en el filtro una colonia de bacterias que serán de beneficio para transformar las sustancias tóxicas que se produzcan en el sistema de recirculación.



Figura 6. Paso de agua a través de filtro y retorno a tanques de cultivo. Fuente: Elaboración propia.

#### 5.2.4 Distribución del sistema de recirculación

El experimento se llevó a cabo utilizando dos sistemas de cultivo. En el primer sistema se utilizaron 9 tanques, los cuales contaban con un calentador para elevar la temperatura del agua (A). El segundo sistema consistió también de 9 tanques de cultivo, en este caso el agua estaba a temperatura ambiente (B). En ambos casos los tanques estuvieron distribuidos en filas de tres por tres y el agua de ambos sistemas fue recirculada por bombas sumergibles desde el colector de agua a través de los filtros hacia los tanques de cultivo (Figura 7).

Se realizó una prueba con los sistemas de recirculación de agua para tilapia antes de comenzar el experimento, con la finalidad de asegurar que las condiciones de cultivo para los organismos fueran las adecuadas y que los sistemas se mantuvieran estables.

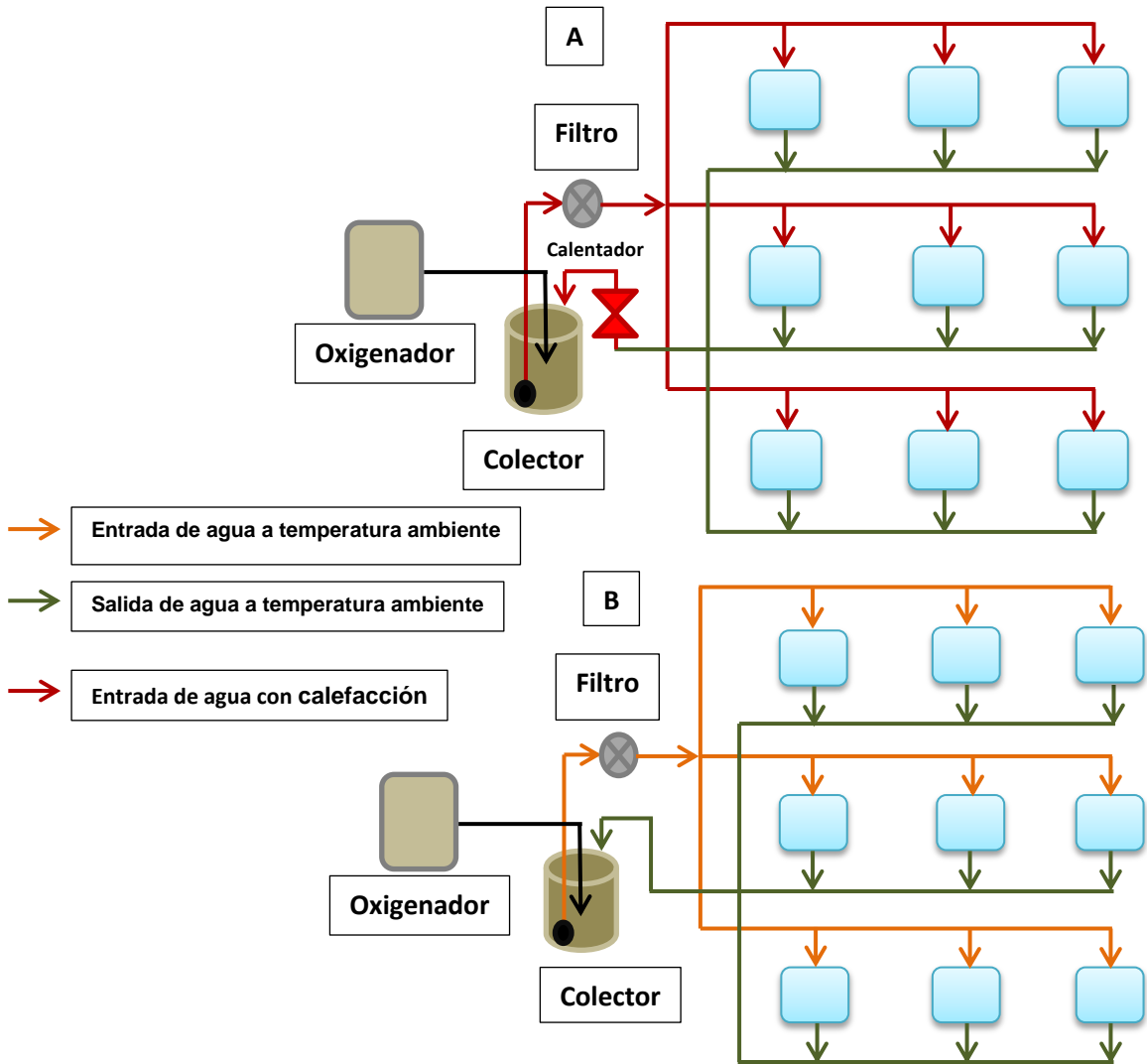


Figura 7. Esquema del sistema de recirculación con calefactor de agua (A) y sistema de recirculación con agua a temperatura ambiente (B). Fuente: Elaboración propia

### 5.3 Diagrama general de proceso

En la figura 8 se observa el diagrama general del proceso para este estudio. Como entrada al proceso se tienen los elementos que hicieron posible el experimento, es decir, la tilapia, el alimento, el sistema de recirculación y el agua. La respuesta fue el crecimiento de los peces (peso y longitud), pero también fue calculado el rendimiento y la calidad nutricional en los peces cosechados al final del periodo de la experimentación. Los factores no controlables fueron las condiciones ambientales dentro del invernadero, es decir, la temperatura del ambiente, la humedad relativa y la radiación solar, mientras que para el agua de cultivo el factor no controlable fue la producción de compuestos nitrogenados excretados por los peces. Como factores controlables se tuvieron el pH, el oxígeno disuelto, mientras que la densidad de población y la temperatura se tomaron como factores controlables estudiados, debido a la importancia que pudieran tener sobre las variables de respuesta.

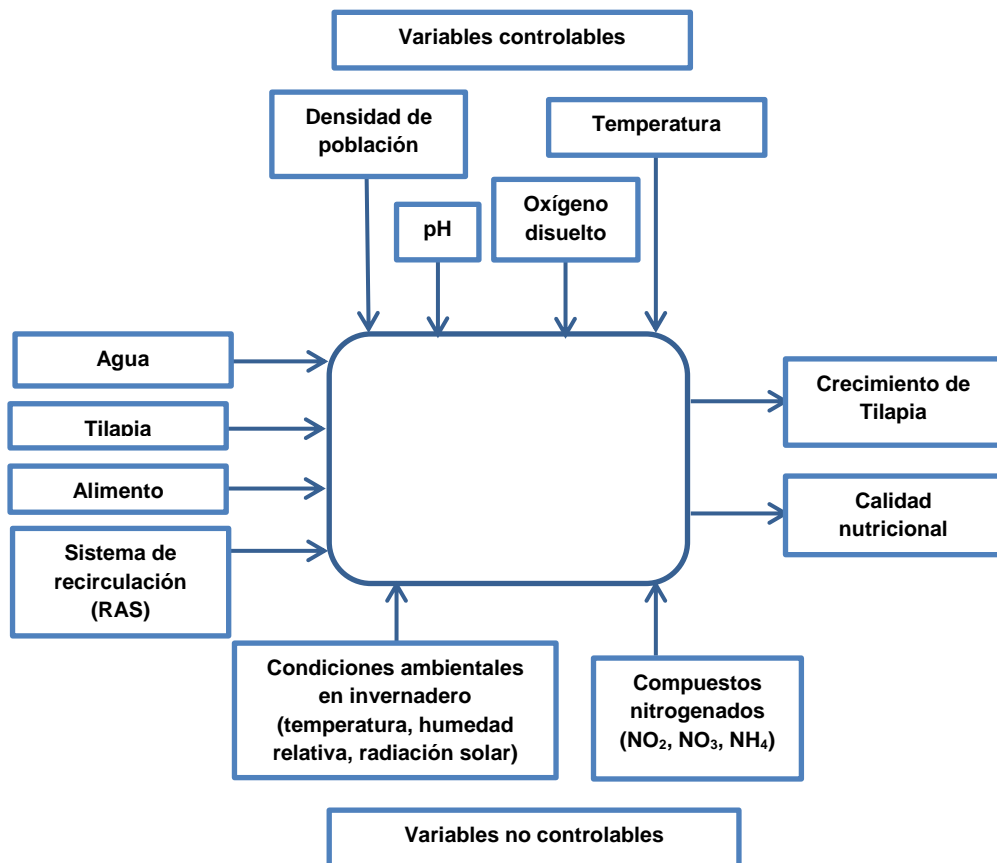


Figura 8. Diagrama de proceso para el cultivo de tilapia en un sistema de recirculación.

#### 5.4 Material biológico

Se emplearon 840 tilapias (*Oreochromis niloticus*) variedad supermacho en su etapa de alevines, los cuales se distribuyeron en los 18 tanques experimentales en diferentes densidades. Las tilapias que se ocuparon en este proyecto fueron obtenidas de la granja Zidedho ubicada en Ixmiquilpan, estado de Hidalgo.



Figura 9. Alevines de tilapia de granja Zidedho, Ixmiquilpan, Hidalgo. Fuente: Elaboración propia.

##### 5.4.1 Alimentación

Las tilapias variedad supermacho se mantuvieron en aclimatación por 15 días antes de que los ensayos comenzaran, cuando este tiempo transcurrió, se colocaron en los tanques del sistema de recirculación. Cuando se les ofreció alimento, las horas de alimentación fue a las 8:30 am, 12:30 pm y 16:30 pm, tomando en cuenta la ración como el 10% de la biomasa. Se utilizará alimento comercial Nutripec marca Purina. La composición del alimento utilizado en la dieta de los peces fue la siguiente: 32% de proteína, 15% lípidos, 11% cenizas, 3% fibra y 12% de humedad. Este alimento se aplicará en la etapa de desarrollo y crecimiento.



## 5.5 Métodos

### 5.5.1 Diseño de experimento

En este proyecto el diseño de experimentos (Tabla 1) se conformó de dos factores, la densidad poblacional y la temperatura. Para el factor densidad poblacional se consideraron tres niveles (67 org/m<sup>3</sup>, 135 org/m<sup>3</sup> y 270 org/m<sup>3</sup>), como los tanques de cultivo para el experimento fueron llenados de agua a una capacidad de 300 L, la cantidad de tilapias para cada tratamiento es descrita en la tabla 1, las cuales corresponden a la densidad poblacional antes mencionada. El factor temperatura consistió de dos niveles, uno con control de temperatura y otro sin control de temperatura.

Tabla 1. Factores y niveles del diseño de experimentos. Fuente: Elaboración propia

	<b>Factores</b>	
<b>Niveles</b>	<b>Densidad de población (org/0.3 m<sup>3</sup>)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
<b>1</b>	20	Sin control
<b>2</b>	40	Con control
<b>3</b>	80	_____

La combinación de los factores y niveles dieron como resultado seis tratamientos, los cuales, se hicieron por triplicado (Tabla 2).

Tabla 2. Combinación de tratamientos del diseño de experimentos. Fuente: Elaboración propia

<b>Combinación de Tratamientos</b>		
	<b>Niveles</b>	
<b>Número de tratamiento</b>	<b>Densidad de población (org/0.3 m<sup>3</sup>)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
<b>T1</b>	20	Con control
<b>T2</b>	40	Con control
<b>T3</b>	80	Con control
<b>T4</b>	20	Sin control
<b>T5</b>	40	Sin control
<b>T6</b>	80	Sin control

De esta manera tres tratamientos se llevaron a cabo con control de temperatura, T1 (20 org/0.3m<sup>3</sup> y control de temperatura), T2 (40 org/0.3m<sup>3</sup> y control de temperatura) y T3 (80 org/0.3m<sup>3</sup> y control de temperatura) y tres tratamientos sin control de temperatura T4 (20 org/0.3m<sup>3</sup> y sin control de temperatura), T5 (40 org/0.3m<sup>3</sup> y sin control de temperatura) y T6 (80 org/0.3m<sup>3</sup> y sin control de temperatura). En la Figura 10 se muestra como fueron distribuidos los tratamientos en los dos sistemas de recirculación.



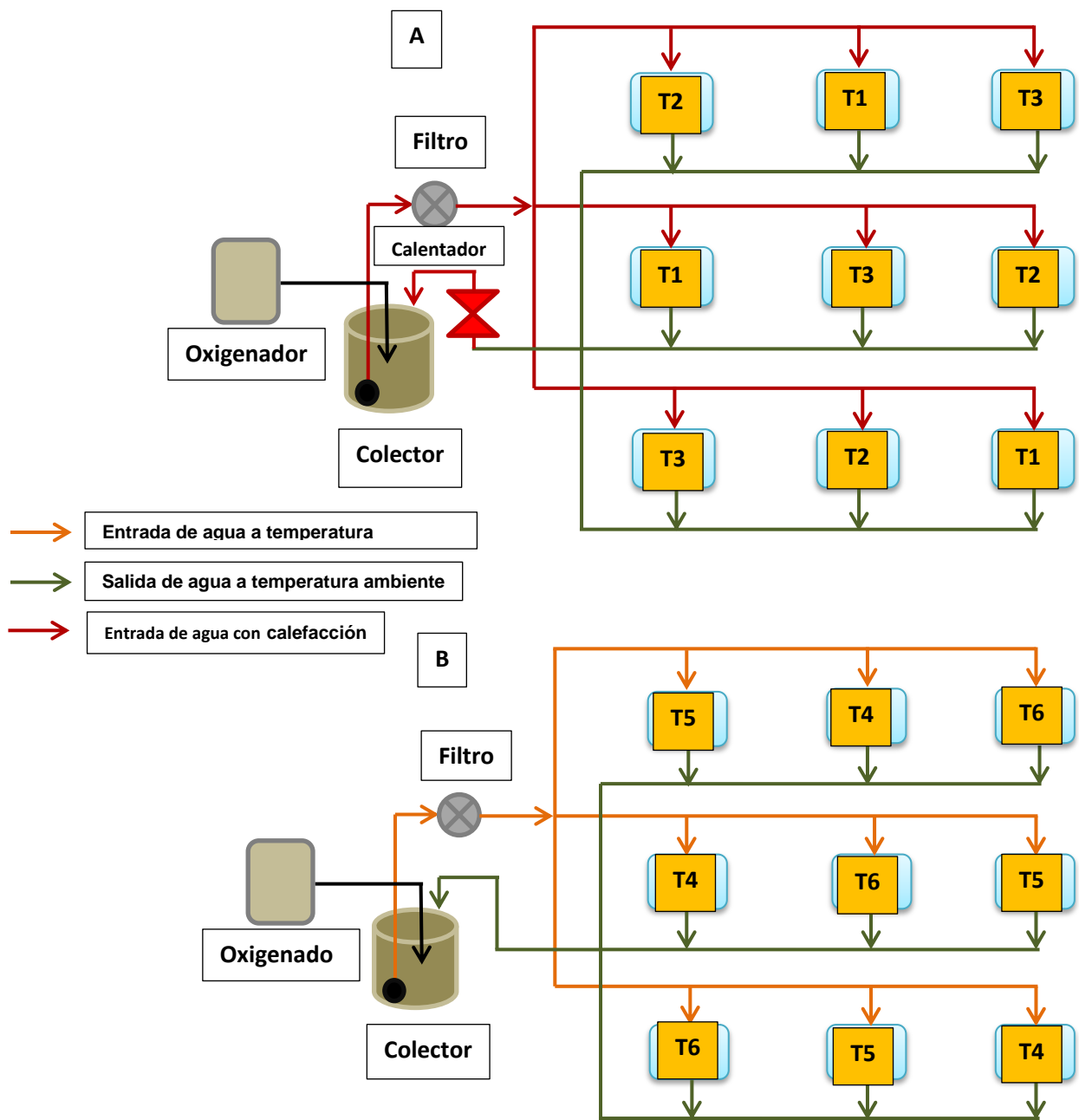


Figura 10. Distribución de los diferentes tratamientos propuestos en los sistemas de recirculación de cultivo de tilapia. Fuente: Elaboración propia.

En cada uno de los sistemas se determinaron las condiciones físicas y químicas del agua del sistema de recirculación donde se cultivaron las tilapias. A cada uno de los tratamientos se les determinó los estimadores de crecimiento los cuales se realizaron semanalmente y los estimadores de análisis proximal, los cuales fueron realizados al final del experimento.

### 5.5.2 Determinación de las condiciones físicas y químicas del agua

El oxígeno disuelto, el pH y la temperatura se midieron dos veces al día, una por la mañana y una por la tarde dos veces a la semana, con un medidor multiparamétrico Hach serie HQ40d.

Los nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ), y amonio no ionizado ( $\text{NH}_3\text{-H}$ ) fueron medidos durante una semana continua del experimento, y una vez por semana cada tres semanas durante el experimento, las determinaciones se realizaron con los métodos propuestos por HACH, 1997, utilizando el espectrofotómetro DR/6000 Hach.

### 5.5.3 Estimadores del crecimiento del material biológico

Durante la etapa de experimentación se determinó el número inicial de organismos, el número final de organismos, el Peso inicial promedio (PIP) (1), Peso final promedio (PFP) (2), Talla inicial promedio (TIP) (3) y la Talla final promedio (TFP) (4), para con estas primeras mediciones, poder realizar los cálculos para obtener el Peso ganado (PG) (%) (5), Tasa de crecimiento específico (TCE) (%/día) (6) y Tasa de supervivencia (TS) (%) (7). Se utilizó una balanza Precisa de 650g (D.S 0.01g) para medir el peso (g) y un vernier Mitutoyo modelo CD-6PSX para medir las tallas (mm) de los peces. Estas mediciones fueron hechas cada semana.

Peso inicial promedio (PIP)

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

Peso final promedio (*PFP*)

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

Talla inicial promedio (*TIP*)

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

Talla final promedio (*TFP*)

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

Peso ganado (*PG*)

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

Tasa de crecimiento específico *TCE* (%/día)

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

Tasa de supervivencia (*TS*)

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

Modelo para la relación peso talla bajo la ecuación potencial

$$Pt = aLt^b \quad (8)$$

Dónde **Pt** es el peso total, **Lt** es la longitud total, **a** es la constante de regresión o intercepto y **b** es el coeficiente de regresión o pendiente de la ecuación.

#### 5.5.4 Sistema de medición

Los estudios de repetibilidad y reproducibilidad (RyR) analizan la variación entre el método de medición y las distintas personas que pueden realizar estas mediciones. El objetivo de analizar un sistema de medición con un estudio RyR es de reducir la variabilidad de la medición de un proceso mediante el estudio de los posibles motivos de variabilidad en la medición y asegurar que los datos obtenidos en este proyecto fueran válidos.

El método ANOVA (análisis de varianza) permite cuantificar la variación debida a la interacción entre los operadores y las partes. La variación total de los datos analizados tiene la siguiente forma:

$$\sigma_{\text{Total}}^2 = \sigma_{\text{parte}}^2 + \sigma_{\text{operador}}^2 + \sigma_{\text{operador} \times \text{parte}}^2 + \sigma_{\text{instrumento}}^2 \quad (9)$$

Y como el componente operador x parte se considera parte de la reproducibilidad.

$$\sigma_{\text{repetibilidad}}^2 = \sigma_{\text{instrumento}}^2 \quad \text{y} \quad \sigma_{\text{reproducibilidad}}^2 = \sigma_{\text{operador}}^2 + \sigma_{\text{operador} \times \text{parte}}^2 \quad (10)$$

Así:

$$\sigma_{\text{RyR}}^2 = \sigma_{\text{repetibilidad}}^2 + \sigma_{\text{reproducibilidad}}^2 \quad (11)$$

Este método se utiliza para analizar los efectos de los diferentes factores en el diseño de experimentos, por esto puede estudiar simultáneamente los efectos de las fuentes de variación: operadores y partes (Pulido and Salazar, 2013).

En este proyecto se utilizaron equipos como: balanza analítica marca precisa, un vernier digital marca mitutoyo y un multimedidor digital de dos canales HQ40D. Para estos equipos se realizó un análisis del sistema de medición RyR en Minitab para encontrar que porcentaje de la variabilidad total observada corresponde al error de medición y su comparación con la variabilidad del producto medido, del instrumento y de los operadores.

### 5.5.5 Estimadores del análisis proximal

Estas determinaciones se refieren a la medición de los elementos medidos en la biomasa de los organismos acuáticos y no en el medio donde se cultivaron. La determinación de la composición bioquímica de la carne de tilapia fue hecha al final del experimento. Las determinaciones que se realizaron sobre el filete de tilapia fueron humedad, cenizas totales, lípidos totales y proteína.

El contenido de humedad se determinó utilizando un horno de recirculación forzada marca Dinamica AP120 en el cual se calienta la muestra a 65°C durante 24h. Pasadas las 24h las muestras se pesan para determinar su contenido de agua por diferencia de peso expresado en % de humedad (g de H<sub>2</sub>O/100g de muestra). (AOAC, 1984)

Contenido de Humedad (%)

$$(\text{Humedad})(\%) = \frac{\text{Peso de agua en la muestra (g)}}{\text{Peso de la muestra humeda (g)}} \times 100 \quad (12)$$

En la determinación de cenizas se tomó un gramo de muestra que posteriormente se incinera a 500°C en una mufla de marca Felisa 500 durante seis horas. Después el crisol se colocó en una desecadora. Por último se obtuvo el peso de cenizas totales, expresado en cenizas totales (contenido mineral) o en % de materia seca (g) (AOAC, 1984).

Peso de la muestra (g)

$$Pm = Pcm - Pcv \quad (13)$$

Dónde:

Pm = Peso de la muestra

Pcm = Peso de crisol con muestra

Pcv = Peso de crisol vacío

Peso de cenizas (g)

$$Pc = Pcc - Pcv \quad (14)$$

Dónde:

Pc = Peso de cenizas

Pcc = Peso de crisol con cenizas

Pcv = Peso de crisol vacío

Cenizas base seca (%)

$$(\text{Ceniza base seca})(\%) = \frac{\text{Peso de las cenizas (g)}}{\text{Peso de la muestra (g)}} \times 100 \quad (15)$$

Cenizas base húmeda (%)

$$(\text{Ceniza base humedad})(\%) = \frac{(\% \text{ ceniza base seca})(\% \text{ de materia seca})}{100} \quad (16)$$

Materia orgánica (%)

$$\text{Materia orgánica}(\%) = 100 - (\% \text{ de ceniza en base seca}) \quad (17)$$

Para la determinación de proteínas se utilizó el método de Kjeldahl, el cual se basa en la combustión en húmedo de la muestra por calentamiento con ácido sulfúrico concentrado en presencia de catalizadores metálicos y de otro tipo para reducir el nitrógeno orgánico de la muestra hasta amoniaco, el cual queda en solución en forma de sulfato de amonio. El digerido, una vez alcalinizado se destila en forma directa o por arrastre de vapor para desprender el amoniaco, que es atrapado y posteriormente se titula con un álcali estándar para dar el contenido de nitrógeno orgánico.

La determinación de proteína se realizó de acuerdo a los métodos estándar de la (AOAC, 1984). Y se utilizará el método de Kjeldahl.

Porcentaje de Nitrógeno (%)

$$\% N = \frac{(V-V_0) \times N \times meq \times 100}{Peso \text{ de muestra (g)}} \quad (18)$$

Dónde:

V= ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> empleados en la titulación de la muestra

V<sub>0</sub>= ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en el blanco

N= Normalidad de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Meq= miliequivalentes de N<sub>2</sub> 0.014 g

Nota= 1 ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.01 N = 0.14 mg de N-NH<sub>4</sub>

Para la determinación de grasas totales por microondas se utilizó un equipo de Microondas marca Anton Paar Multiwave Pro Solv MF100. En la determinación se tomó de 2 a 5 g de muestra en los viales de microondas. Se les colocó una mezcla de acetona:hexano (1:2 V/V). Se colocaron dentro del microondas para iniciar el método de extracción. Se filtró a vacío en tubos previamente pesados para separar el solvente de los sólidos. Para evaporar el solvente se colocaron los tubos en baño maría Thermo Scientific LabLine 18802AQ y posteriormente se utilizó el horno para evaporar por completo el solvente. Se pesaron los tubos con el extracto sin solventes y se hicieron los cálculos de grasas totales con la siguiente fórmula:

Porcentaje de grasa total (%)

$$\% \text{ de grasa} = \frac{(A-B)}{c} \times 100 \quad (19)$$

Dónde:

A= Peso del tubo más las grasas

B= Peso del tubo vacío

C=Peso de la muestra seca

## 5.6 Análisis Estadístico

Se realizó un análisis de normalidad y de homogeneidad de varianzas para validar el modelo de ANOVA. Los análisis de normalidad, tiene como objetivo analizar cuanto difiere la distribución de los datos observados respecto a lo esperado si procediesen de una distribución normal con la misma media y desviación estándar. La homogeneidad de varianzas considera que la varianza es constante en los diferentes niveles de un factor, es decir, entre diferentes grupos. En el presente trabajo, la hipótesis planteada involucra las variables peso (g), longitud total (mm) y porcentaje de humedad, cenizas, grasas totales y proteína. Se realizó un análisis para verificar el supuesto de normalidad y de homogeneidad de varianzas.

Al hacer el análisis con los resultados obtenidos si no se tiene evidencia para rechazar la hipótesis de que los datos no cumplieron con los supuestos mencionados se procede a realizar un análisis de varianza (ANOVA).

### 5.6.1 Análisis de la varianza (ANOVA)

Se utilizó un análisis de ANOVA para comparar los seis tratamientos planteados en el diseño de experimento de este trabajo, es decir, T1, T2, T3, T4, T5 y T6 (Ver tabla 2) y distinguir sobre los efectos de los tratamientos y si son diferentes.

De este modo las hipótesis a comprobar son las siguientes:

$$H_0: \mu_{T1} = \mu_{T2} = \mu_{T3} = \mu_{T4} = \mu_{T5} = \mu_{T6} \quad (20)$$

$$H_0: \mu_{T1} \neq \mu_{T2} \neq \mu_{T3} \neq \mu_{T4} \neq \mu_{T5} \neq \mu_{T6} \quad (21)$$

$$H_0: \text{Existe al menos una } \mu_{T_i} \text{ diferente} \quad (22)$$

Este estudio de ANOVA nos permitió evaluar las diferencias entre las variables de los peces cultivados en los seis tratamientos utilizados en este trabajo, las cuales



fueron, peso (g), longitud total (mm), rendimiento, porcentaje de humedad, cenizas, grasas totales y proteína. Las diferencias entre las medias se consideraron estadísticamente significativas al nivel de probabilidad del 5%.

Una vez detectadas las diferencias significativas entre tratamientos, se realizó una prueba de Tukey con un nivel de confianza del 95%. Los análisis estadísticos se realizaron con el software estadístico Statgraphic Centurion XV y Minitab.

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1 Análisis del sistema de medición

#### 6.1.1 Análisis de medición de balanza analítica marca precisa

Se realizó un estudio de RyR cruzado para analizar el sistema de medición de la balanza analítica marca Precisa. Se utilizaron tres operadores diferentes y pesaron 10 muestras diferentes por triplicado. En la tabla 3 se observa la ANOVA que muestra comportamiento de las fuentes de variación y su significancia. En la primer columna (Fuente) se muestra la pieza y se refiere a las mediciones realizadas en 10 diferentes muestras, el operador constituye a las tres personas diferentes que efectuaron las mediciones y la interacción pieza\*operador indica la variación en las diferentes combinaciones posibles de las muestras medidas y los tres operadores.

El valor P para las piezas tuvieron un valor significativo, con un nivel de significancia de  $\alpha = 0.25$ . Las muestras pesadas tuvieron un valor de 0.000 y sugiere que es significativa la variación que hay por las diferencias entre los pesos. El valor de 0.998 para la interacción pieza\*operador indica que no existe una diferencia entre el operador que realizó la medición y la pieza.

Tabla 3. Análisis de varianza para las mediciones de peso en la balanza analítica marca Precisa

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Pieza	9	568.526	63.1696	17354.9	0.000
Operador	2	0.004	0.0021	0.6	0.573
Pieza*Operador	18	0.066	0.0036	0.3	0.998
Repetibilidad	60	0.802	0.0134		
Total	89	569.398			

Alfa para eliminar el término de interacción = 0.25

En la tabla 4 se muestra el análisis de RyR cruzado para las mediciones de peso de la balanza analítica marca Precisa. Se observa en la columna de porcentaje de contribución que sólo el 0.16% de la variación total de los datos se debe al sistema de medición, mientras que un 99.84% de la variación es debida a las diferencias entre las piezas medidas.

Respecto al número de categoría distintas, el resultado obtenido es de 35, lo que indica que el sistema de medición es aceptable y permite distinguir entre 35 muestras distintas. Por lo que, se cuenta con un sistema de medición adecuado con base a la AIAG.

Tabla 4. Análisis RyR cruzado para las mediciones de peso en la balanza analítica marca Precisa

Fuente	CompVar	% Contribución (de CompVar)	Desv. Est (DE)	Var. del estudio (6*DE)	% Var. Del estudio(%VE)
RyR del sistema de medición total	0.01113	0.16	0.10548	0.6329	3.98
Repetibilidad	0.01113	0.16	0.10548	0.6329	3.98
Reproducibilidad	0.00000	0.00	0.00000	0.0000	0.00
Operador	0.00000	0.00	0.00000	0.0000	0.00
Parte a parte	7.10760	99.84	2.64908	15.8945	99.92
Variación total	7.02873	100.00	2.65118	15.9071	100.00

Número de categorías distintas = 35

### 6.1.2 Análisis de medición de vernier marca mitutoyo

Se realizó un estudio de RyR cruzado para analizar el sistema de medición del vernier marca mitutoyo. Se utilizaron tres operadores diferentes y se consideró la longitud total de 10 peces. Las mediciones se hicieron por triplicado. En la tabla 5 se observa la ANOVA que muestra comportamiento de las fuentes de variación y su significancia. En la primer columna (Fuente) se muestra la pieza y se refiere a las mediciones realizadas en 10 diferentes muestras, el operador constituye a las tres personas diferentes que efectuaron las mediciones y la interacción pieza\*operador indica la variación en las diferentes combinaciones posibles de las muestras medidas y los tres operadores.

El valor P para las piezas tuvieron un valor significativo, con un nivel de significancia de  $\alpha = 0.25$ . Las muestras medidas con vernier tuvieron un valor de 0.000 y sugiere que es significativa la variación que hay por las diferencias entre la longitud total entre los peces. El valor de P 0.228 para la interacción pieza\*operador indica que no existe una diferencia entre el operador que realizó la medición y la pieza.

Tabla 5. Análisis de varianza para las mediciones de longitud total de peces con un vernier marca mitutoyo

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Pieza	9	1098.48	122.053	985.889	0.000
Operador	2	0.81	0.403	3.256	0.062
Pieza*Operador	18	2.23	0.124	1.288	0.228
Repetibilidad	60	5.77	0.096		
Total	89	1107.28			

Alfa para eliminar el término de interacción = 0.25

En la tabla 6 se muestra el análisis de RyR cruzado para las mediciones de longitud total de peces con un vernier marca mitutoyo. Se observa en la columna de porcentaje de contribución que sólo el 0.84% de la variación total de los datos se debe al sistema de medición, mientras que un 99.16% de la variación es debida a las diferencias entre las piezas medidas.

Respecto al número de categoría distintas, el resultado obtenido es de 15, lo que indica que el sistema de medición es aceptable y permite distinguir entre 15 muestras distintas. Por lo que, se cuenta con un sistema de medición adecuado con base a la AIAG.

Tabla 6. Análisis RyR cruzado para las mediciones de longitud total de peces con un vernier marca mitutoyo

Fuente	CompVar	% Contribución (de CompVar)	Desv. Est (DE)	Var. del estudio (6*DE)	% Var. Del estudio(%VE)
RyR del sistema de medición total	0.1146	0.84	0.33858	2.0315	9.16
Repetibilidad	0.0961	0.70	0.30999	1.8599	8.39
Reproducibilidad	0.0185	0.14	0.13618	0.8171	3.68
Operador	0.0093	0.07	0.09648	0.5789	2.61
Parte a parte	13.5477	99.16	3.68072	22.0843	99.58
Variación total	13.6624	100.00	3.69626	22.1776	100.00

Número de categorías distintas = 15

### 6.1.3 Análisis de medición del multimedidor de dos canales HQ40

El multimedidor de dos canales HQ40 fue utilizado para medir pH, temperatura y oxígeno disuelto. Para el análisis del sistema de medición de este equipo, se realizó un estudio gage tipo I, para evaluar la capacidad del proceso de medición del multimedidor de dos canales HQ40D, es decir, evalúa los efectos del sesgo y la repetibilidad sobre las mediciones de un operador y una parte de referencia. Se efectuaron 30 mediciones de pH a un estándar de medición del potenciómetro. Para este estudio se consideró un valor de referencia de 7.0 y una tolerancia de  $\pm 0.2$ .

Los valores de  $C_g$  y  $C_{gk}$  fueron 1.31 y 1.23 respectivamente. Los valores de variación en la repetibilidad y de variación de la repetibilidad y sesgo fueron 15.22% y 16.31% respectivamente, lo que indicó que la variación que se debe al sistema de medición es aceptable.

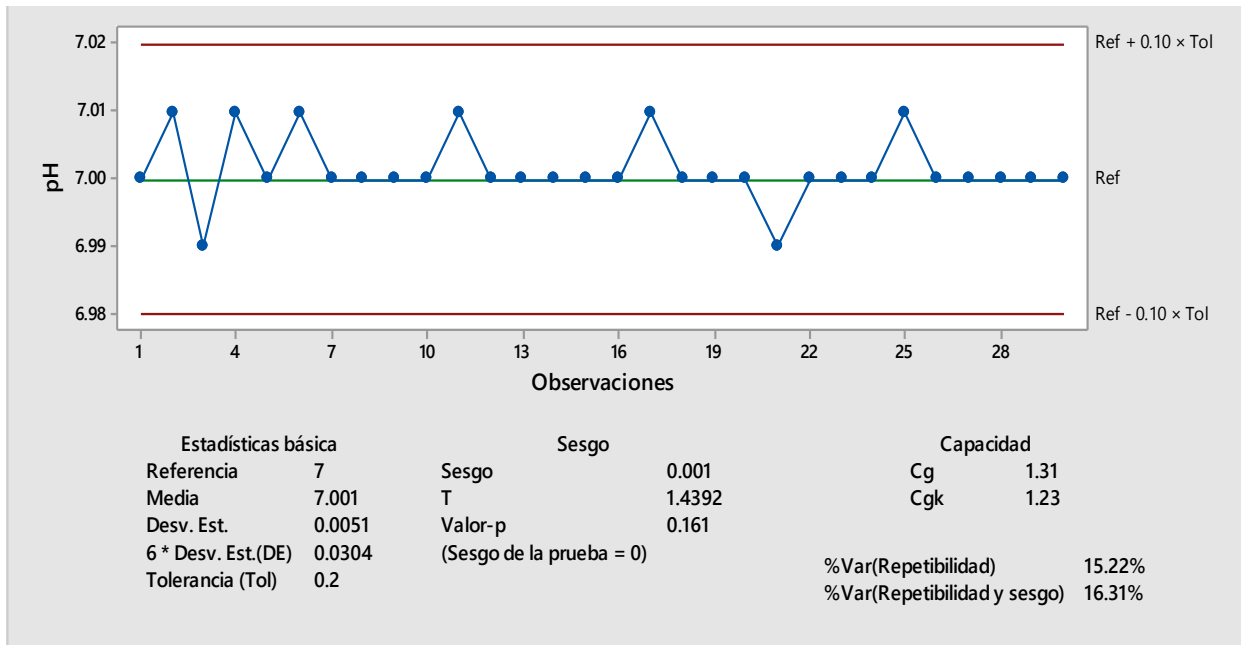


Figura 11. Gráfica de estudio Gage tipo 1 del multimedidor de dos canales HQ40D

## 6.2 Monitoreo de las condiciones físicas del agua

Los resultados muestran que las condiciones físicas del agua a lo largo del periodo de estudio estuvieron dentro de los parámetros recomendados para el cultivo de tilapia.

### 6.2.1 Temperatura

La temperatura es uno de los factores ambientales con gran influencia en la acuicultura, ya que tiene un efecto importante para un crecimiento óptimo en los peces, así, se puede considerar que la temperatura óptima de crecimiento para un pez es aquella en la que presenta un aumento de peso mayor (Al-Asgah and Ali, 1997).

En el caso de las tilapias no crecen bien a temperaturas por debajo de los 16°C y toleran temperaturas de entre 40-42 °C (Azaza et al., 2008). El intervalo óptimo de temperatura para un buen desarrollo de la tilapia se encuentra entre 28-30 °C (Timmons and Ebeling, 2010).

El monitoreo de la temperatura del agua durante el periodo experimental (Figura 11) se mantuvo en promedio con valores durante el día de  $21.2 \pm 0.50$  °C para el sistema sin control de temperatura y de  $26.5 \pm 0.55$  °C para el sistema con control de temperatura. Por la tarde mostró valores promedio de  $25.2 \pm 0.49$  °C para el sistema sin control de temperatura y de  $30.6 \pm 1.0$  °C para el sistema con control de temperatura.

En el monitoreo de temperatura que se realizó a ambos sistemas (Sin control de temperatura y con control de temperatura) durante 24 h, las lecturas se hicieron en los tinacos que reparten el agua a todo el sistema. Se observaron variaciones con valores mínimos de 22 °C durante la mañana y valores máximos de 27.1 °C durante la tarde para el sistema sin control de temperatura. El comportamiento de la temperatura del agua en el sistema con control de temperatura registró valores mínimos de 28.1 °C durante la mañana y de 33°C durante la tarde (Figura 12). Ambos sistemas (sin control y con control de temperatura) se mantuvieron dentro de los niveles de temperatura tolerados por la tilapia.

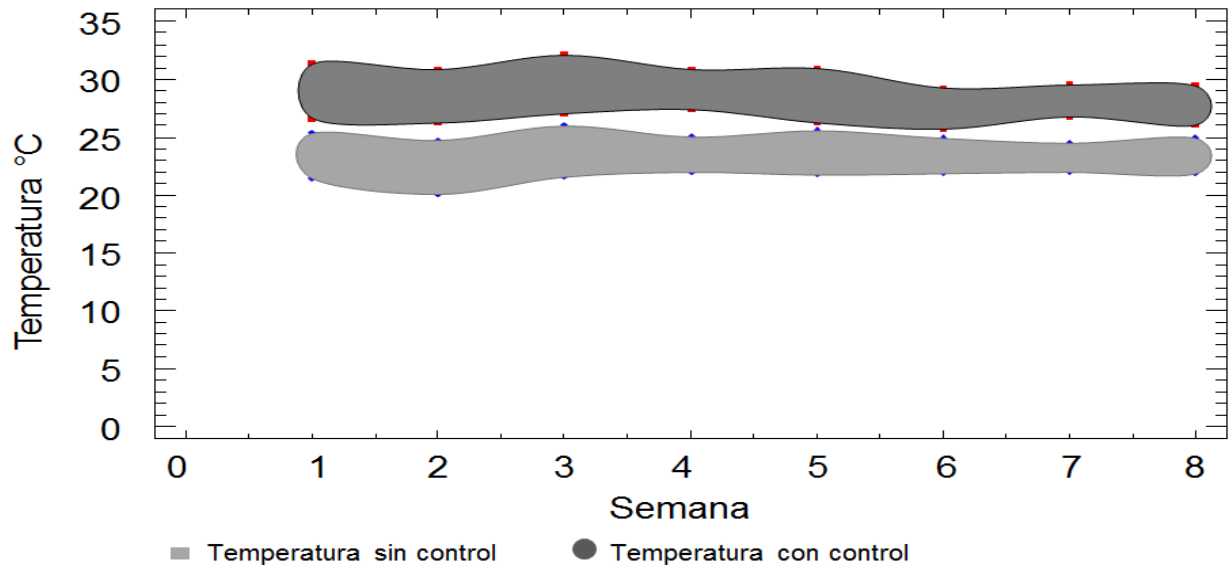


Figura 12. Comportamiento de los valores de temperatura en los sistemas con control y sin control de temperatura durante el periodo de experimentación.

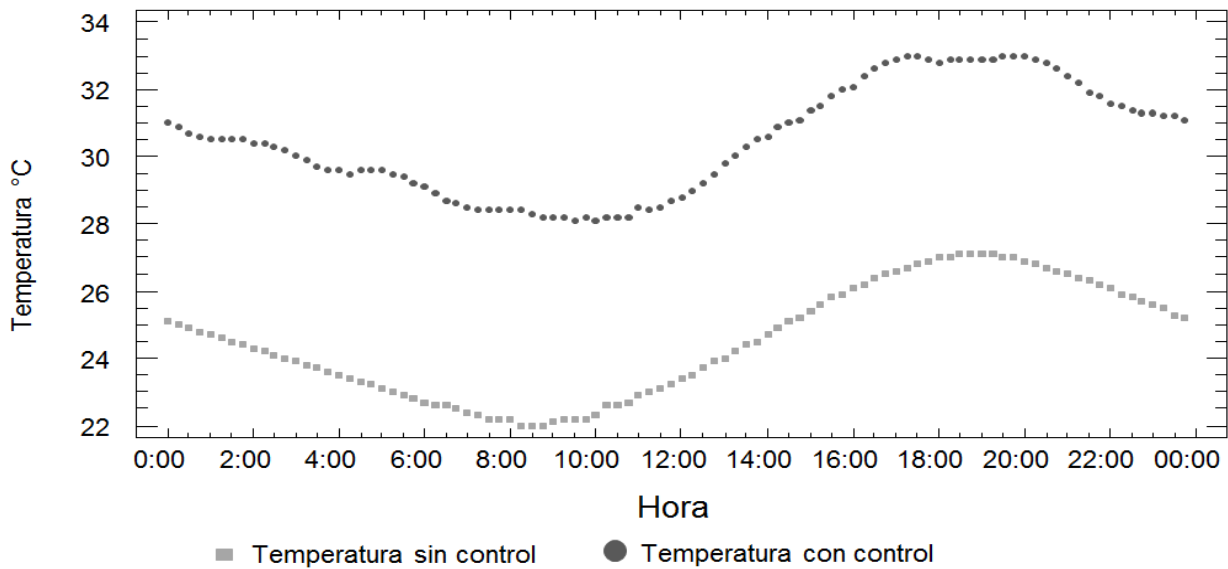


Figura 13. Comportamiento de los valores de temperatura en los sistemas de control y sin control de temperatura en un ciclo de 24 h



## 6.2.2 pH

El pH tiene un rol crucial en los parámetros fisicoquímicos del agua que afectan la supervivencia y crecimiento de los peces. El pH óptimo para el crecimiento de la mayoría de las especies acuáticas está en el rango de 6.5-9 (El-Sayed, 2006).

Lee et al. (2017), encontró que la tilapia puede tolerar niveles bajos de pH de 5.5 donde encontró una sobrevivencia del 82% comparado con una sobrevivencia del 62% en un medio con pH de 4.5. En otro estudio Rebouças et al. (2016), concluyó que el rango óptimo de pH de la tilapia es de 5.5-9.

El monitoreo del pH del agua durante el periodo experimental (Figura 13) se mantuvo en promedio con valores durante el día de  $8.49 \pm 0.32$  para el sistema sin control de temperatura y de  $8.42 \pm 0.41$  para el sistema con control de temperatura. Por la tarde mostró valores promedio de  $8.83 \pm 0.19$  para el sistema sin control de temperatura y de  $9.0 \pm 0.23$  para el sistema con control de temperatura.

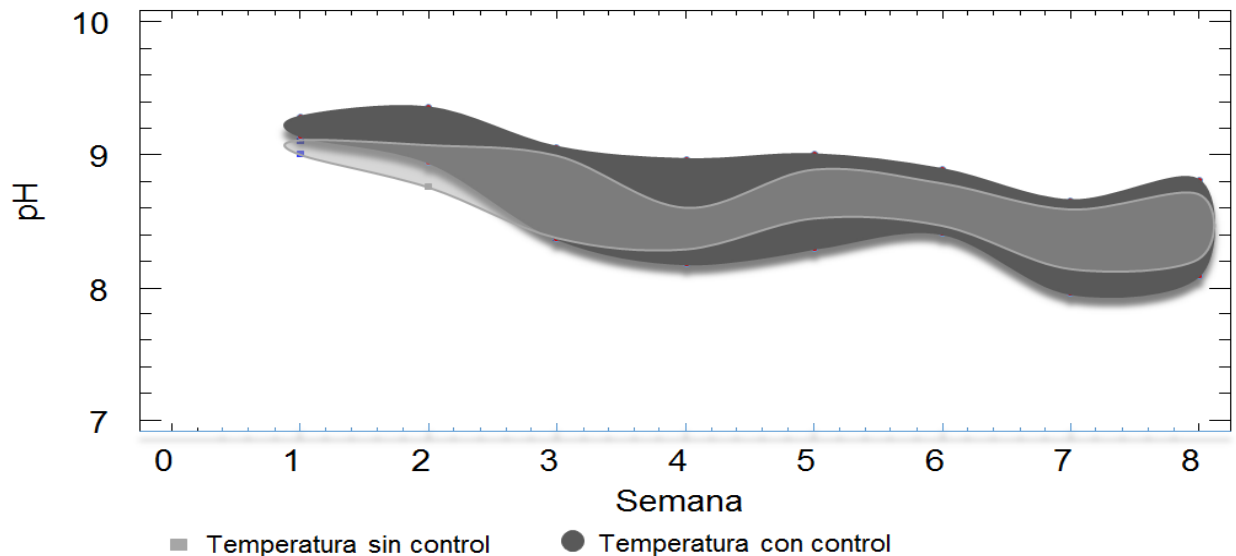


Figura 14. Comportamiento de los valores de pH en los sistemas con control y sin control de temperatura durante el periodo de experimentación.

En el monitoreo de pH que se realizó a ambos sistemas (Sin control de temperatura y con control de temperatura) durante 24 h, las lecturas se hicieron en los tinacos que reparten el agua a todo el sistema. Se observaron variaciones con valores mínimos de 8.08 durante la mañana y valores máximos de 9.79 durante la tarde para el sistema sin control de temperatura. El comportamiento del pH del agua en el sistema con control de temperatura registró valores mínimos de 7.94 durante la mañana y de 9.35 durante la tarde (Figura 14).

Ambos sistemas (sin control y con control de temperatura) se mantuvieron dentro de los niveles de pH tolerados por la tilapia.

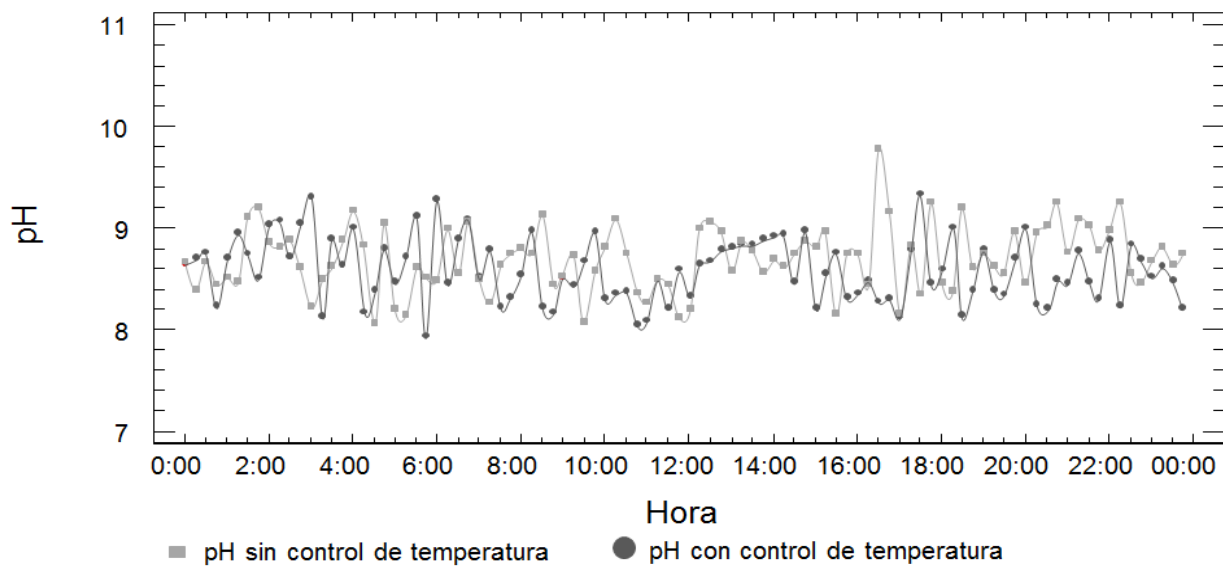


Figura 15. Comportamiento de los valores de pH en los sistemas de control y sin control de temperatura en un ciclo de 24 h.

### 6.2.3 Oxígeno Disuelto

El oxígeno disuelto es una de los factores más importantes para el cultivo de peces. La concentración de oxígeno puede ser afectada por la temperatura y por la recirculación del agua, esto lo convierte en un elemento limitante en la producción acuícola cuando aumenta la densidad de cultivo (El-Sayed, 2006). Para el cultivo de tilapia el nivel óptimo de oxígeno disuelto es de 5 mg/L, aunque puede vivir bien en un intervalo de 3-4 mg/L (Timmons and Ebeling, 2010).

El monitoreo de oxígeno disuelto del agua durante el periodo experimental (Figura 15) se mantuvo en promedio con valores durante el día de  $10.02 \pm 1.33$  (mg/L) para el sistema sin control de temperatura y de  $6.83 \pm 1.33$  (mg/L) para el sistema con control de temperatura. Por la tarde mostró valores promedio de  $11.99 \pm 1.53$  (mg/L) para el sistema sin control de temperatura y de  $11.50 \pm 2.38$  (mg/L) para el sistema con control de temperatura.

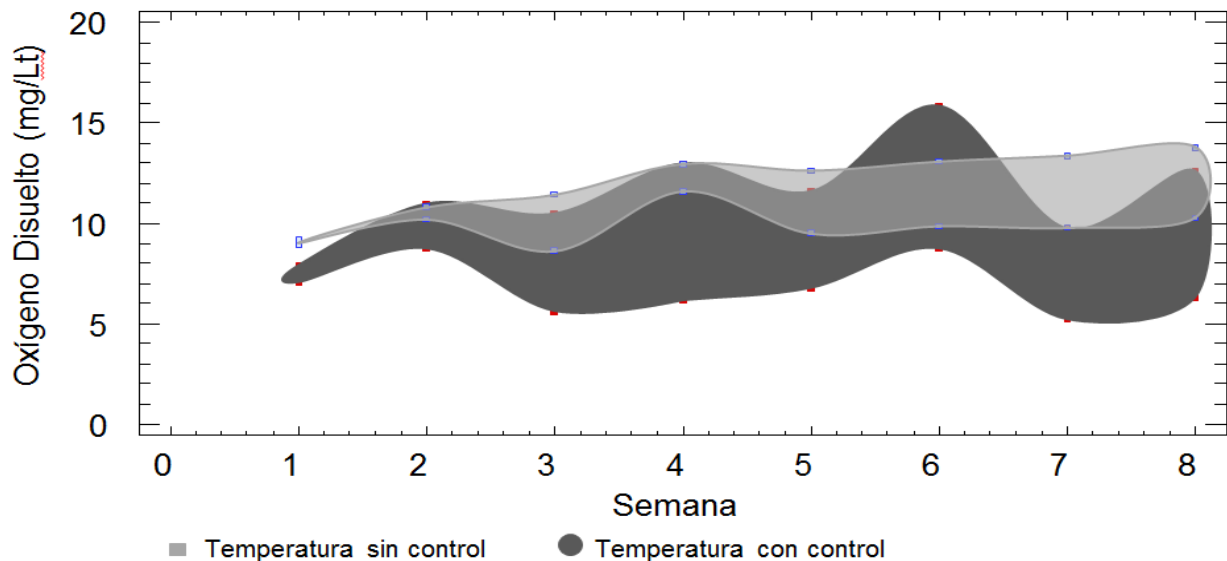


Figura 16. Comportamiento de los valores de oxígeno disuelto en los sistemas con control y sin control de temperatura durante el periodo de experimentación.

En el monitoreo de oxígeno disuelto que se realizó a ambos sistemas (Sin control de temperatura y con control de temperatura) durante 24 h, las lecturas se hicieron en los tinacos que reparten el agua a todo el sistema. Se observaron variaciones con valores mínimos de 8.77 (mg/L) durante la mañana y valores máximos de 14.87 (mg/L) durante la tarde para el sistema sin control de temperatura. El comportamiento del oxígeno disuelto del agua en el sistema con control de temperatura registró valores mínimos de 6.51 (mg/L) durante la mañana y de 12.36 (mg/L) durante la tarde (Figura 16).

Ambos sistemas (sin control y con control de temperatura) se mantuvieron dentro de los niveles de oxígeno disuelto tolerados por la tilapia.

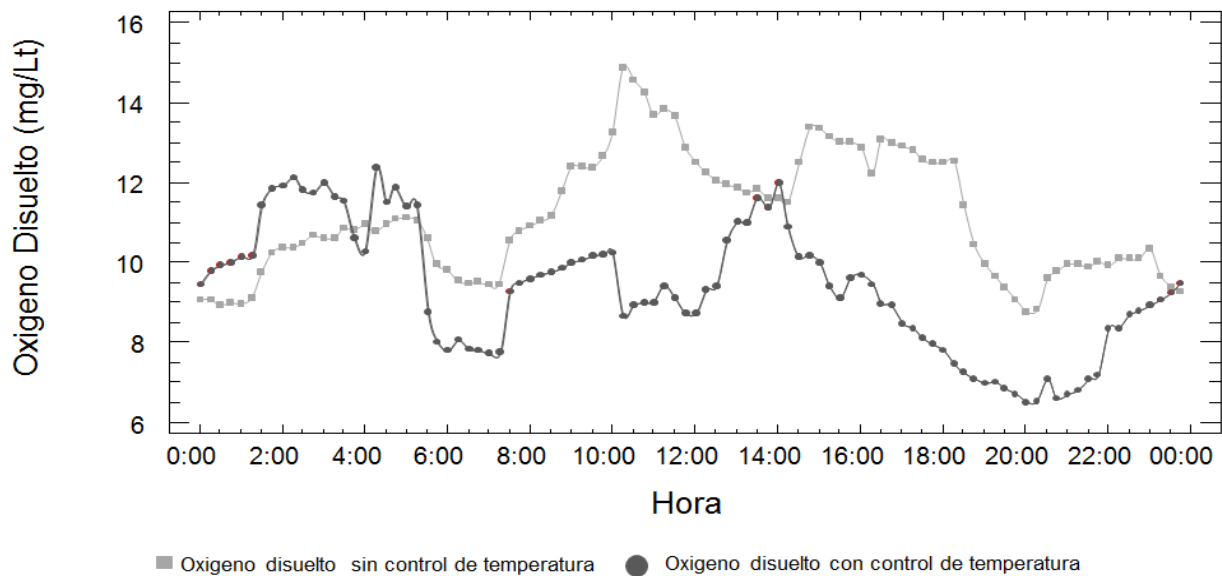


Figura 17. Comportamiento de los valores de oxígeno disuelto en los sistemas de control y sin control de temperatura en un ciclo de 24 h.

### 6.3 Monitoreo de las condiciones químicas del agua

Los resultados muestran que las condiciones químicas del agua a lo largo del periodo de estudio estuvieron dentro de los parámetros recomendados para el cultivo de tilapia.

#### 6.3.1 Compuestos Nitrogenados ( $\text{NO}_2$ , $\text{NO}_3$ y $\text{NH}_3$ )

Durante el periodo experimental se monitoreo los valores para el nitrógeno en las tres formas que se encuentra comúnmente en el agua ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_3$  y  $\text{NH}_3$ ). El monitoreo se realizó a ambos sistemas (Sin control de temperatura y con control de temperatura) por una semana (5 días) continua sin hacer recambio de agua con el objetivo de verificar las condiciones químicas del agua del cultivo de tilapia.

La figura 17 muestra la tendencia del comportamiento para el nitrógeno durante el periodo de una semana. Se observaron variaciones con valores mínimos de 0.037 mg/L, 2.8 mg/L y 0.21 mg/L para  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_3$  y  $\text{NH}_3$  respectivamente para el sistema sin control de temperatura y valores mínimos de 0.154 mg/L, 3.0 mg/L y 0.21 mg/L para  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_3$  y  $\text{NH}_3$  respectivamente para el sistema con control de temperatura. En el sistema sin control de temperatura se observaron variaciones con valores máximos de 0.249 mg/L, 3.85 mg/L y 0.67 mg/L para  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_3$  y  $\text{NH}_3$  respectivamente y para el sistema con control de temperatura valores máximos de 1.188 mg/L, 5.9 mg/L y 1.02 mg/L para  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_3$  y  $\text{NH}_3$  respectivamente.

En la figura 18 se muestra la tendencia del comportamiento para el nitrógeno durante el periodo de experimentación con su respectivo recambio de agua (20%) semanal. Se observaron variaciones con valores mínimos de 0.103 mg/L, 4.35 mg/L y 0.20 mg/L para  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_3$  y  $\text{NH}_3$  respectivamente para el sistema sin control de temperatura y valores mínimos de 0.024 mg/L, 4.0 mg/L y 0.13 mg/L para  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_3$  y  $\text{NH}_3$  respectivamente para el sistema con control de temperatura. En el sistema sin control de temperatura se observaron variaciones con valores máximos de 0.195 mg/L, 5.9 mg/L y 0.29 mg/L para  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_3$  y  $\text{NH}_3$  respectivamente y para el sistema con control de temperatura valores máximos de 0.28 mg/L, 6.0 mg/L y 0.45 mg/L para  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_3$  y  $\text{NH}_3$  respectivamente.

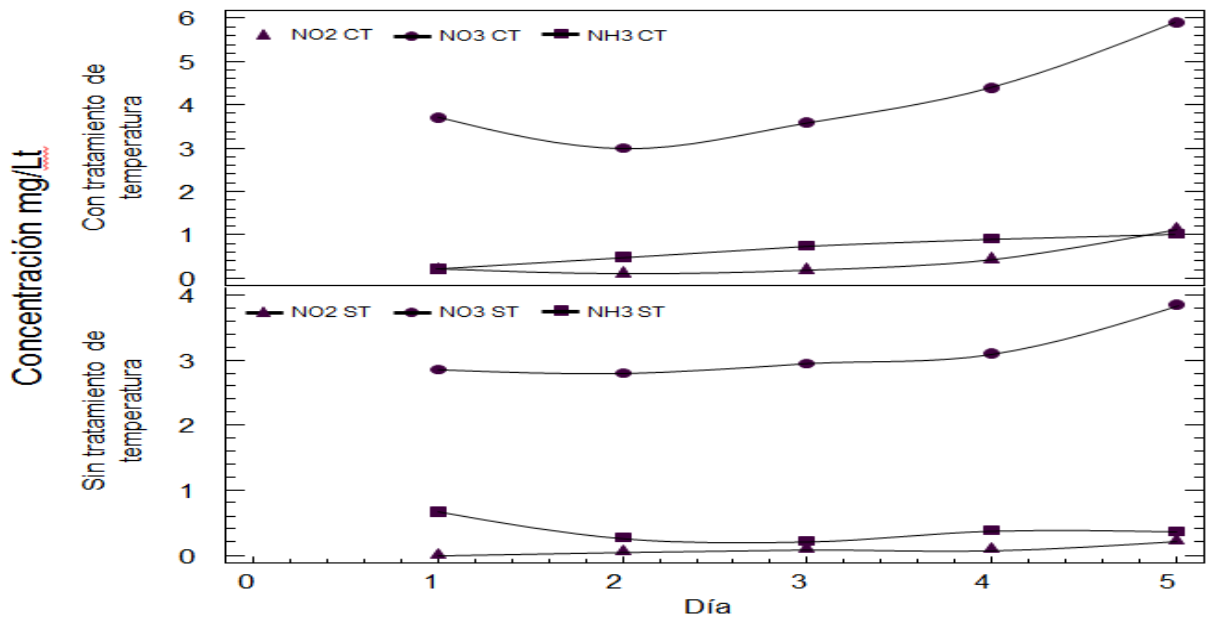


Figura 18. Tendencia del comportamiento para los compuestos nitrogenados (NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub> y NH<sub>3</sub>) durante una semana.

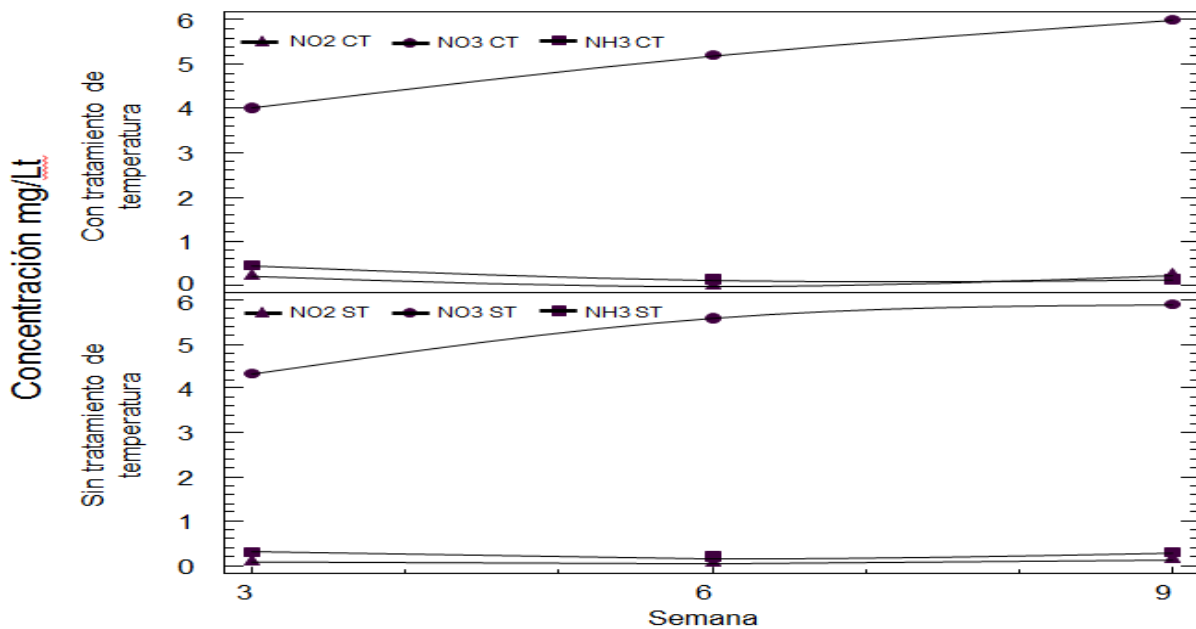


Figura 19. Tendencia del comportamiento para los compuestos nitrogenados (NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub> y NH<sub>3</sub>) durante el periodo de experimentación.

Estudios realizados con tilapia han reportado fluctuaciones en cuanto a la concentración de los compuestos nitrogenados a lo largo del periodo de cultivo. Garcia Trejo et al., (2016), menciona valores de 0.16 a 1.18mg/L de NO<sub>2</sub>, de 3.7 a 5.8 mg/L de NO<sub>3</sub> y de 0.8 a 0.9 mg/L de NH<sub>3</sub> en un sistema de recirculación. Azaza et al., (2013) reporto valores de 0.43 mg/L de NH<sub>3</sub> y 0.01 mg/L de NO<sub>2</sub>. Por su parte Nunoo and Asase, (2017), mencionan valores de 0.05 mg/L de NH<sub>3</sub> y 0.04 mg/L de NO<sub>3</sub>. En otro estudio Mirea et al., (2013), obtuvo valores de 0.005 a 0.01 mg/L de NO<sub>2</sub>, de 44 a 55 mg/L de NO<sub>3</sub> y de 0.01 a 0.04 mg/L de NH<sub>3</sub> en un sistema de recirculación.

Los peces tropicales presentan mayor tolerancia a concentraciones altas de NH<sub>3</sub>, que peces de agua templada o fría, y a su vez, los peces de agua dulce son más tolerantes que los peces de ambientes marinos (Assessment, 1999), esto hace a la tilapia un organismo que tiene una alta tolerancia y la hace ideal para los cultivos. En este experimento los valores de nitrógeno en general no rebasan los valores críticos que se consideran en los cultivos acuícolas con recirculación (Timmons and Ebeling, 2010).

## 6.4 Análisis Estadístico

### 6.4.1 Análisis del supuesto de normalidad.

Para el análisis de normalidad se utilizó la prueba de Anderson Darling con un número de muestra de 30. En la tabla 7 se muestran los valores de p-value de los datos de peso (g) obtenidos de las biometrías realizadas a los peces en los seis tratamientos durante las 8 semanas del periodo de experimentación. Los valores de p-value fueron mayores de 0.05, lo que sugiere que los datos siguen una distribución normal.

Tabla 7. P-value del análisis de normalidad para los datos de peso (g) registrados durante 8 semanas.

	Tratamientos					
Semana	T1	T2	T3	T4	T5	T6
1	0.498	0.844	0.152	0.224	0.309	0.332

2	0.251	0.442	0.241	0.52	0.079	0.134
3	0.338	0.223	0.538	0.23	0.727	0.099
4	0.386	0.584	0.166	0.833	0.441	0.547
5	0.734	0.264	0.338	0.91	0.302	0.272
6	0.63	0.2	0.639	0.368	0.647	0.581
7	0.857	0.731	0.725	0.529	0.364	0.358
8	0.33	0.242	0.352	0.105	0.764	0.228

Los valores de p-value calculados para los datos de longitud (mm) mostraron valores mayores de 0.05. Lo que sugiere que los datos para esta variable siguen una distribución normal (Tabla 8).

Tabla 8. P-value del análisis de normalidad para los datos de longitud (mm) registrados durante 8 semanas

	Tratamientos					
Semana	T1	T2	T3	T4	T5	T6
1	0.255	0.806	0.572	0.083	0.824	0.373
2	0.696	0.641	0.122	0.18	0.089	0.399
3	0.652	0.878	0.915	0.414	0.297	0.505
4	0.255	0.367	0.536	0.725	0.508	0.687
5	0.247	0.204	0.765	0.738	0.742	0.626
6	0.513	0.8	0.094	0.102	0.166	0.413
7	0.137	0.259	0.465	0.564	0.55	0.729
8	0.101	0.895	0.086	0.105	0.783	0.708



Como puede verse en la tabla 9, los valores de p-value calculados para los datos de humedad, cenizas, grasas totales y proteína presentaron valores mayores de 0.05. Lo que sugiere que los datos para esta variable siguen una distribución normal.

Tabla 9. P-value del análisis de normalidad para los datos de porcentaje de humedad, cenizas, grasas totales y proteína.

	Tratamientos					
Análisis	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Humedad	0.181	0.196	0.508	0.115	0.630	0.593
Cenizas	0.288	0.196	0.086	0.148	0.249	0.512
Grasas totales	0.062	0.519	0.357	0.290	0.084	0.619
Proteína	0.141	0.264	0.248	0.297	0.060	0.071

#### 6.4.1 Análisis de homogeneidad de varianzas.

Se realizó la prueba de homogeneidad de varianzas para los datos de peso (g), longitud total (mm) y porcentaje de humedad, cenizas, grasas totales y proteína. En las tablas 10 y 11 se muestran los valores de p-value para la prueba de Levene y la de Bartlett, en ambas pruebas se obtuvieron valores de p-value mayores a 0.05, se acepta la hipótesis nula de que las varianzas son iguales. Los datos no proveen la evidencia suficiente para declarar que las poblaciones medidas tienen varianzas desiguales.

Tabla 10. P-value para el análisis de homogeneidad de varianzas para los datos de peso (g) y longitud (mm) registrados durante 8 semanas

Semana	Prueba homogeneidad de varianzas para datos de peso (g)				Prueba homogeneidad de varianzas para datos de longitud (mm)			
	Bartlett		Levene		Bartlett		Levene	
	Estadístico de prueba	p-value	Estadístico de prueba	p-value	Estadístico de prueba	p-value	Estadístico de prueba	p-value
1	5.19	0.393	0.73	0.614	7.98	0.158	1.06	0.427
2	9.28	0.098	0.78	0.583	8.92	0.112	0.78	0.584
3	10.02	0.075	0.92	0.502	10.15	0.071	1.33	0.316
4	10.11	0.072	0.57	0.721	4.93	0.424	0.610	0.697
5	8.41	0.135	1.15	0.387	3.21	0.667	0.630	0.682
6	7.73	0.171	0.4	0.873	5.67	0.340	0.380	0.852
7	6.99	0.221	0.72	0.622	3.21	0.667	0.450	0.804
8	10.71	0.058	0.56	0.727	9.91	0.078	1.280	0.334

Tabla 11. P-value para el análisis de homogeneidad de varianzas (Bartlett y Levene) para los datos de humedad, cenizas, grasas totales y proteína.

Análisis	Prueba homogeneidad de varianzas para datos de humedad, cenizas, grasas totales y proteína.			
	Bartlett		Levene	
	Estadístico de prueba	p-value	Estadístico de prueba	p-value
Humedad	2.45	0.784	0.44	0.815
Cenizas	11.01	0.051	0.76	0.594
Grasas totales	7.88	0.163	0.45	0.808
Proteína	10.74	0.057	0.54	0.746

## 6.5 Estimadores de crecimiento de tilapia

### 6.5.1 Alimentación

El alimento que se utilizó en la producción de los peces fue un alimento comercial Nutripec marca Purina y sus principales parámetros bromatológicos se muestran en la tabla 12.

Tabla 12. Parámetros bromatológicos del alimento Nutripec marca Purina.

Parámetro	Porcentaje (%)
Proteína	35
Lípidos	7
Cenizas	13
Fibra	5
Humedad	12

Posterior a la siembra de los 840 alevines repartidos en los diferentes tratamientos con un peso promedio de 1.75 g, se procedió a alimentarlos tres veces al día en los horarios de 8:30am, 12:30pm y 4:30pm. Se tomó en cuenta la ración como el 10% de la biomasa y se fue ajustando la alimentación a este porcentaje durante el periodo de experimentación.

### 6.5.2 Supervivencia

La razón porcentual del número de organismos final e inicial (Ecuación 7) se refiere a la tasa de supervivencia. En la tabla 13 puede verse la supervivencia que presentan los seis diferentes tratamientos. Los tratamientos con mayor tasa de supervivencia durante los 60 días fueron T1 y T4 (100% y 100%), mientras que en los tratamientos T2, T3, T5, T6 (98%, 98%, 97% y 97%) se obtuvo una menor supervivencia, no hubo diferencia estadística significativa entre tratamientos.

Tabla 13. Parámetros de crecimiento para *O. niloticus* en seis tratamientos de densidad y temperatura durante 60 días (media  $\pm$  DS)<sup>z</sup>

Estimadores	Tratamiento					
	T1	T4	T2	T5	T3	T6
Condición	Control Temp.	Sin Temp.	Control Temp.	Sin Temp.	Control Temp.	Sin Temp.
Número inicial (No)	20	20	40	40	80	80
Número promedio final (Ni)	20 <sup>c</sup>	20 <sup>c</sup>	39 $\pm$ 0.5 <sup>b</sup>	39 $\pm$ .10 <sup>b</sup>	79 $\pm$ 1.2 <sup>a</sup>	78 $\pm$ 1.5 <sup>a</sup>
Peso inicial total (g)	33.3 $\pm$ 1.38 <sup>a</sup>	34.4 $\pm$ 0.77 <sup>a</sup>	33.93 $\pm$ 3.53 <sup>a</sup>	33.9 $\pm$ 3.81 <sup>a</sup>	37.71 $\pm$ 4.25 <sup>a</sup>	36.05 $\pm$ 2.60 <sup>a</sup>
Peso final total (g)	574.8 $\pm$ 109.4 <sup>a</sup>	283.9 $\pm$ 44.4 <sup>bc</sup>	600.5 $\pm$ 107.8 <sup>a</sup>	288.5 $\pm$ 20.1 <sup>bc</sup>	438.0 $\pm$ 48.5 <sup>ab</sup>	196.4 $\pm$ 28.5 <sup>c</sup>
Peso promedio individual inicial (g)	1.66 $\pm$ 0.48 <sup>a</sup>	1.72 $\pm$ 0.38 <sup>a</sup>	1.70 $\pm$ 0.38 <sup>a</sup>	1.70 $\pm$ 0.39 <sup>a</sup>	1.89 $\pm$ 0.49 <sup>a</sup>	1.80 $\pm$ 0.43 <sup>a</sup>
Peso promedio individual final (g)	28.74 $\pm$ 9.31 <sup>a</sup>	14.49 $\pm$ 4.71 <sup>c</sup>	30.02 $\pm$ 12.07 <sup>a</sup>	14.43 $\pm$ 5.33 <sup>c</sup>	21.90 $\pm$ 7.63 <sup>b</sup>	9.82 $\pm$ 2.61 <sup>c</sup>
Longitud individual inicial (mm)	48.61 $\pm$ 0.92 <sup>a</sup>	46.55 $\pm$ 0.45 <sup>a</sup>	48.45 $\pm$ 2.45 <sup>a</sup>	46.71 $\pm$ 2.86 <sup>a</sup>	51.20 $\pm$ 1.42 <sup>a</sup>	47.35 $\pm$ 1.88 <sup>a</sup>
Longitud individual final (mm)	112.61 $\pm$ 11.49 <sup>ab</sup>	91.45 $\pm$ 9.88 <sup>c</sup>	113.81 $\pm$ 16.78 <sup>a</sup>	91.22 $\pm$ 10.51 <sup>c</sup>	104.12 $\pm$ 11.33 <sup>b</sup>	80.13 $\pm$ 6.77 <sup>d</sup>
Tasa de supervivencia (TS; %)	100.0 $\pm$ 0.0 <sup>a</sup>	100.00 $\pm$ 0.0 <sup>a</sup>	98.33 $\pm$ 1.44 <sup>a</sup>	97.5 $\pm$ 2.5 <sup>a</sup>	98.33 $\pm$ 1.44 <sup>a</sup>	97.92 $\pm$ 1.91 <sup>a</sup>

<sup>z</sup>Valores promedio para cada tratamiento seguidos por un superíndice indica que existe una diferencia significativa (P<0.05). Para el número final promedio los datos fueron redondeados.

Para esta especie, Azaza et al., (2008) obtuvo la menor tasa de sobrevivencia de 60% en un tratamiento a una temperatura de 19 °C y la mejor tasa de crecimiento de 93.29% la logró en el tratamiento de 32°C. En otro estudio, Pandit and Nakamura, (2011) menciona una diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) de la tasa de sobrevivencia entre los tratamientos a 37 °C (57 %) comparados con los tratamientos a 27 °C (96%), 32 °C (96 %) y 35 °C (95 %), en este estudio no se encontró diferencia significativa de la tasa de sobrevivencia entre los tratamientos de 27 °C, 32 °C y 35 °C. Por su parte Workagegn, (2012) evaluó seis temperaturas 24 °C, 26 °C, 28 °C, 30 °C, 32 °C y 34 °C, obteniendo una tasa de sobrevivencia del 100% con los seis tratamientos.

Este proyecto experimento temperaturas promedio de 22.2 °C a 25.2 °C para los tratamientos sin control de temperatura y de 26.5 °C a 30.6 °C para los tratamientos con control de temperatura estando en concordancia con los estudios antes mencionados.

Por otro lado, existen estudios donde la tilapia *O. niloticus* presenta diferentes tasas de supervivencia de acuerdo a la densidad de población que se adopte para los cultivos. Abdel-Tawwab et al., (2010), reportó tasas de supervivencia de 93.3% y 96.7% para densidades de cultivo de 300 ind/m<sup>3</sup> y 150 ind/m<sup>3</sup> respectivamente, no detectó diferencia significativa entre tratamientos. En otro estudio se encontró una diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) entre el tratamiento de 125 ind/m<sup>3</sup> (83.1 %) y los tratamientos de 50 ind/m<sup>3</sup> (96.8 %), 75 ind/m<sup>3</sup> (92.6 %), 100 ind/m<sup>3</sup> (91.2 %) (Moniruzzaman et al., 2015).

Garcia Trejo et al., (2016), comparó tres densidades de cultivo y encontró diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) entre el tratamiento de 270 ind/m<sup>3</sup> (87.7 %) y los tratamientos de 90 ind/m<sup>3</sup> (91.11 %), 180 ind/m<sup>3</sup> (92.4 %). Los resultados obtenidos en este proyecto para *O. niloticus* muestran que existe una alta tasa de supervivencia para los tratamientos T1, T2, T3, T4, T5 y T6, lo que sugiere que las condiciones fisicoquímicas logradas bajo invernadero para el cultivo de tilapia para los seis tratamientos fueron las adecuadas para su desarrollo.

#### 6.4.2 Peso inicial y final promedio

El crecimiento en peso mostró diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) entre los tratamientos con control de temperatura (T1, T2 y T3) y los que no tenían un control de temperatura (T4, T5 y T6) (tabla 13). Los tratamientos T1 y T2 obtuvieron los valores de peso más altos  $30.02 \pm 12.07$  g y  $28.74 \pm 9.31$  g, los cuales no tuvieron diferencia significativa, mientras que el tratamiento T6 presentó el menor peso  $9.82 \pm 2.61$  g.

Los tratamientos en los que se tuvo un control de temperatura T1, T2 y T3 demostraron tener pesos más altos que aquellos que no tuvieron un control de temperatura T4, T5 y T6. Estos datos demuestran que la temperatura fue un factor importante para el crecimiento de los organismos.

La comparación de crecimiento en peso entre los tratamientos T1 y T4 muestra que el tratamiento T1 con control de temperatura presenta peces con un mayor peso, mientras que los peces del tratamiento T4 sin control de temperatura muestran un peso menor (figura 20).

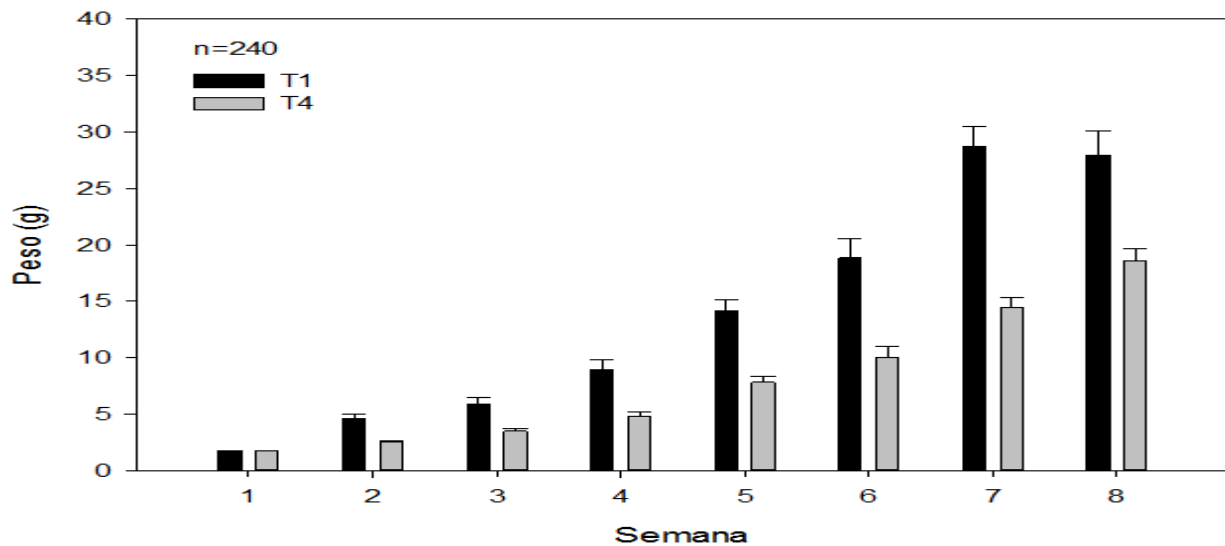


Figura 20. Comparación del comportamiento del crecimiento en peso (g) para *O. niloticus* variedad supermacho para los tratamientos T1 y T4.

Como puede verse en la figura 21 el tratamiento con control de temperatura T2 favorece el incremento en peso de los peces, mientras que los peces del tratamiento T5 sin control de temperatura muestra valores más bajos de incremento en peso.

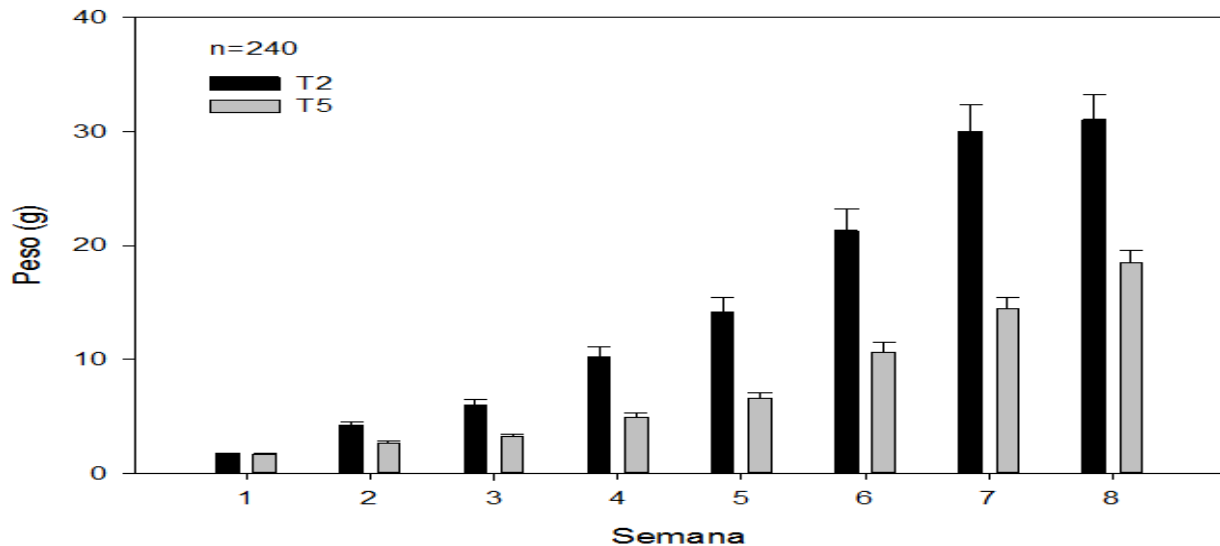


Figura 21. Comparación del comportamiento del crecimiento en peso (g) para *O. niloticus* variedad supermacho para los tratamientos T2 y T5.

En la figura 22 el tratamiento T3 con control de temperatura muestra una tendencia con un mayor crecimiento en peso de los peces, mientras que los peces del tratamiento T6 sin control de temperatura muestra valores más bajos de incremento en peso.

El comportamiento de los tratamientos sin control de temperatura muestra una tendencia con un mayor crecimiento en peso de los peces de los tratamientos T4 y T5, mientras que el tratamiento T6 muestra valores más bajos de incremento en peso (figura 23).

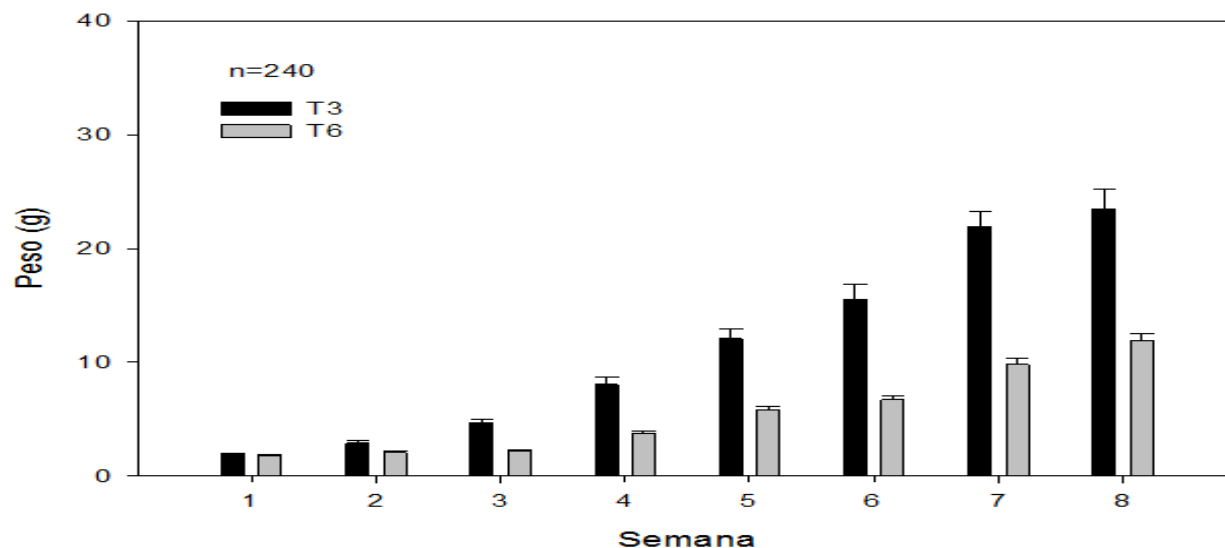


Figura 22. Comparación del comportamiento del crecimiento en peso (g) para *O. niloticus* variedad supermacho para los tratamientos T3 y T6.

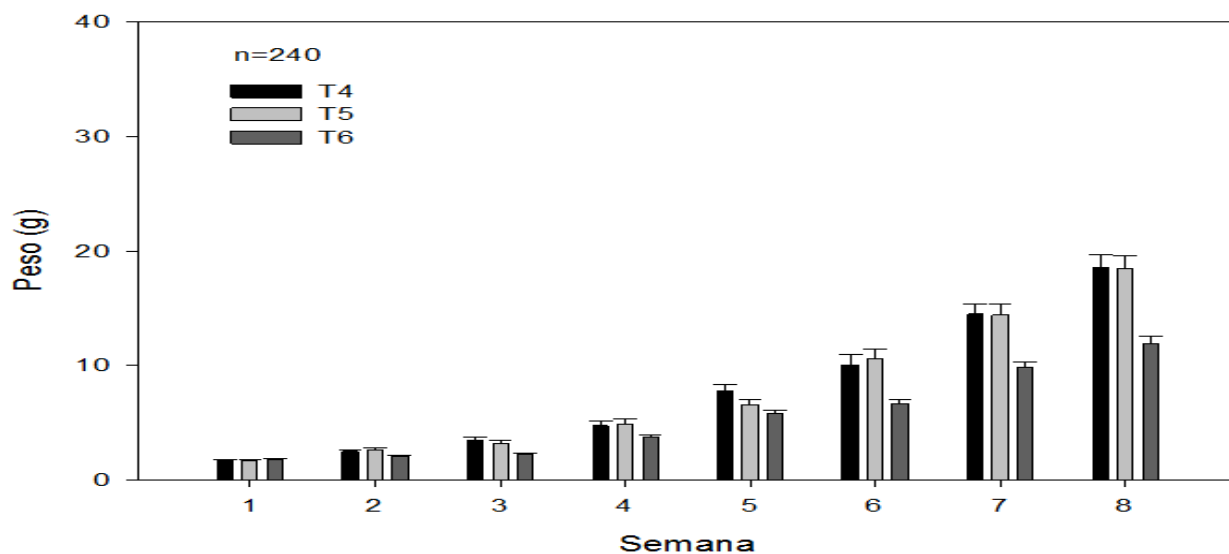


Figura 23. Comparación del comportamiento del crecimiento en peso (g) para *O. niloticus* variedad supermacho para los tratamientos sin control de temperatura T4, T5 y T6.



Como puede verse en la figura 24 los tratamientos con control de temperatura T1 y T2 muestran un mayor crecimiento en peso de los peces, mientras que el tratamiento T3 muestra valores más bajos de incremento en peso.

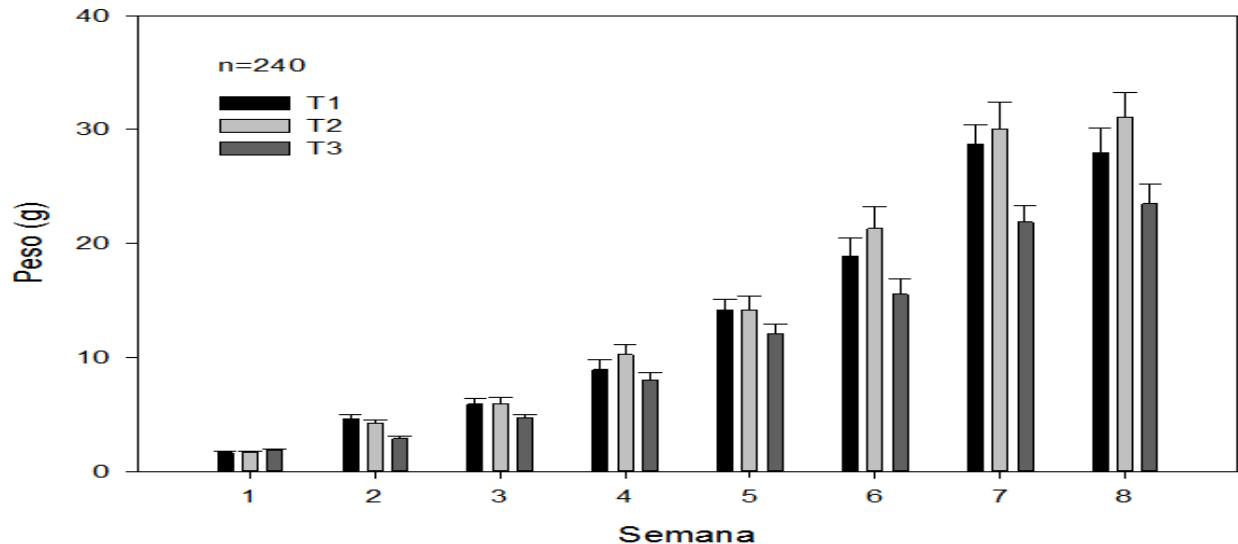


Figura 24. Comparación del comportamiento del crecimiento en peso (g) para *O. niloticus* variedad supermacho para los tratamientos con control de temperatura T1, T2 y T3.

Los resultados anteriores coinciden con el estudio hecho por Al-Asghar and Ali, (1997), en el cual encontró una diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) en los peces cultivados a una temperatura de 29 °C donde alcanzó mayor peso de 30.1 g, mientras que a 26 °C obtuvo el menor peso de 25.4 g. Workagegn, (2012), mostró el mayor crecimiento en peso en los peces cultivados a 32 °C (57.2 g) seguido del tratamiento a 30 °C (51.1 g), el menor crecimiento en peso fue a 24 °C con 29.3 g y tuvo una diferencia significativa con los tratamientos de 32 °C y 30 °C. Por su parte Pandit and Nakamura, (2011), encontraron dos grupos bien definidos donde el crecimiento en peso fue significativamente menor ( $P < 0.05$ ) entre 35 a 37 °C (16.3 g) comparado con los tratamientos entre 27 a 32 °C (22.2 g).

Estudios realizados con la especie *O. niloticus*, han reportado resultados del crecimiento en peso de los peces relacionado con la densidad de cultivo. Moniruzzaman et al., (2015), evaluó cuatro densidades de cultivo 50 ind/m<sup>3</sup> y 75 ind/m<sup>3</sup>, 100 ind/m<sup>3</sup> y 125 ind/m<sup>3</sup>, encontró una diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) entre el

tratamiento de 50 ind/m<sup>3</sup> (255 g) seguido de los tratamientos de 75 ind/m<sup>3</sup> (227 g), 100 ind/m<sup>3</sup> (206 g), 125 ind/m<sup>3</sup> (172 g)., Garcia Trejo et al., (2016) mostró una diferencia significativa (P < 0.05) entre tratamientos, observó un mayor crecimiento en peso en la densidad de 90 ind/m<sup>3</sup> (24.4 g) seguido de las densidades de 180 ind/m<sup>3</sup> (14.2 g), 270 ind/m<sup>3</sup> (8.2 g). Abdelhamid et al., (2017), propuso la densidad de 10 ind/m<sup>3</sup> como la mejor donde obtuvo un crecimiento en peso de 84.5 g. Nunoo and Asase, (2017), mostró un mejor crecimiento en peso en una densidad de 50 ind/m<sup>3</sup> (154 g) seguido de los tratamientos de 100 ind/m<sup>3</sup> (92.7 g) y 150 ind/m<sup>3</sup> (77.5 g) en jaulas.

En este proyecto se sugiere utilizar los tratamientos T1 o T2, con los cuales se obtuvo el mejor crecimiento en peso bajo las condiciones de invernadero aquí descritas.

### 6.5.3 Longitud inicial y final promedio

La comparación de crecimiento en longitud entre los tratamientos T1 y T4 muestra que el tratamiento T1 con control de temperatura presenta peces con una mayor longitud, mientras que los peces del tratamiento T4 sin control de temperatura muestran una longitud menor (figura 25).

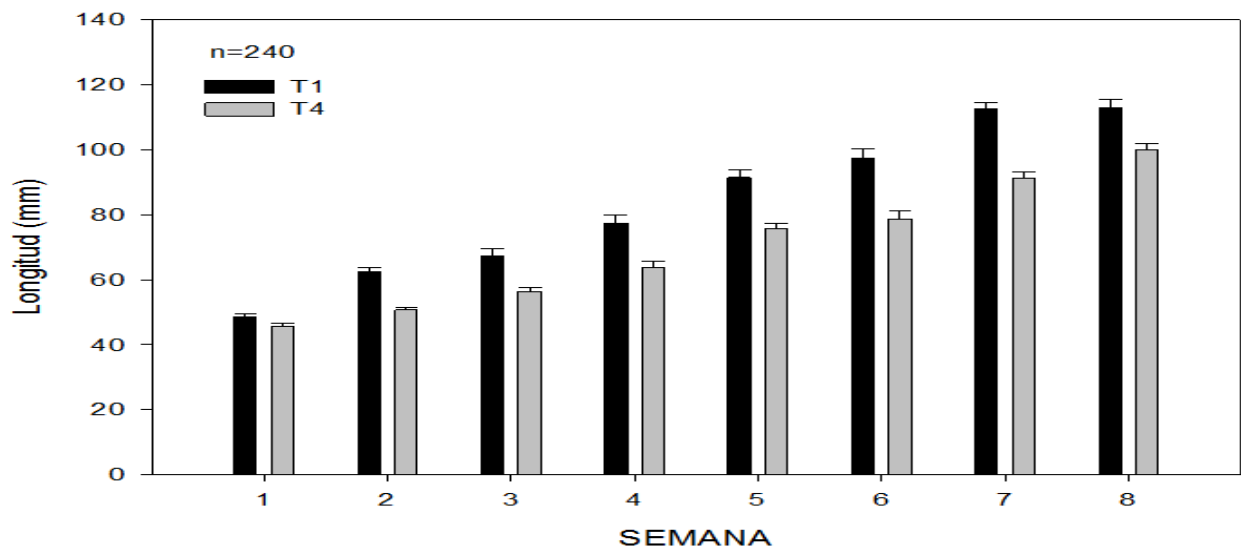


Figura 25. Comparación del comportamiento del crecimiento en longitud (mm) para *O. niloticus* variedad supermacho para los tratamientos T1 y T4.

Como puede verse en la figura 26 el tratamiento con control de temperatura T2 favorece el incremento en longitud de los peces, mientras que los peces del tratamiento T5 sin control de temperatura muestra valores más bajos de incremento en longitud.

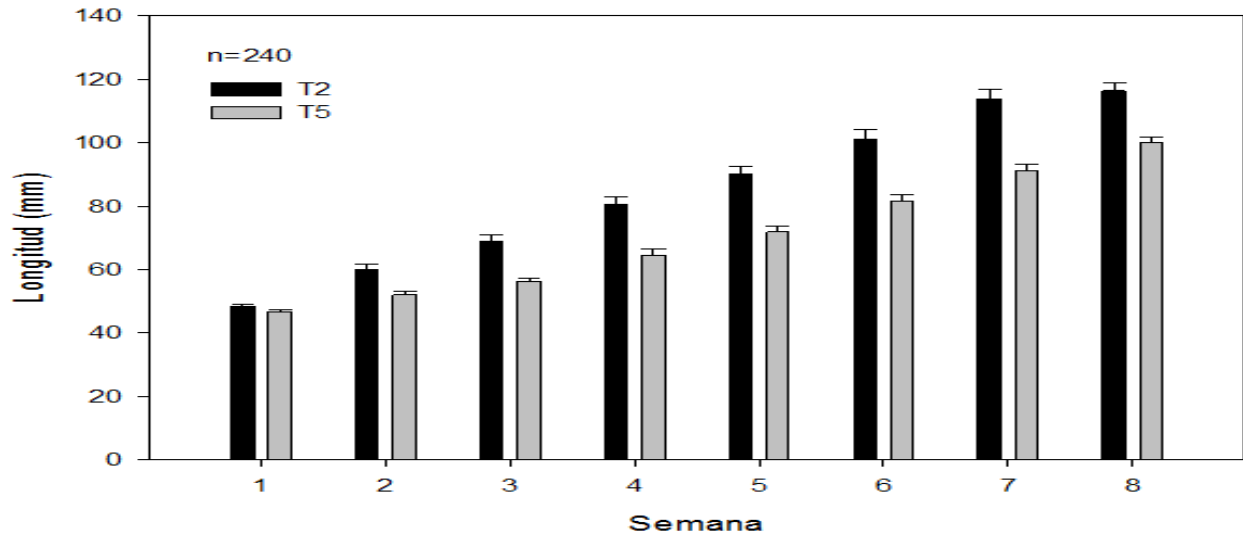


Figura 26. Comparación del comportamiento del crecimiento en longitud (mm) para *O. niloticus* variedad supermacho para los tratamientos T2 y T5.

En la figura 27 el tratamiento T3 con control de temperatura muestra una tendencia con un mayor crecimiento en longitud de los peces, mientras que los peces del tratamiento T6 sin control de temperatura muestra valores más bajos de incremento en longitud.

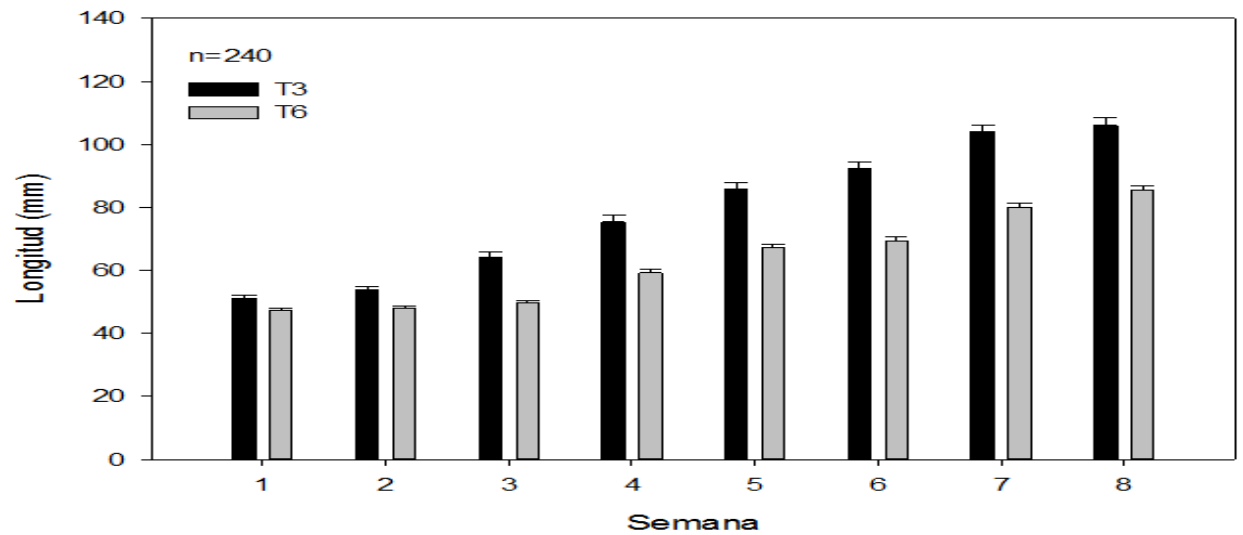


Figura 27. Comparación del comportamiento del crecimiento en longitud (mm) para *O. niloticus* variedad supermacho para los tratamientos T3 y T6.

El comportamiento de los tratamientos sin control de temperatura muestra una tendencia con un mayor crecimiento en longitud de los peces de los tratamientos T4 y T5, mientras que el tratamiento T6 muestra valores más bajos de incremento en longitud (figura 28).

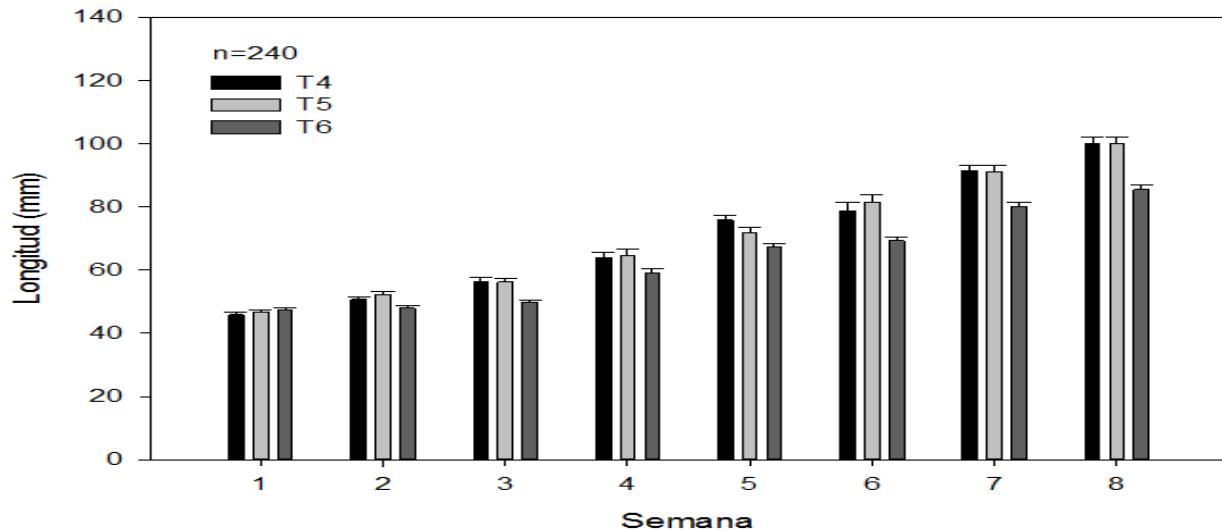


Figura 28. Comparación del comportamiento del crecimiento en longitud para *O. niloticus* variedad supermacho para los tratamientos sin control de temperatura T4, T5 y T6.

Como puede verse en la figura 29 los tratamientos con control de temperatura T1 y T2 muestran un mayor crecimiento en longitud de los peces, mientras que el tratamiento T3 muestra valores más bajos de incremento en longitud.

En general, el crecimiento en longitud mostró diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) entre los tratamientos con control de temperatura (T1, T2 y T3) y los que no tenían un control de temperatura (T4, T5 y T6). Los tratamientos T1 y T2 obtuvieron los valores de longitud más altos  $112.61 \pm 11.49$  mm y  $113.81 \pm 16.78$  mm, los cuales no tuvieron diferencia significativa, mientras que el tratamiento T6 presentó la menor longitud  $80.13 \pm 6.77$  mm. Los tratamientos en los que se tuvo un control de temperatura T1, T2 y T3 demostraron tener longitudes más altas que aquellos que no tuvieron un control de temperatura T4, T5 y T6, con esto se muestra que es importante la regulación de la temperatura para obtener peces con mayor longitud.

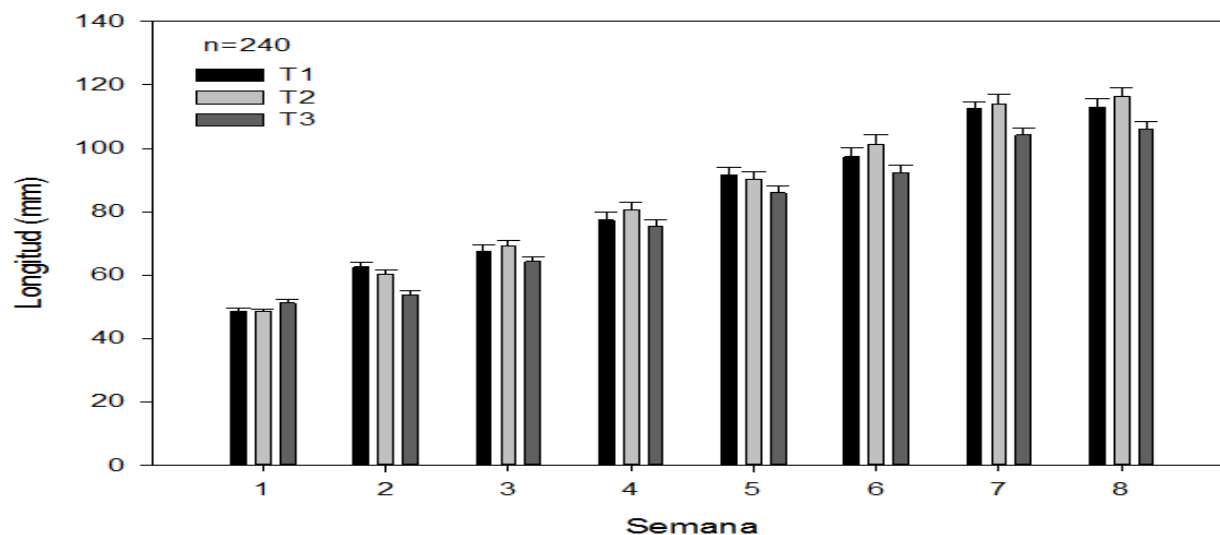


Figura 29. Comparación del comportamiento del crecimiento en longitud (mm) para *O. niloticus* variedad supermacho para los tratamientos con control de temperatura T1, T2 y T3.

Daudpota et al., (2016) presenta para *O. niloticus* en estanques de concreto longitudes de entre 149.1 mm y 151.5 mm para 60 días de experimentación, mientras que Garcia Trejo et al., (2016) obtuvo longitudes de entre 51.8 mm y 82.2 mm en un sistema de recirculación de agua en 60 días. Moniruzzaman et al., (2015), encontró en un sistema de jaulas longitudes de 184.8 mm y 231 mm en un periodo de 120 días.

#### 6.5.4 Relación peso talla del modelo potencial

Se utilizó el modelo de la ecuación potencial (8) para determinar la relación entre peso y talla, en el cual el coeficiente de regresión  $b$  proporciona información acerca del tipo de crecimiento, si  $b=3$  el crecimiento es isométrico y cuando  $b \neq 3$  el crecimiento es alométrico. Al principio de la experimentación los seis tratamientos T1, T2, T3, T4, T5, T6 presentaron un crecimiento alométrico (tabla 14), esto quiere decir que los peces llegaron con un estado fisiológico malo.

Tabla 14. Parámetros de la relación peso-talla al inicio y final del experimento.

Tratamiento	Inicio		Final	
	Intercepto (a)	Pendiente (b)	Intercepto (a)	Pendiente (b)
T1	-9.82	2.65	-11.09	3.21
T2	-7.98	2.19	-11.75	3.18
T3	-8.44	2.30	-11.93	3.22
T4	-6.53	1.84	-10.97	3.01
T5	-7.59	2.11	-11.75	3.18
T6	-9.20	2.53	-11.92	3.22

Al final del experimento los seis tratamientos T1, T2, T3, T4, T5, T6 presentaron un crecimiento isométrico (tabla 14), esto quiere decir que los peces de los tratamientos con regulación de temperatura y sin regulación de temperatura presentaron ganancia en peso y talla, su crecimiento fue ideal.

Con estos parámetros se generaron modelos para describir la relación peso (g)-longitud (mm) en las condiciones del presente experimento. Las ecuaciones de los modelos ajustados se muestran en la figura 30.

Sin control de temperatura

Con control de temperatura

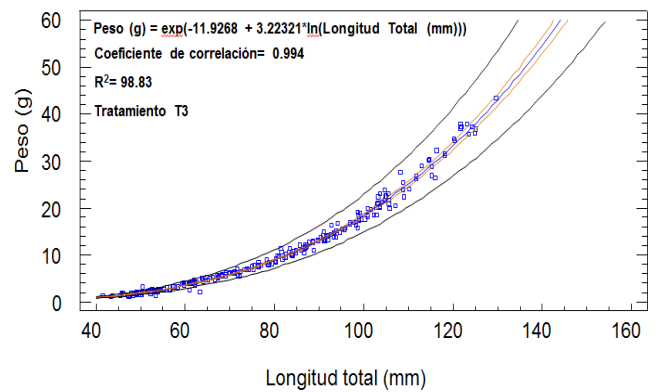
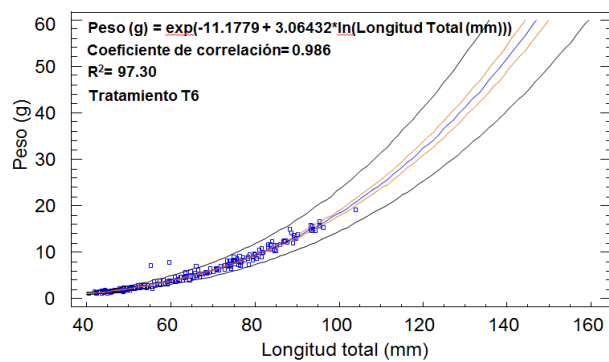
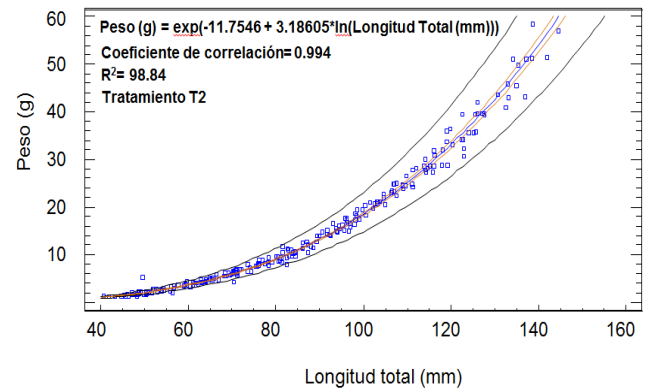
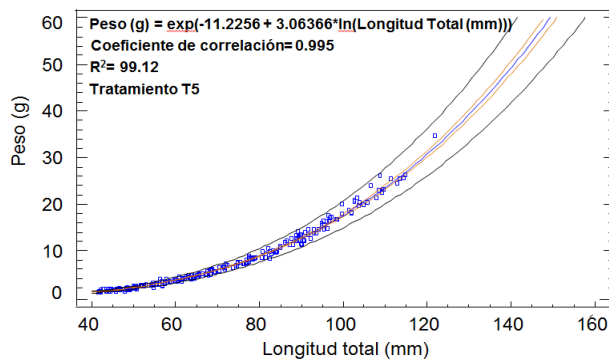
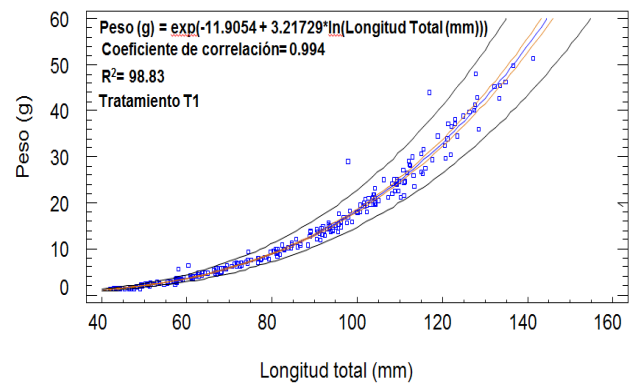
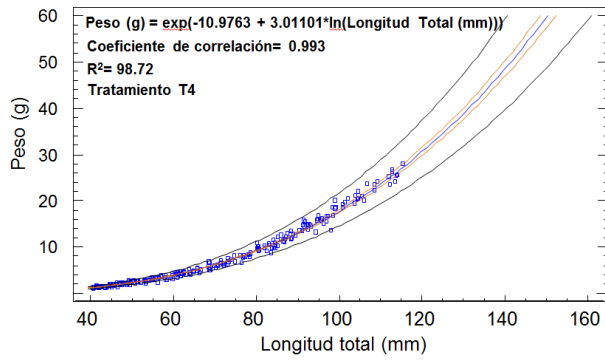


Figura 30. Regresiones que relacionan el peso (g) y la longitud total (mm) para el periodo experimental de los tratamientos T1, T2, T3, T4, T5 y T6.

Tomando en cuenta los anteriores datos, los peces con regulación de temperatura y sin regulación de temperatura llegaron al final de la experimentación con un buen estado fisiológico. Pero a diferencia de los peces que crecieron sin regulación de temperatura, los peces con regulación de temperatura obtuvieron un mayor crecimiento y peso durante el ciclo del experimento.

#### 6.5.5 Estimadores del crecimiento

La ganancia en peso (g) mostró diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) entre los tratamientos con control de temperatura (T1, T2 y T3) y los que no tenían un control de temperatura (T4, T5 y T6) (tabla 15). Los tratamientos T1 y T2 obtuvieron los valores de ganancia en peso más altos  $541.6 \pm 108.3$  g (1622 %) y  $566.6 \pm 105.9$  g (1670 %), los cuales no tuvieron diferencia significativa, mientras que el tratamiento T6 presentó la menor ganancia en peso (g)  $160.4 \pm 26.9$  g (444.3 %). Los tratamientos en los que se tuvo un control de temperatura T1, T2 y T3 demostraron tener ganancia de pesos más altos que aquellos que no tuvieron un control de temperatura T4, T5 y T6.

Los resultados anteriores coinciden con los de Mirea et al., (2013) que obtuvo una tendencia de ganancia de peso mayor de 766.6 g (152%) a una temperatura de 30 °C seguida por la de 24 °C con 595.3 g (117%) en un tiempo de 30 días, mientras que Workagegn, (2012), mostró la mayor ganancia de peso de 469.9 g a una temperatura de 30 °C seguida por la de 24 °C con 251.2 g en un tiempo de 90 días.

En cuanto a la ganancia de longitud (tabla 15) se observó la misma tendencia, es decir, los tratamientos T1 y T2 obtuvieron los valores de ganancia en longitud más altos  $64.0 \pm 4.76$  mm (131 %) y  $65.36 \pm 5.64$  mm (135 %), los cuales no tuvieron diferencia significativa, mientras que el tratamiento T6 presentó la menor ganancia en longitud  $32.78 \pm 2.99$  mm (69.29 %). Los tratamientos en los que se tuvo un control de temperatura T1, T2 y T3 demostraron tener ganancia en longitud más altos que aquellos que no tuvieron un control de temperatura T4, T5 y T6.



Tabla 15. Estimadores de crecimiento para *O. niloticus* en seis tratamientos de densidad y temperatura durante 60 días (media  $\pm$  DS)<sup>z</sup>

Tratamiento						
Estimadores	T1	T4	T2	T5	T3	T6
Condición	Control Temp.	Sin Temp.	Control Temp.	Sin Temp.	Control Temp.	Sin Temp.
Ganancia en peso (g)	541.6 $\pm$ 108.3 <sup>a</sup>	255.4 $\pm$ 43.2 <sup>bc</sup>	566.6 $\pm$ 105.9 <sup>a</sup>	254.6 $\pm$ 19.4 <sup>bc</sup>	400.3 $\pm$ 44.4 <sup>ab</sup>	160.4 $\pm$ 26.9 <sup>c</sup>
Ganancia en peso (%)	1622 $\pm$ 268 <sup>a</sup>	744.3 $\pm$ 142.8 <sup>bc</sup>	1670 $\pm$ 273 <sup>a</sup>	756.7 $\pm$ 91.9 <sup>bc</sup>	1062 $\pm$ 25.1 <sup>b</sup>	444.3 $\pm$ 61.2 <sup>c</sup>
Ganancia en longitud (mm)	64.00 $\pm$ 4.76 <sup>a</sup>	44.89 $\pm$ 3.64 <sup>b</sup>	65.36 $\pm$ 5.64 <sup>a</sup>	44.51 $\pm$ 3.21 <sup>b</sup>	52.92 $\pm$ 0.88 <sup>b</sup>	32.78 $\pm$ 2.99 <sup>c</sup>
Ganancia en longitud (%)	131.56 $\pm$ 7.26 <sup>a</sup>	96.40 $\pm$ 7.34 <sup>b</sup>	135.02 $\pm$ 11.60 <sup>a</sup>	95.75 $\pm$ 11.80 <sup>b</sup>	103.38 $\pm$ 1.46 <sup>b</sup>	69.29 $\pm$ 6.19 <sup>c</sup>
Tasa específica de crecimiento (TEC; %día)	4.73 $\pm$ 0.26 <sup>a</sup>	3.54 $\pm$ 0.28 <sup>b</sup>	4.78 $\pm$ 0.25 <sup>a</sup>	3.57 $\pm$ 0.18 <sup>b</sup>	4.09 $\pm$ 0.04 <sup>b</sup>	2.82 $\pm$ 0.18 <sup>c</sup>

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

Moniruzzaman et al., (2015) menciona en un estudio para la especie *O. niloticus* que la densidad de 50 ind/m<sup>3</sup> exhibió la mayor ganancia de peso en 240 g (1581 %) y en longitud de 139.5 mm (152.5 %) seguidos por las densidades de 75 ind/m<sup>3</sup>, 100 ind/m<sup>3</sup> y 125 ind/m<sup>3</sup>, los cuales mostraron una menor ganancia en peso y en longitud de 212 g (1394 %), 191 g (1256 %), 157 g (1035 %), 126.8 mm (138.4 %), 115.5 mm (125.9 %) y 93.2 mm (101.7 %) respectivamente, en un experimento de 120 días a una temperatura promedio de 30 °C. Garcia Trejo et al., (2016), mostró en la densidad de cultivo de 90 ind/m<sup>3</sup> la mayor ganancia de peso en 1882 g (1408 %) y en longitud de 47.69 mm (138.94 %) seguidos por las densidades de 180 ind/m<sup>3</sup> y 270 ind/m<sup>3</sup>, los cuales presentaron una menor ganancia en peso y en longitud de 2081 g (740 %), 1507 g (337 %), 32.75 mm (97.12 %), 16.26 mm (45.55 %) respectivamente, en un experimento de 60 días a una temperatura promedio de 24.68 °C.

Lo anterior es demostrado al analizar T.E.C (Tabla 15), donde de nuevo se observa el comportamiento donde los tratamientos T1 y T2 obtuvieron los valores de T.E.C más altos de 4.73±0.26 %/día y 4.78±0.25 %/día, mientras que el tratamiento T6 presentó la menor T.E.C de 2.82±0.18 %/día. Los tratamientos en los que se tuvo un control de temperatura T1, T2 y T3 demostraron tener mayor T.E.C que aquellos que no tuvieron un control de temperatura T4, T5 y T6. Los datos sugieren que la regulación de la temperatura influye en el tamaño de los organismos.

Los datos anteriores coinciden con el estudio de Mirea et al., (2013) que presentó una diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) entre el valor mayor de T.E.C de 3.09 % con el tratamiento de temperatura de 30 °C y el valor menor de T.E.C de 2.58 % con el tratamiento de la temperatura de 24 °C. En otro estudio Nunoo and Asase,( 2017), mostro un T.E.C de 2.23 % para una densidad de cultivo de 50 ind/m<sup>3</sup> seguido por valores menores de T.E.C de 1.62% y 1.42% para las densidades de cultivo de 100 ind/m<sup>3</sup> y 150 ind/m<sup>3</sup> respectivamente.

Los datos obtenidos en este estudio demuestran que al regular la temperatura del cultivo de tilapia entre 27 a 30 °C se obtiene un mayor crecimiento en peso, en longitud y T.E.C que a temperaturas entre 20 y 24 °C, mientras que la densidad de

cultivo afecta inversamente estos factores, es decir, mientras más alta la densidad de cultivo se obtiene un menor crecimiento en peso, en longitud y T.E.C.

### 6.6 Análisis de los efectos principales sobre el crecimiento de tilapia

Los factores que fueron considerados para el diseño de experimentos en el cultivo de tilapia fueron la temperatura y la densidad de cultivo. La temperatura se trabajó con dos niveles, el nivel 1 fue con control de temperatura (C) y el nivel 2 sin control de temperatura (F). Para la densidad de cultivo los niveles fueron tres, nivel 1=20 org/0.3 m<sup>3</sup>, nivel 2=40 org/0.3 m<sup>3</sup> y nivel 3=80 org/0.3 m<sup>3</sup>.

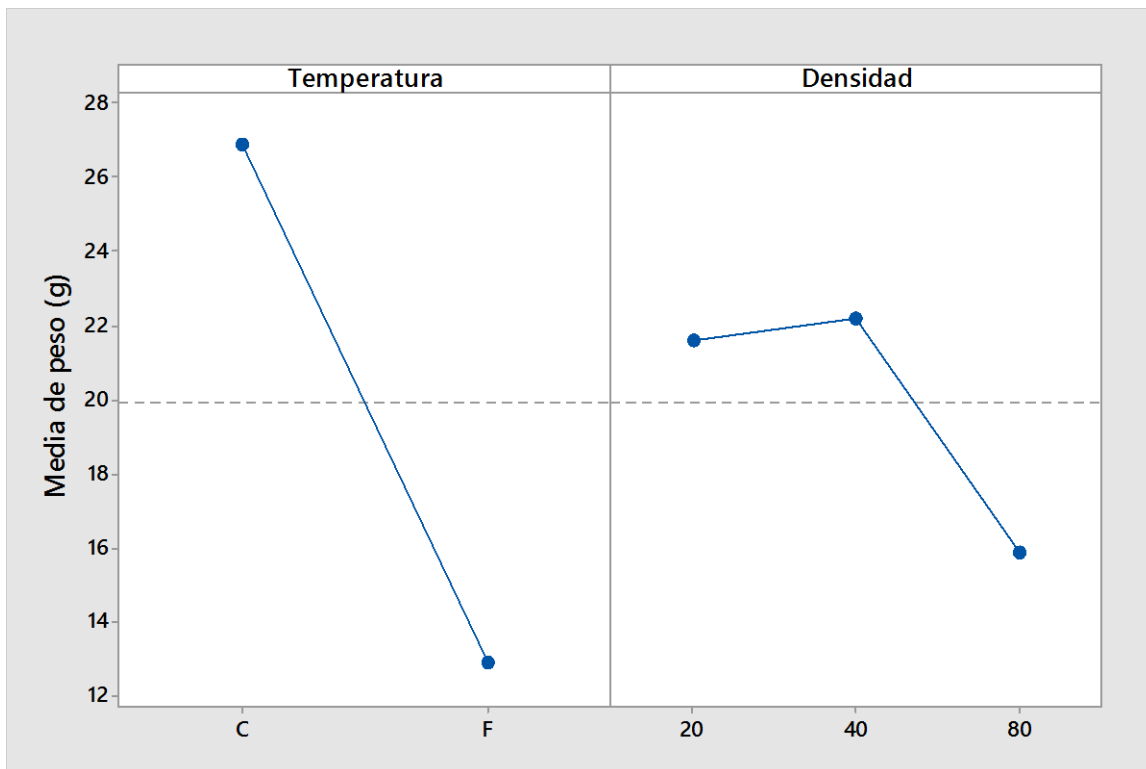


Figura 31. Grafica de los efectos principales sobre el crecimiento de tilapia.

En el análisis de varianza, se obtuvo un valor de p significativo menor a 0.05 para el factor de la temperatura y la densidad de cultivo en sus niveles 1 (20 org/0.3 m<sup>3</sup>) y nivel 2 (40 org/0.3 m<sup>3</sup>). En la figura 31 se muestran los efectos que tienen la temperatura y la densidad de cultivo sobre el crecimiento en peso (g) de las tilapia

cultivadas. En la gráfica se observó que el efecto de la temperatura en el nivel 1 (Con control de temperatura) y de la densidad de cultivo en sus niveles 1 y 2 beneficia el crecimiento en peso (g) de las tilapias cultivadas.

En la figura 32 se muestra el efecto que tiene la interacción entre la temperatura y la densidad de cultivo sobre el crecimiento en peso (g) de las tilapias cultivadas. En la gráfica se corrobora la evidencia de que la temperatura mostró un efecto significativo en el crecimiento en peso (g) de la tilapia. También se observó una tendencia que indicó que a mayor densidad de cultivo el crecimiento en peso (g) de la tilapia es menor.

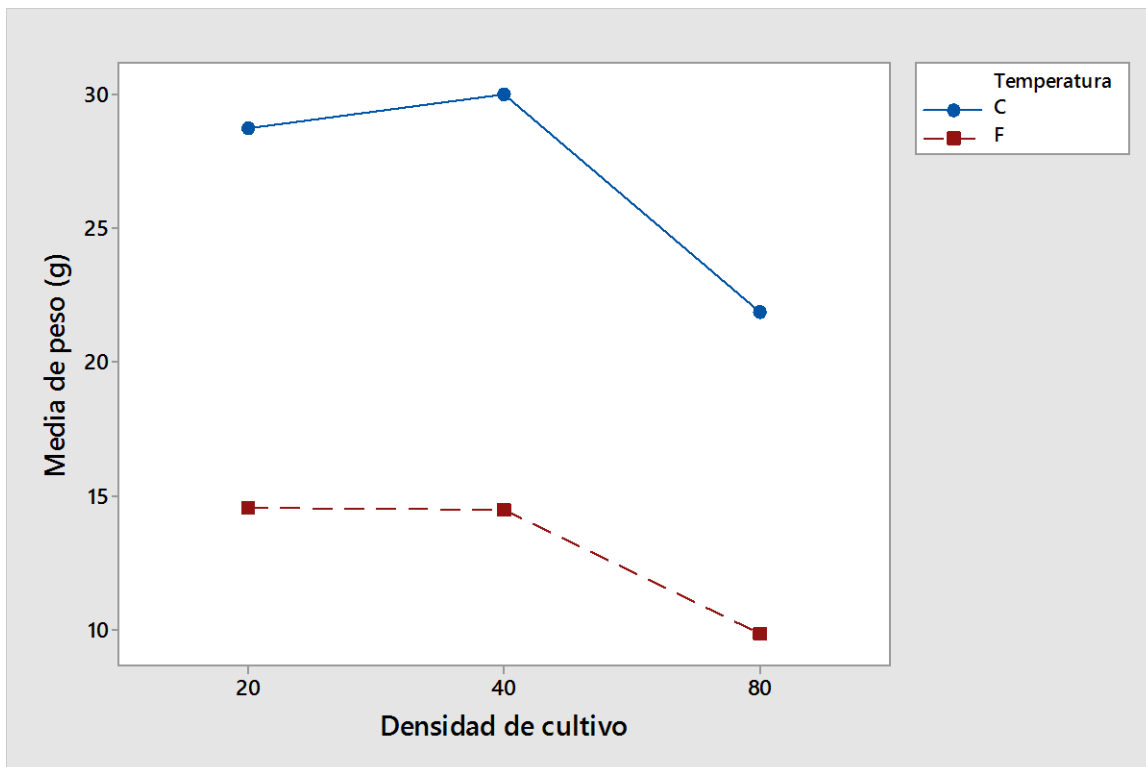


Figura 32. Gráfica del efecto de la interacción entre la temperatura y la densidad de cultivo sobre el crecimiento de tilapia.

## 6.7 Estimadores del análisis proximal

En la tabla 16 se muestran los resultados de análisis bromatológico para los seis tratamientos durante 60 días. Se observó que el tratamiento T2 con control de temperatura mostró significativamente ( $P < 0.05$ ) mayor contenido de humedad con un  $79.04 \pm 0.20$  % en comparación con el tratamiento T4 con un  $77.86 \pm 0.25$  %. El tratamiento T4 sin control de temperatura obtuvo una menor cantidad de humedad con un  $77.86 \pm 0.25$  %, este tratamiento no tuvo diferencia significativa con los tratamientos T1, T3, T5 y T6.

Los tratamientos T3, T4, T5 y T6 no mostraron una diferencia significativa, pero se observó dentro de este grupo que los tratamientos T4, T5 y T6 sin control de temperatura mostraron una cantidad menor de humedad de  $77.86 \pm 0.26$  %,  $78.2 \pm 0.26$  % y  $78.19 \pm 0.34$  %, mientras que los tratamientos T1, T2 y T3 con control de temperatura presentaron una cantidad mayor de humedad de 78.72 %, 79.04 % y 78.63 % (figura 31).

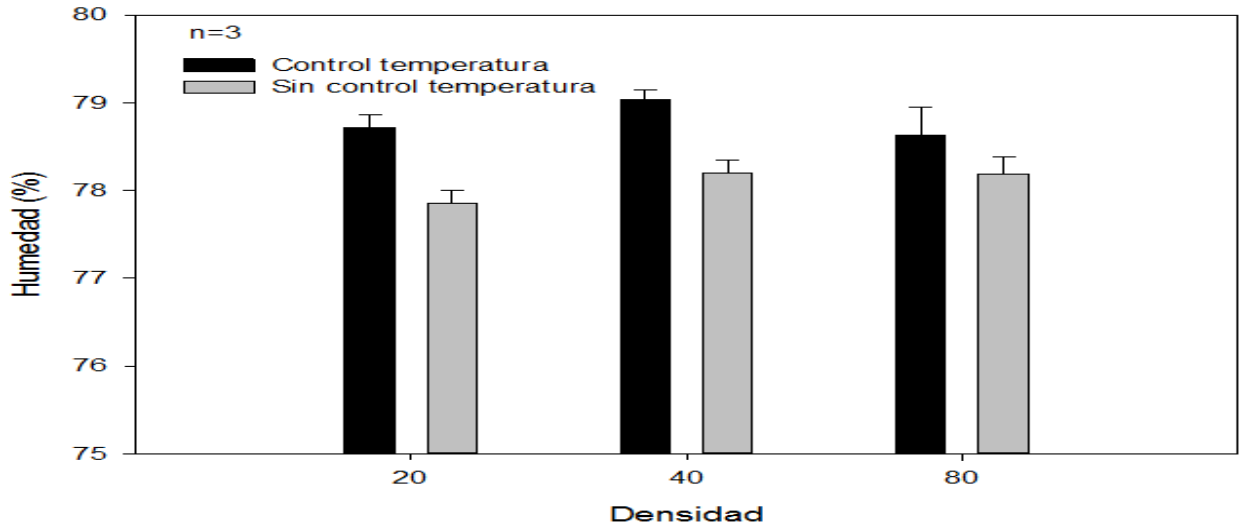


Figura 33. Comparativo del porcentaje de humedad para los seis tratamientos de cultivo.

Tabla 16. Resultados del análisis bromatológico para *O. niloticus* en seis tratamientos de densidad y temperatura durante 60 días (media  $\pm$  DS)<sup>2</sup>

Tratamiento						
Estimadores	T1	T4	T2	T5	T3	T6
Condición	Control Temp.	Sin Temp.	Control Temp.	Sin Temp.	Control Temp.	Sin Temp.
Número inicial (No)	20	20	40	40	80	80
Humedad (%)	78.72 $\pm$ 0.25 <sup>ab</sup>	77.86 $\pm$ 0.25 <sup>b</sup>	79.04 $\pm$ 0.20 <sup>a</sup>	78.2 $\pm$ 0.26 <sup>ab</sup>	78.63 $\pm$ 0.54 <sup>ab</sup>	78.19 $\pm$ 0.34 <sup>ab</sup>
Cenizas (%)	1.32 $\pm$ 0.004 <sup>a</sup>	1.37 $\pm$ 0.13 <sup>a</sup>	1.29 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	1.31 $\pm$ 0.14 <sup>a</sup>	1.23 $\pm$ 0.104 <sup>a</sup>	1.41 $\pm$ 0.07 <sup>a</sup>
Lípidos (%)	4.50 $\pm$ 0.26 <sup>d</sup>	5.38 $\pm$ 0.38 <sup>bc</sup>	4.83 $\pm$ 0.13 <sup>cd</sup>	6.33 $\pm$ 0.13 <sup>a</sup>	5.51 $\pm$ 0.05 <sup>b</sup>	5.52 $\pm$ 0.09 <sup>b</sup>
Proteína (%)	78.71 $\pm$ 1.16 <sup>a</sup>	76.87 $\pm$ 0.25 <sup>a</sup>	76.55 $\pm$ 1.36 <sup>a</sup>	75.48 $\pm$ 3.62 <sup>a</sup>	77.01 $\pm$ 3.17 <sup>a</sup>	75.32 $\pm$ 0.81 <sup>a</sup>

<sup>2</sup>Valores promedio para cada tratamiento seguidos por un superíndice indica que existe una diferencia significativa (P < 0.05).

El porcentaje de cenizas no mostró diferencia significativa entre los tratamientos con control de temperatura (T1, T2 y T3) y los que no tenían un control de temperatura (T4, T5 y T6) (tabla 16).

Los tratamientos T4, T5 y T6 sin control de temperatura obtuvieron los valores de porcentaje de cenizas más altos  $1.37\pm 0.13\%$ ,  $1.32\pm 0.14\%$  y  $1.41\pm 0.07\%$ , mientras que los tratamientos T1, T2 y T3 con control de temperatura mostraron el menor porcentaje de cenizas  $1.32\pm 0.005\%$ ,  $1.29\pm 0.02\%$  y  $1.23\pm 0.104\%$  (figura 32).

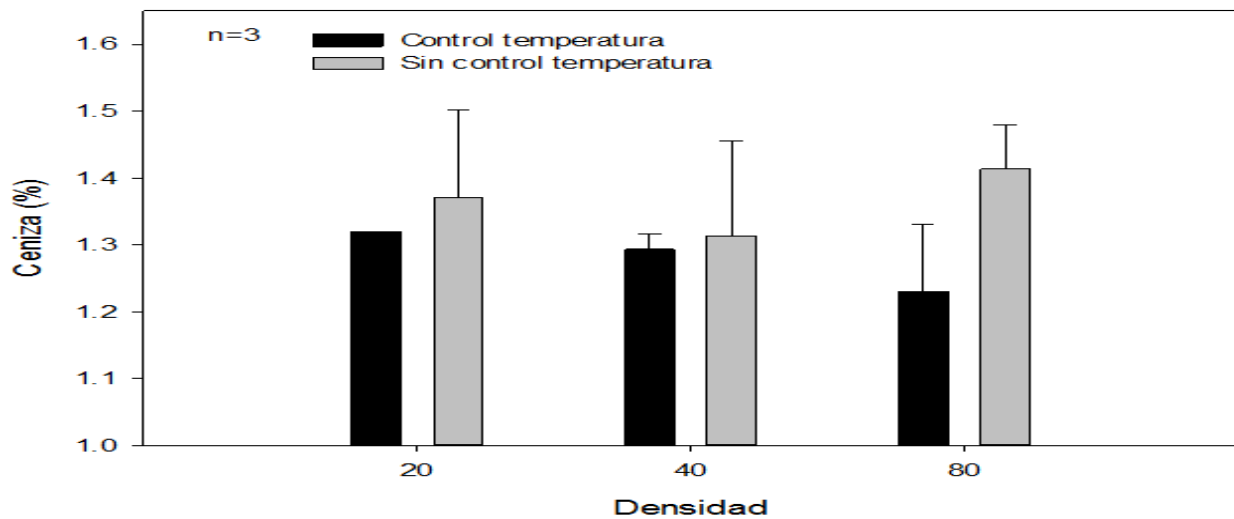


Figura 34. Comparativo del porcentaje de cenizas totales para los seis tratamientos de cultivo.

En la tendencia en la cantidad de grasas totales se observa el mayor porcentaje en los tratamientos T5 y T6 sin control de temperatura de  $6.33\pm 0.13\%$  y  $5.52\pm 0.09\%$ , mientras que para los tratamientos T2 y T3 con control de temperatura mostraron el menor porcentaje de grasas totales con  $4.83\pm 0.13\%$  y  $4.50\pm 0.26\%$ , entre estos dos grupos se registró una diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) (figura 33).

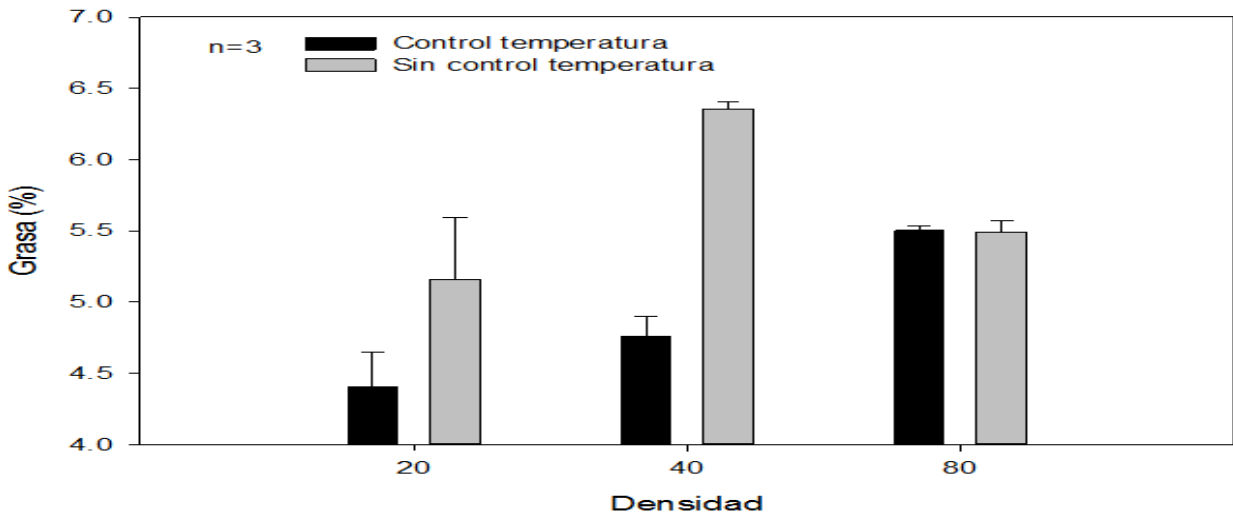


Figura 35. Comparativo del porcentaje de grasas totales para los seis tratamientos de cultivo.

El porcentaje de proteína no mostró diferencia significativa entre los tratamientos con control de temperatura (T1, T2 y T3) y los que no tenían un control de temperatura (T4, T5 y T6). Los tratamientos T1, T2 y T3 con control de temperatura obtuvieron los valores de proteína más altos  $78.71 \pm 1.16$  %,  $76.55 \pm 1.36$  % y  $77.01 \pm 3.17$  %, mientras que los tratamientos T4, T5 y T6 sin control de temperatura mostraron el menor porcentaje de proteína  $76.87 \pm 0.25$  %,  $75.48 \pm 3.62$  % y  $75.32 \pm 0.81$  % (figura 34).

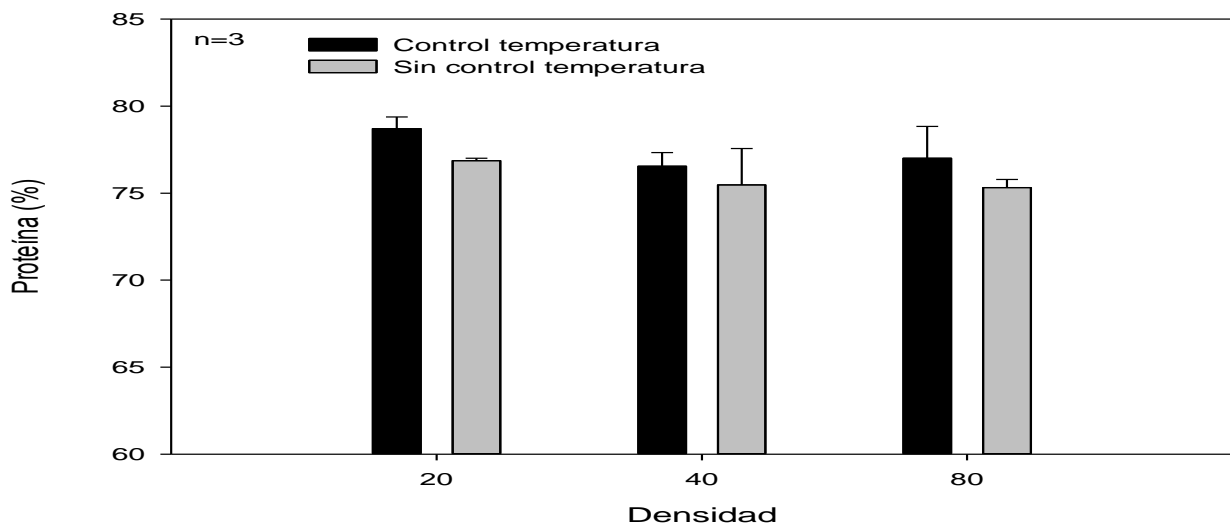


Figura 36. Comparativo del porcentaje de proteína para los seis tratamientos de cultivo.



Los resultados de humedad, cenizas y lípidos coinciden con los obtenidos por Al-Asgah and Ali, (1997), donde obtuvo una mayor cantidad de humedad de 73.3 % y una menor cantidad de lípidos (5.42 %) y cenizas (4.25 %) en un tratamiento a 29 °C, mientras que la menor cantidad de humedad (72.86) y mayor cantidad de lípidos (6.10 %) y cenizas (4.48 %) la mostró con un tratamiento a 23 °C con una diferencia significativa ( $P < 0.05$ ), el contenido de proteína no fue afectado por el cambio de temperatura y densidades de población ( $P > 0.05$ ). En otro estudio sobre el efecto de la temperatura sobre la composición nutricional de la carpa (*Cyprinus carpio*), Desai and Singh, (2009) obtuvo una mayor cantidad de humedad de  $73.39 \pm 0.42$  % y una menor cantidad de lípidos ( $10.90 \pm 0.35$  %) en un tratamiento a 32 °C, mientras que la menor cantidad de humedad (73.15 %) y mayor cantidad de lípidos ( $12.05 \pm 0.31$  %) la mostró con un tratamiento a 28 °C con una diferencia significativa ( $P < 0.05$ ), la cantidad de proteína tuvo una diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) obteniendo mayor cantidad en el tratamiento de mayor temperatura, el porcentaje de cenizas no tuvo diferencia significativa ( $P > 0.05$ ).

## 6.7 Análisis económico

La evaluación de proyectos nos permite tomar una decisión de invertir o no invertir en un proyecto en base a la comparación de las utilidades o beneficios frente a los respectivos costos de producción del producto ofrecido por el proyecto, es decir, que cuando las utilidades sean mayores a los costos es mejor invertir. Para tomar esta decisión de invertir o no en el proyecto se calculan dos indicadores, el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR). El VAN indica el valor futuro del dinero que va a recibir el proyecto en diferentes periodos recuperando las inversiones realizadas de costos de producción y obteniendo utilidades. El TIR, es la tasa de interés o rentabilidad que genera un proyecto, es decir, el porcentaje de beneficio o pérdida que tendrá este.

En este análisis económico se utilizaron los tratamientos con la densidad de población intermedia de 40 individuos con control de temperatura (T2) y sin control de temperatura (T5) debido a que fueron los tratamientos en los que mayor crecimiento en peso (g) se obtuvo, con el objetivo de comparar en cual tratamiento se obtenía un mejor beneficio a largo plazo. Para este análisis se tomó en cuenta la inversión inicial de costos de equipo, egresos e ingresos. Se consideró costo de equipo el dinero gastado en todos los elementos que se dispusieron para armar el sistema de recirculación (RAS) donde fueron cultivados los peces, los egresos incluyeron gasto de agua, alimento y electricidad, y los ingresos se refieren a la ganancia durante un periodo de cosecha.

Para este análisis económico se consideraron 5 periodos anuales (5 años) y una tasa de descuento inicial del 10% anual. La inversión inicial del tratamiento T2 fue de 71,874 pesos, los egresos sumaron 6,456 pesos/año y los ingresos fueron de 25,137 pesos/año, mientras que la inversión inicial del tratamiento T5 fue de 61,226 pesos, los egresos sumaron 5,475 pesos/año y los ingresos fueron de 16,758 pesos/año. Las diferencias en estos valores fueron debidos a que en el tratamiento sin control de temperatura (T5) no se consideró el calentador en la inversión inicial, dando como consecuencia una reducción en el gasto de electricidad. En el caso de los ingresos, la diferencia se da debido a que con el tratamiento con control de temperatura (T2) se tiene la oportunidad de cosechar tres veces al año mientras que con el tratamiento sin

control de temperatura solo dos veces al año, esto es debido al efecto que tiene la temperatura en el crecimiento de los peces.

En la figura 34 se muestra el comparativo de la tasa interna de retorno (TIR) entre los tratamientos T2 con control de temperatura y T5 sin control de temperatura. Para el tratamiento T2 con control de temperatura se obtuvo un VAN de 13,828 pesos, mientras que para el tratamiento T5 sin control de temperatura se presentó un VAN negativo de 5,775 pesos, lo que demuestra una primer ventaja del tratamiento T2.

En el caso del TIR, solo el tratamiento T2 con control de temperatura presentó un valor mayor que la tasa de descuento inicial (10%) del 17%, mientras que el tratamiento T5 sin control de temperatura mostró un valor TIR de 7%, es decir, la TIR resultante del tratamiento T2 con control de temperatura es mejor debido a que tiene una TIR máximo del 17%, significa que todos los valores que están por debajo de este porcentaje siempre tendrá un VAN positivo, demostrando que si se elige el proyecto con el tratamiento T2 se recuperarán las inversiones realizadas de costos de producción, obteniendo utilidades. Por el contrario la TIR resultante del tratamiento T5 sin control de temperatura tiene un valor TIR máximo del 7%, lo que indica que si se elige el proyecto con el tratamiento T5 no se recuperarán las inversiones realizadas de costos de producción, obteniendo pérdidas. Por lo tanto es mejor invertir en el tratamiento T2.

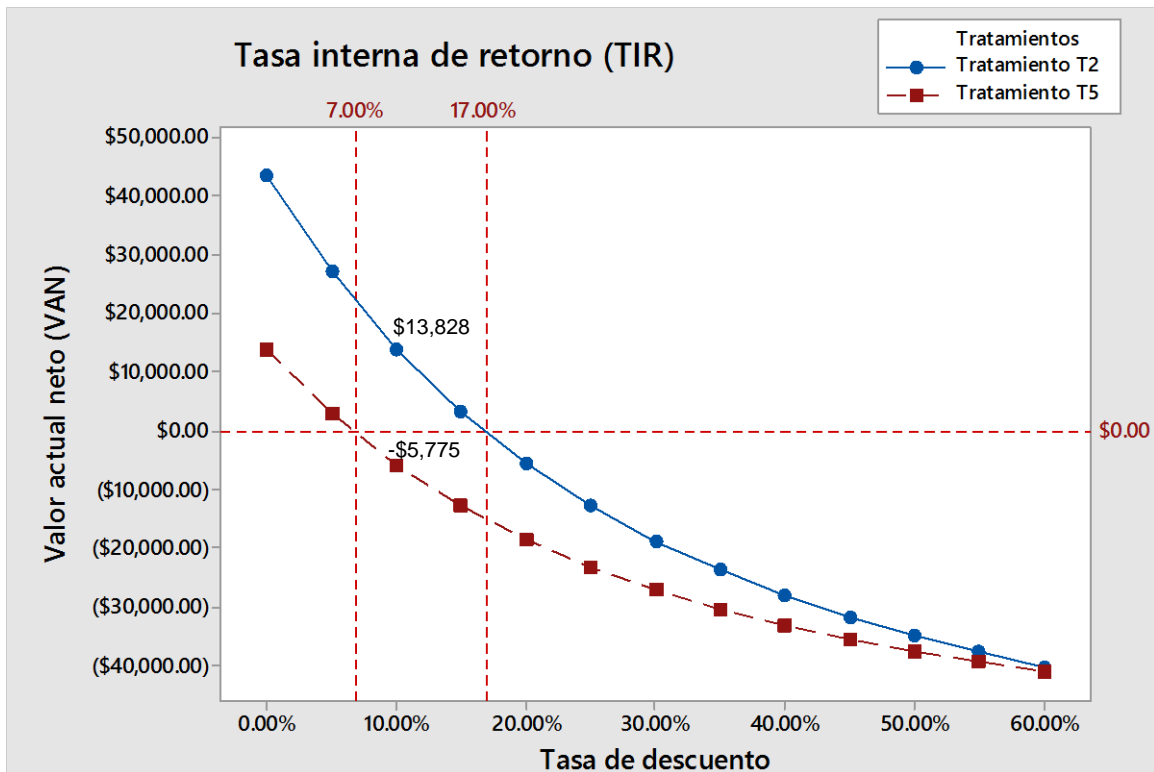


Figura 37. Comparativo de la tasa interna de retorno (TIR) entre los tratamientos T2 con control de temperatura y T5 sin control de temperatura.

## 7. CONCLUSIONES

- El cultivo de tilapia en condiciones de temperatura a 28°C y densidad poblacional de 270 org/m<sup>3</sup> demostró tener el menor efecto en crecimiento en peso (g) comparado con las densidades de población de 135 org/m<sup>3</sup> y 67 org/m<sup>3</sup>.
- En general, las tilapias cultivadas con control de temperatura presentaron un mayor crecimiento en peso (g) en comparación a las que se cultivaron sin control de temperatura.
- El cultivo de tilapia en condiciones de temperatura a 28°C y densidad poblacional de 135 org/m<sup>3</sup> demostró tener el mayor efecto en crecimiento en peso (g) comparado con las densidades de población de 270 org/m<sup>3</sup> y 67 org/m<sup>3</sup>.
- Respecto a la calidad nutricional, la cantidad de grasas totales en la tilapia es mayor en los tratamientos sin control de temperatura, observando una diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) en comparación con los tratamientos con control de temperatura.
- En cuanto al porcentaje de proteína en el filete de tilapia no se presentó una diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) entre tratamientos.
- La evaluación del proyecto nos permitió corroborar que es factible el cultivo de tilapia en condiciones de temperatura a 28°C y densidad poblacional de 135 org/m<sup>3</sup>, ya que estas condiciones mostraron la mejor tasa interna de retorno del 17%.

## 8. RECOMENDACIONES

Los sistemas de recirculación de agua (RAS) ofrecen una alternativa para incrementar la capacidad productiva de la acuicultura y al mismo tiempo cuidar un recurso natural que cada vez es más escaso, el agua. La tilapia (*Oreochromis niloticus*) se presenta como una especie con una alta capacidad productiva y que puede funcionar bien su cultivo bajo condiciones de invernadero en la región del semidesierto queretano.

Además, integrando este sistema (RAS) y la especie *O. niloticus* se puede ofrecer una oportunidad para el uso eficiente del agua y la utilización de nutrientes, así como una alternativa de aumentar productividad al mismo tiempo que se pueden reducir situaciones de gestión de desechos y contaminación.

Se sugiere para futuros estudios complementar este trabajo con un perfil de aminoácidos y ácidos grasos para evaluar la calidad de las proteínas y lípidos contenidos en los filetes de pescado. En adición a esto se recomienda explorar la utilidad de alimentos alternos para su producción, como lo son insectos y micro alga de los cuales se sabe que son una buena fuente de proteína. Se recomienda realizar como continuación de este proyecto, un estudio donde se utilicen las condiciones de cultivo de tilapia que dieron mejores resultados en este trabajo, para determinar la viabilidad de alimentar a esta especie con fuentes alternas de proteína y revisar la productividad, con la finalidad de determinar si estas fuentes alternas de alimento benefician en un mejor crecimiento y el costo de producción.

Tomando también en consideración el tiempo limitado para el presente proyecto y debido a que las instalaciones fueron ocupadas inmediatamente después de terminar este estudio para otros proyectos, se sugiere realizar una prueba de confirmación de cinco meses en donde las tilapias alcancen su tamaño comercial con el tratamiento que mejor resultados se obtuvo, con el fin de verificar el efecto positivo de la temperatura y densidad poblacional sobre el crecimiento de la tilapia.

## 9. REFERENCIAS

Abdel-Tawwab, M., M. H. Ahmad, Y. A. E. Khattab, and 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.). *Aquaculture*. 298:267–274.

Abdelhamid, A. M., M. A. Sweilum, and M. M. M. H. Zaher. 2017. Improving the Nile Tilapia Production under Different Culture Systems. *Int. J. Curr. Res. Biosci. Plant Biol. Cult. Syst. Int. J. Curr. Res. Biosci. Plant Biol.* 4:41–56.

Al-Asgah, N., and A. Ali. 1997. Growth performance and body composition of *Oreochromis niloticus* reared at different water temperatures. *Ann. Zootech.* 46:331–338.

Ashley, P. J. 2007. Fish welfare: Current issues in aquaculture. *Appl. Anim. Behav. Sci.* 104:199–235.

Assessment, G. 1999. *Source Water Quality for Aquaculture*.

Atlatenco, C. F. 2007. *Manual de producción de tilapia*.

Aubin, J., E. Papatryphon, H. M. G. Van der Werf, J. Petit, and Y. M. Morvan. 2006. Characterisation of the environmental impact of a turbot (*Scophthalmus maximus*) recirculating production system using Life Cycle Assessment. *Aquaculture*. 261:1259–1268.

Azaza, M. S., A. Assad, W. Maghrbi, and M. El-Cafsi. 2013. The effects of rearing density on growth, size heterogeneity and inter-individual variation of feed intake in monosex male Nile tilapia *Oreochromis niloticus* L. *Animal*. 7:1865–1874.

Azaza, M. S., M. N. Dhraïef, and M. M. Kraïem. 2008. Effects of water temperature on growth and sex ratio of juvenile Nile tilapia *Oreochromis niloticus* (Linnaeus) reared in geothermal waters in southern Tunisia. *J. Therm. Biol.* 33:98–105.

Badiola, M., D. Mendiola, and J. Bostock. 2012. Recirculating Aquaculture Systems (RAS) analysis: Main issues on management and future challenges. *Aquac. Eng.* 51:26–

35.

Béné, C., M. Barange, R. Subasinghe, P. Pinstруп-Andersen, G. Merino, G. I. Hemre, and M. Williams. 2015. Feeding 9 billion by 2050 – Putting fish back on the menu. *Food Secur.* 7:261–274.

Boesch, F. Donald, R. H. Burroughs, J. E. Baker, R. P. Rowe, and C. L. Siefert. 2001. *Marine Pollution in the United States.*

Bregnballe, J. 2015. *A Guide to Recirculation Aquaculture.* FAO Eurofish Rep. 100.

Çagiltay, F., N. Erkan, Ş. Ulusoy, A. Selcuk, and Ö. Özden. 2015. Effects of stock density on texture-colour quality and chemical composition of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Iran. J. Fish. Sci.* 14:687–698.

Celik, E. 2012. *Tilapia culture.* 1st Editio. Ås, Norway.

CONAPESCA. 2014. *Anuario Estadístico de Acuicultura y Pesca | Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca | Gobierno | gob.mx.* Available from: <https://www.gob.mx/conapesca/documentos/anuario-estadistico-de-acuicultura-y-pesca>

Conte, F. . 2004. Stress and the welfare of cultured fish. *Appl. Anim. Behav. Sci.* 86:205–223.

Dalsgaard, J., I. Lund, R. Thorarinsdottir, A. Drengstig, K. Arvonen, and P. B. Pedersen. 2013. Farming different species in RAS in Nordic countries: Current status and future perspectives. *Aquac. Eng.* 53:2–13.

Daudpota, A. M., G. Abbas, H. Kalhor, S. A. Shah, S. Ferrando, L. Gallus, I. B. Kalhor, A. Ghaffar, R. Hussain, and M. Hafeez-ur-rehman. 2016. Comparison of Growth, Feed Conversion and Body Composition of Juvenile Hybrid Red Tilapia (*Oreochromis niloticus* × *O. mossambicus*) and Nile Tilapia (*O. niloticus*) Reared in Concret Tanks. *Pak. J. Zool.* 48:809–816.

Desai, A. S., and R. K. Singh. 2009. The effects of water temperature and ration size on growth and body composition of fry of common carp, *Cyprinus carpio*. *J. Therm. Biol.*



34:276–280.

El-Sayed, A.-F. M. 2006. Tilapia culture. (A. F. M. El-Sayed, editor.). CABI, Wallingford.

Ellis, T., S. Scott, N. Bromage, B. North, M. P.-T. News, and U. 2001. 2001. What is stocking density? Citeseer. 35–37.

FAO. 2014. El estado mundial de la pesca y la acuicultura. Fao. 274.

FAO. 2016. El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2016. Contrib. a la Segur. Aliment. y la Nutr. para todos. Roma. 224.

Fitzsimmons, K. 2000. Tilapia aquaculture in Mexico. *Tilapia Aquac. Am.* 2:171–183.

Garcia Trejo, J. F., G. A. Pena Herrejon, G. M. Soto Zarazua, A. Mercado Luna, O. Alatorre Jacome, and E. Rico Garcia. 2016. Effect of stocking density on growth performance and oxygen consumption of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) under greenhouse conditions. *Lat. Am. J. Aquat. Res.* 44:177–183.

Garduño-Lugo, M., I. Granados-Alvarez, M. A. Olvera-Novoa, and G. Muñoz-Córdova. 2003. Comparison of growth, fillet yield and proximate composition between Stirling Nile tilapia (wild type) (*Oreochromis niloticus*, Linnaeus) and red hybrid tilapia (Florida red tilapia x Stirling red *O. niloticus*) males. *Aquac. Res.* 34:1023–1028.

Garduño-Lugo, M., J. R. Herrera-Solís, J. O. Angulo-Guerrero, G. Muñoz-Córdova, and J. De La Cruz-Medina. 2007. Nutrient composition and sensory evaluation of fillets from wild-type Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*, Linnaeus) and a red hybrid (Florida red tilapia x red *O. niloticus*). *Aquac. Res.* 38:1074–1081.

Gullian-Klanian, M., and C. Arámburu-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.* 41:150–162.

Kobayashi, M., S. Msangi, M. Batka, S. Vannuccini, M. M. Dey, and J. L. Anderson. 2015. Fish to 2030: The Role and Opportunity for Aquaculture. *Aquac. Econ. Manag.* 19:282–300.

Lee, N., A. R. Nik-Nurul-Kamila, L. TeckYee, S. ChenLin, S. SiongFong, and J. Grinang. 2017. Acidification tolerance of *Barbonymus schwanenfeldii* (Bleeker, 1854) and *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758) – implication of fish size. *AAAL Bioflux*. 10:746–753.

Martins, C. I. M., E. H. Eding, M. C. J. Verdegem, L. T. N. Heinsbroek, O. Schneider, J. P. Blancheton, E. R. D’Orbcastel, and J. A. J. Verreth. 2010. New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability. *Aquac. Eng.* 43:83–93.

Másílko, J., T. Zajíc, and D. Hlaváč. 2015. The Culture System Affects Organoleptic Properties and Lipid Composition of Common Carp ( *C yprinus Carpio L.*) Meat. *J. Texture Stud.* 46:345–352.

Mirea, C. C., V. Cristea, I. R. Grecu, and L. Dediu. 2013. Influence of Different Water Temperature on Intensive Growth Performance of Nile Tilapia ( *Oreochromis Niloticus* , Linnaeus , 1758 ) in a Recirculating Aquaculture System. *Lucr. Științifice-Seria Zooteh.* 60:227–231.

Mohanty, B. P., A. Mahanty, S. Ganguly, T. Mitra, D. Karunakaran, and R. Anandan. 2017. Nutritional composition of food fishes and their importance in providing food and nutritional security. *Food Chem.* 1–10.

Moniruzzaman, M., K. B. Uddin, S. Basak, Y. Mahmud, M. Zaher, and S. C. Bai. 2015. Effects of Stocking Density on Growth , Body Composition , Yield and Economic Returns of Monosex Tilapia ( *Oreochromis niloticus L .*) under Cage Culture System in Kaptai Lake of Bangladesh. *J. Aquac. Res. Dev.* 6:357.

Muchiri, M. N., J. N. Nanua, and D. Liti. 2015. A comparative study on growth , composition and sensory quality between farmed and wild Nile tilapia ( *Oreochromis niloticus* ). *Net J. Agric. Sci.* 3:56–61.

Murray, F., J. Bostock, and D. Fletcher. 2014. Review of Recirculation Aquaculture System Technologies and their Commercial Application. 44:82.

Nadarajah, S., and O. Flaaten. 2017. Global aquaculture growth and institutional quality. *Mar. Policy*. 84:142–151.

Nunoo, F. K. E., and A. Asase. 2017. Comparative growth performance of *Oreochromis niloticus* ( Linnaeus , 1758 ) in cages at different stocking densities. *Int. J. Fish. Aquat. Stud.* 5:279–283.

Ottinger, M., K. Clauss, and C. Kuenzer. 2016. Aquaculture: Relevance, distribution, impacts and spatial assessments - A review. *Ocean Coast. Manag.* 119:244–266.

Pandit, N. P., and M. Nakamura. 2011. Effect of High Temperature on Survival, Growth and Feed Conversion Ratio of Nile Tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Our Nat.* 8:219–224.

Piedrahita, R. H. 2003. Reducing the potential environmental impact of tank aquaculture effluents through intensification and recirculation. *Aquaculture*. 226:35–44.

Pulido, H. Gutiérrez, and R. de la vara Salazar. 2013. Control Estadístico de Calidad y Seis Sigma.

Rebouças, V. T., F. R. dos S. Lima, D. D. H. Cavalcante, and M. V. do C. e Sá. 2016. Reassessment of the suitable range of water pH for culture of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* L. in eutrophic water. *Acta Sci. Anim. Sci.* 38:361.

SAGARPA. 2011. GUÍA EMPRESARIAL PARA EL CULTIVO, ENGORDA Y COMERCIALIZACIÓN DE LA TILAPIA (MOJARRA).

SAGARPA. 2012. Criterios Técnicos y Económicos para la Producción Sustentable de Tilapia en México Criterios Técnicos y Económicos para la Producción Sustentable. Com. Sist. Prod. Tilapia México AC.

SAGARPA. 2015. Estudio para la determinación de esquemas de mejora para el rendimiento en las granjas de producción acuícola de tilapia.

Samy Yehya El-Zaeem. 2012. Flesh quality differentiation of wild and cultured Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) populations. *African J. Biotechnol.* 11:4086–4089.

Sapkota, A., A. R. Sapkota, M. Kucharski, J. Burke, S. McKenzie, P. Walker, and R.

Lawrence. 2008. Aquaculture practices and potential human health risks: Current knowledge and future priorities. *Environ. Int.* 34:1215–1226.

Timmons, M. B., and J. M. Ebeling. 2010. *Recirculating Aquaculture*. 2nd Editio. Cayuga Aqua Ventures, Ithaca, NY.

Troell, M., N. Kautsky, M. Beveridge, P. Henriksson, J. Primavera, P. Rönnbäck, and C. Folke. 2013. Aquaculture. *Environ. Biol. Fish.* 98:189–201.

Turnbull, J., A. Bell, C. Adams, J. Bron, and F. Huntingford. 2005. Stocking density and welfare of cage farmed Atlantic salmon: Application of a multivariate analysis. *Aquaculture*. 243:121–132.

Verdegem, M. C. J., R. H. Bosma, and J. A. J. Verreth. 2006. Reducing Water Use for Animal Production through Aquaculture. *Int. J. Water Resour. Dev.* 22:101–113.

Workagegn, K. B. 2012. Evaluation of Growth Performance, Feed Utilization Efficiency and Survival Rate of Juvenile Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758) Reared at Different Water Temperature. *Int. J. Aquac.* 2:59–64.

XIE, S., K. ZHENG, J. CHEN, Z. ZHANG, X. ZHU, and Y. YANG. 2011. Effect of water temperature on energy budget of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Aquac. Nutr.* 17:683–690.

Yacout, D. M. M., N. F. Soliman, and M. M. Yacout. 2016. Comparative life cycle assessment (LCA) of Tilapia in two production systems: semi-intensive and intensive. *Int. J. Life Cycle Assess.* 21:806–819.