

EVALUACIÓN DEL PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE SÓLIDOS DE UN SISTEMA ACUAPÓNICO DE TILAPIA ROJA (*Oreochromis sp*) Y LECHUGA (*Lactuca sativa*) CON TRES DIFERENTES SUSTRATOS EN LA GRANJA EXPERIMENTAL BOTANA, MUNICIPIO DE PASTO.

**CARLOS DANILO DUARTE JURADO
ÁNGELA MARÍA GÓMEZ BARCO**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE CIENCIAS PECUARIAS
DEPARTAMENTO DE RECURSOS HIDROBIOLÓGICOS
INGENIERÍA EN PRODUCCIÓN ACUÍCOLA
PASTO, COLOMBIA
2019**

EVALUACIÓN DEL PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE SÓLIDOS DE UN SISTEMA ACUAPÓNICO DE TILAPIA ROJA (*Oreochromis sp*) Y LECHUGA (*Lactuca sativa*) CON TRES DIFERENTES SUSTRATOS EN LA GRANJA EXPERIMENTAL BOTANA, MUNICIPIO DE PASTO.

**CARLOS DANILO DUARTE JURADO
ÁNGELA MARÍA GÓMEZ BARCO**

Informe final de Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero en Producción Acuícola

**Director
ÁLVARO JAVIER BURGOS ARCOS
Zoot. M.sc. Ph.D Biotechnology**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE CIENCIAS PECUARIAS
DEPARTAMENTO DE RECURSOS HIDROBIOLÓGICOS
INGENIERÍA EN PRODUCCIÓN ACUÍCOLA
PASTO, COLOMBIA
2019**

“Las ideas y conclusiones aportadas en esta tesis de grado son responsabilidad exclusiva de su autor”.

Artículo 1° del Acuerdo No. 324 de octubre de 1966, emanado del Honorable consejo directivo de la Universidad de Nariño.

Nota de aceptación:

ÁLVARO JAVIER BURGOS ARCOS
Director

ROBERTO GARCÍA CRIOLLO
Jurado delegado

GLORIA LUCIA CÁRDENAS CALVACHI
Jurado

San Juan de Pasto, Marzo del 2019

AGRADECIMIENTOS

| | |
|--------------------------------|--|
| ÁLVARO BURGOS ARCOS | Zootecnista, M.sc.,Ph.D Acuaculture Biotechnology, Profesor asociado. Facultad de ciencias pecuarias. |
| ROBERTO GARCÍA CRIOLLO | Ingeniero en Producción Acuícola. Docente profesor de la facultad de Ciencias Pecuarias en la Universidad de Nariño. Jurado. |
| GLORIA LUCÍA CÁRDENAS CALVACHI | Ingeniera Química, M.sc., Ingeniería Ambiental, Docente hora catedra de la Universidad de Nariño. Jurado. |
| MARCO ANTONIO IMUÉS FIGUEROA | Asesor de trabajos de grado. Profesor Universidad de Nariño. |
| CAMILO LENNIN ROMERO GUERRERO | Ingeniero en Producción Acuícola. Profesor de la facultad de Ciencias Pecuarias en la Universidad de Nariño, técnico laboratorista |
| LUÍS ALFONSO SOLARTE PORTILLA | Zootecnista. Esp. Secretario Académico de la Facultad de Ciencias Pecuarias de la Universidad de Nariño |
| PIEDAD MEJÍA SANTACRUZ | Secretaria del Departamento de Recursos Hidrobiológicos de la Universidad de Nariño |
| EDWIN GIOVANNY VILLOTA | Técnico de Granjas, Universidad de Nariño |
| ÓSCAR MEJÍA SANTACRUZ | Economista. Auxiliar. Biblioteca General Luís Santander |

DEDICATORIA

“El mejor uso de la vida es dedicarla a algo que la sobreviva”, William James.

Gracias Dios mío por haberme dado la fortaleza de afrontar y finalizar este pequeño reto en mi vida, con este humilde aporte a la acuicultura deseo dedicarles a las dos personas que por encima de todo han hecho lo imposible por sacarnos adelante a mí y mi hermano, nuestros padres RUTH YOLANDA JURADO Y LUIS CARLOS DUARTE, por todo el esfuerzo dado y el cariño, a mi hermano JUAN SEBASTIÁN DUARTE por el apoyo brindado.

A mis dos amados hijos JOSUÉ DANIEL DUARTE ORTIZ Y DIEGO ALEJANDRO DUARTE ORTIZ que son el motor para finalizar cada proyecto y etapa de mi vida, porque el tiempo a su lado es el mejor regalo que he podido tener y me siento muy afortunado de tenerlos.

A cada una de las personas que apoyaron este proyecto siguiendo adelante a pesar de los contratiempos y cada situación que se presentó, Angelita Gómez, Camila Jaramillo, Edwin Ramos.

Además, agradecer el apoyo de Giovana Bucheli por aportar su granito de arena en todo este trabajo.

CARLOS DANILO DUARTE JURADO

DEDICATORIA

En primer lugar, les agradezco a mis padres HUGO GÓMEZ y MARÍA LEONOR BARCO, por ayudarme en esta etapa de mi vida, por darme la fuerza y el coraje de hacer este sueño realidad. Gracias por su cariño, guía, apoyo y por permitirme volar tan lejos.

A mis hermanos JUAN DAVID y JHOANA y mis cuñados gracias por su comprensión, confianza, su amor y apoyo, no tengo palabras para agradecerles todo lo que han hecho por mí, son mi gran ejemplo a seguir. A mi sobrina MARÍA JOSÉ cada día a tu lado es una lección de vida y me siento muy afortunada de tenerte conmigo, te amo.

A mis amigos Danilo Duarte, Edwin Ramos, Geraldine Muñoz y mi gran amiga María Camila Jaramillo, su amistad es muy valiosa para mí, los admiro mucho y estoy muy agradecida por tenerlos en mi vida.

ÁNGELA MARÍA GÓMEZ BARCO

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| INTRODUCCIÓN..... | 19 |
| 1. OBJETIVOS..... | 20 |
| 1.1 OBJETIVO GENERAL..... | 20 |
| 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 20 |
| 2. MARCO TEÓRICO..... | 21 |
| 2.1 ACUICULTURA | 21 |
| 2.2 SISTEMAS DE RECIRCULACIÓN DE AGUA (SRA)..... | 22 |
| 2.3 ACUAPONÍA | 23 |
| 2.3.1 Sistemas Acuapónicos. | 24 |
| 2.4 SUSTRATO | 25 |
| 2.4.1 Turba. | 25 |
| 2.4.2 Cascarilla de Arroz. | 25 |
| 2.4.3 Grava. | 26 |
| 2.5 SÓLIDOS..... | 26 |
| 2.5.1 Sólidos Sedimentables. | 28 |
| 2.5.2 Sólidos Suspendidos. | 28 |
| 2.5.3 Sólidos Disueltos. | 29 |
| 2.6 GENERALIDADES DE LA LECHUGA (<i>Lactuca sativa</i>) | 29 |
| 2.6.1 Clasificación taxonómica. | 30 |
| 2.6.2 Descripción botánica. | 30 |
| 2.7 GENERALIDADES DE LA TILAPIA ROJA (<i>Oreochromis sp</i>) | 30 |
| 2.7.1 Clasificación taxonómica. | 31 |
| 2.7.2 Biología de la tilapia. | 31 |
| 2.7.3 Hábitos alimenticios. | 31 |
| 3. DISEÑO METODOLÓGICO | 33 |
| 3.1 LOCALIZACIÓN | 33 |
| 3.2 PERIODO DE ESTUDIO | 33 |
| 3.3 INSTALACIONES, EQUIPOS, MATERIALES E INSUMOS..... | 33 |
| 3.3.1 Diseño del sistema acuapónico experimental. | 34 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.3.2 | Equipos, materiales e insumos. | 34 |
| 3.3.3 | Material biológico. | 35 |
| 3.4 | PLAN DE MANEJO | 35 |
| 3.4.1 | Adecuación de las instalaciones..... | 35 |
| 3.4.2 | Manejo de los animales. | 36 |
| 3.4.3 | Adecuación de plantas. | 37 |
| 3.4.4 | Control de parámetros físico-químicos. | 37 |
| 3.4.5 | Monitoreo del sistema acuapónico. | 38 |
| 3.5 | CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA HIDRÁULICO | 39 |
| 3.5.1 | Clarificador. | 39 |
| 3.5.2 | Biofiltro. | 40 |
| 3.6 | DISEÑO EXPERIMENTAL | 40 |
| 3.6.1 | Formulación de la Hipótesis | 41 |
| 3.6.2 | Análisis Estadístico. | 41 |
| 3.7 | VARIABLES A EVALUAR..... | 41 |
| 3.7.1 | Eficiencia de remoción de sólidos. | 41 |
| 3.7.2 | Tiempo de retención hidráulica TRH. | 41 |
| 3.7.3 | Incremento de peso..... | 41 |
| 3.7.4 | Factor de Conversión Alimenticia y Eficiencia alimenticia | 41 |
| 3.7.5 | Tasa de crecimiento específico (TCE). | 42 |
| 3.7.6 | Análisis parcial de costos | 42 |
| 4. | RESULTADOS..... | 43 |
| 4.1 | PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS..... | 43 |
| 4.2 | CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS..... | 43 |
| 4.3 | CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS Y EFICIENCIA DE REMOCIÓN | 50 |
| 4.3.1 | Caudales. | 50 |
| 4.3.2 | Tiempo de retención hidráulica (TRH). | 52 |
| 4.3.3 | Eficiencia de remoción de sólidos en el sistema. | 52 |
| 4.4 | VARIABLES PRODUCTIVAS Y EFICIENCIA NUTRICIONAL | 58 |
| 4.4.1 | Incremento Peso y Talla. | 58 |
| 4.4.2 | Tasa de Crecimiento Específico (TCE). | 58 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.4.3 | Factor de Conversión Alimenticia y Eficiencia Alimenticia. | 59 |
| 4.5 | ANÁLISIS PARCIAL DE COSTOS | 59 |
| 5. | DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 61 |
| 5.1 | PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS..... | 61 |
| 5.2 | CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS..... | 62 |
| 5.3 | CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS Y EFICIENCIA DE REMOCIÓN | 63 |
| 5.3.1 | Retención Hidráulica. | 63 |
| 5.3.2 | Remoción de sólidos. | 64 |
| 5.4 | VARIABLES PRODUCTIVAS Y EFICIENCIA NUTRICIONAL | 65 |
| 5.5 | ANÁLISIS PARCIAL DE COSTOS | 66 |
| 6. | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 68 |
| 6.1 | CONCLUSIONES | 68 |
| 6.2 | RECOMENDACIONES..... | 69 |
| | BIBLIOGRAFÍA..... | 70 |
| | ANEXOS | 76 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Granja experimental botana. Universidad de Nariño | 33 |
| Figura 2. Invernadero y sistema acuapónico..... | 34 |
| Figura 3. Sistema acuapónico (sistema de recirculación) y laboratorio de calidad de aguas..... | 36 |
| Figura 4. Muestreo de los animales | 36 |
| Figura 5. Unidades de cultivo de lechuga | 37 |
| Figura 6. Sistema de filtración..... | 39 |
| Figura 7. Clarificador..... | 39 |
| Figura 8. Biofiltro y sumidero | 40 |
| Figura 9. Comportamiento de ST en los tratamientos | 45 |
| Figura 10. Comportamiento de SV en los tratamientos | 45 |
| Figura 11. Comportamiento de SF en los tratamientos | 46 |
| Figura 12. Comportamiento de SS en los tratamientos | 46 |
| Figura 13. Comportamiento de SD en los tratamientos | 47 |
| Figura 14. Concentración de ST a la Salida del TC, CLA y BF | 47 |
| Figura 15. Concentración de SV a la Salida del TC, CLA y BF | 48 |
| Figura 16. Concentración de SF a la Salida del TC, CLA y BF | 48 |
| Figura 17. Concentración de SS a la Salida del TC, CLA y BF | 49 |
| Figura 18. Concentración de SD a la Salida del TC, CLA y BF | 49 |
| Figura 19. Concentración de SSed a la Salida del TC, CLA y BF | 50 |
| Figura 20. Porcentaje de Remoción de ST | 53 |
| Figura 21. Porcentaje de Remoción de SV | 53 |
| Figura 22. Porcentaje de Remoción de SF | 54 |
| Figura 23. Porcentaje de Remoción de SS | 54 |
| Figura 24. Porcentaje de Remoción de SD | 55 |
| Figura 25. Eficiencia de Remoción de ST en CLA y BF | 55 |
| Figura 26. Eficiencia de Remoción de SV en CLA y BF | 56 |
| Figura 27. Eficiencia de Remoción de SF en CLA y BF | 56 |
| Figura 28. Eficiencia de Remoción de SS en CLA y BF | 57 |
| Figura 29. Eficiencia de Remoción de SD en CLA y BF | 57 |
| Figura 30. Eficiencia de Remoción de SSed en CLA y BF | 58 |

LISTA DE CUADROS

| | |
|--|----|
| Cuadro 1. Distribución de los sustratos en las unidades de cultivo | 37 |
| Cuadro 2. Puntos de muestreo para la determinación de sólidos..... | 38 |
| Cuadro 3. Métodos de determinación de Sólidos | 38 |
| Cuadro 4. Valores promedios de los parámetros físico-químicos del sistema acuapónico | 43 |
| Cuadro 5. Concentración promedio de sólidos (mg/L) en las unidades del sistema acuapónico | 44 |
| Cuadro 6. Caudales promedios a la entrada de cada tratamiento en L/minuto | 50 |
| Cuadro 7. Caudales promedios a la salida de cada tratamiento en L/minuto | 51 |
| Cuadro 8. Tiempo de retención hidráulica en los diferentes componentes del sistema | 52 |
| Cuadro 9. Eficiencia de remoción de sólidos (%) en las unidades del sistema acuapónico | 52 |
| Cuadro 10. Variables de peso y talla de Tilapia Roja | 58 |
| Cuadro 11. Tasa de crecimiento específico en los periodos de estudio | 59 |
| Cuadro 12. Factor de conversión alimenticia y eficiencia alimenticia aparente (%) | 59 |
| Cuadro 13. Costos y beneficios parciales de la investigación | 60 |
| Cuadro 14. Relación beneficio costo..... | 60 |

LISTA DE ANEXOS

| | |
|---|-----|
| Anexo A. Diseño del sistema acuapónico experimental..... | 76 |
| Anexo B. Variaciones en el comportamiento de la temperatura (°C) durante el periodo de estudio. | 77 |
| Anexo C. Variaciones en el comportamiento del oxígeno disuelto (OD) durante el periodo de estudio. | 78 |
| Anexo D. Comportamiento por periodo y promedio de la DBO ₅ y la DQO en la unidad de cultivo..... | 80 |
| Anexo E. Datos de las concentraciones y promedios de los sólidos tomados a la salida de cada tratamiento..... | 80 |
| Anexo F. Datos de las concentraciones de los sólidos tomados a la salida de los componentes del sistema acuapónico. | 85 |
| Anexo G. Tabla ANOVA Análisis estadístico de comparación múltiple de varianza para las concentraciones de sólidos totales..... | 86 |
| Anexo H. Tabla ANOVA Análisis estadístico de comparación múltiple de varianza para las concentraciones de sólidos volátiles. | 86 |
| Anexo I. Tabla ANOVA Análisis estadístico de comparación múltiple de varianza para las concentraciones de sólidos fijos..... | 87 |
| Anexo J. Tabla ANOVA Análisis estadístico de comparación múltiple de varianza para las concentraciones de sólidos suspendidos. | 87 |
| Anexo K. Tabla ANOVA Análisis estadístico de comparación múltiple de varianza para las concentraciones de sólidos disueltos. | 88 |
| Anexo L. Datos de la eficiencia de remoción y promedios de sólidos de cada tratamiento..... | 89 |
| Anexo M. Datos de la eficiencia de remoción de sólidos en los componentes del sistema. | 94 |
| Anexo N. Tabla ANOVA Análisis estadístico de comparación múltiple de varianza para la eficiencia de remoción de sólidos totales. | 95 |
| Anexo O. Tabla ANOVA Análisis estadístico de comparación múltiple de varianza para la eficiencia de remoción de sólidos volátiles..... | 96 |
| Anexo P. Tabla ANOVA Análisis estadístico de comparación múltiple de varianza para la eficiencia de remoción de sólidos fijos. | 97 |
| Anexo Q. Tabla ANOVA Análisis estadístico de comparación múltiple de varianza para la eficiencia de remoción de sólidos suspendidos..... | 98 |
| Anexo R. Tabla ANOVA Análisis estadístico de comparación múltiple de varianza para la eficiencia de remoción de sólidos disueltos. | 99 |
| Anexo S. Tabla ANOVA Análisis estadístico de comparación múltiple de varianza para caudales de entrada y salida. | 100 |
| Anexo T. Peso promedio con su desviación estándar de cada muestreo realizado durante el periodo de estudio. | 101 |

| | |
|--|-----|
| Anexo U. Talla promedio con su desviación estándar de cada muestreo realizado durante el periodo de estudio. | 102 |
| Anexo V. Tablas costos del sistema acuapónico | 103 |
| Anexo W. Gráficas relación costos para el sistema acuapónico | 103 |
| Anexo X. Balance de masas. | 105 |

GLOSARIO

ACUAPONÍA: sistema de producción sostenible de plantas y peces que combina la acuicultura tradicional, que es la cría de animales acuáticos como peces, cangrejos de río y camarones; con la hidroponía, cultivo de plantas en agua en un medio ambiente simbiótico.

BIORREMEDIACIÓN: se llama a cualquier proceso que utilice microorganismos, hongos, plantas o las enzimas derivadas de ellos para retornar a un medio ambiente alterado por contaminantes a su condición natural.

BIOSEGURIDAD: la bioseguridad pretende asegurar que el mantenimiento ecológico de tanto plantas como animales sea preservado. Esto engloba hábitats naturales, paisajes, actividades empresariales (en especial la agricultura) y asuntos del estilo de peligros como la guerra bacteriológica o epidemias. Suele conocerse simplemente por el término bioseguridad.

BIOSISTEMA: conjunto de organismos vivos, de componentes orgánicos e inorgánicos, de condiciones físico-químicas, que en un ambiente determinado establecen interacciones energéticas y flujos cíclicos de materiales.

BIOTECNOLOGIA: área multidisciplinaria, que emplea la biología, química y procesos varios, con gran uso en agricultura, farmacia, ciencia de los alimentos, ciencias forestales y medicina.

MINERALIZACIÓN: la mineralización de materia orgánica es el proceso por el cuál la materia orgánica se degrada a través de los microorganismos del suelo y se transforma en CO₂, H₂O y los compuestos minerales básicos.

MULTITRÓFICO: es una práctica en la que los desechos de una especie son reciclados para convertirse en aportes (fertilizantes, alimentos) para otra. La alimentación en acuicultura es combinada con la acuicultura extractiva vegetal (algas) y extractivo animal (mariscos) para crear sistemas balanceados para la sustentabilidad ambiental (biomitigación), estabilidad económica (diversificación de productos y reducción de riesgos) y aceptación social (mejores prácticas administrativas).

RESUMEN

La acuaponía es una solución viable para la integración multitrófica de biosistemas compuestos por peces, plantas y bacterias que encuentran un beneficio mutuo a través de un sistema de recirculación, donde los efluentes del cultivo acuícola brindan algunos nutrientes requeridos por los vegetales y estos a su vez ayudan al mantenimiento de la calidad del agua, brindando un alto nivel de bioseguridad.

El objetivo del estudio fue evaluar el porcentaje de remoción de sólidos en un sistema acuapónico compuesto por tilapia roja (*Oreochromis sp*) y lechuga (*Lactuca sativa*). La investigación se ejecutó durante 60 días en la granja experimental Botana de la universidad de Nariño, se utilizó un sistema acuapónico bajo condiciones de invernadero con un sistema de tratamiento de aguas conformado por un clarificador de 105 litros, un biofiltro de 330 litros y un tanque de succión de 80 litros. Se sembraron 25 ejemplares de tilapia roja con un peso promedio de 134,5 gramos, una densidad de siembra inicial de 7,47 kg/m³ y final de 11,77 kg/m³, alimentando al 2% de la biomasa con un concentrado comercial del 32% de proteína; para el componente agrícola se sembraron 144 plántulas de lechuga con 15 días de germinación en los 12 tubos NFT (nutrient film technique). Se evaluaron cuatro tratamientos, cada uno con tres réplicas utilizando tres tipos de sustrato, el T₀ sin sustrato, T₁ con turba, T₂ con grava y T₃ con cascarilla de arroz. Se registraron parámetros como el pH, oxígeno disuelto y temperatura, de igual modo se determinó la concentración de sólidos.

Los resultados obtenidos y el análisis de variancia ($p < 0,05$) determinaron que no existió diferencias significativas entre los sólidos en los diferentes tratamientos. En cuanto a concentraciones para sólidos totales (ST) se tuvo valores en un rango de 100 a 340 mg/L, sólidos volátiles (SV) de 30 a 14 mg/L, sólidos fijos (SF) de 30 a 200 mg/L, sólidos suspendidos (SS) de 0 a 48 mg/L y sólidos disueltos (SD) de 30 a 270 mg/L. Para la eficiencia de remoción se obtuvieron valores generales del sistema acuapónico para ST de $20,94 \pm 28,51$ %, SV de $17,92 \pm 35,68$ %, SF de $14,98 \pm 15,63$ %, SS de $56,40 \pm 82,25$ %, SD de $12,23 \pm 35,10$ % y sólidos sedimentables (Ssed) de $100 \pm 0,00$ %, cuyos valores permitieron establecer un funcionamiento adecuado del cultivo de tilapia roja y lechuga.

En el componente hidráulico se manejó un caudal promedio de 1,39 L/minuto, alcanzando un tiempo de retención hidráulica (TRH) para el tanque de cultivo de 26,98 minutos, el clarificador de 6 minutos, biofiltro de 11,45 minutos y en los tubos NFT de 13,67 minutos.

Los parámetros productivos y físico-químicos estuvieron acordes a los rangos requeridos por las especies para su crecimiento óptimo, obteniendo un promedio para pH de $7,54 \pm 0,05$, temperatura $26,20 \pm 0,65$ °C, oxígeno disuelto $3,80 \pm 0,20$ mg/L; los animales terminaron con un peso promedio de 211,92 gr, un factor de conversión alimenticia (FCA) del 2,4 y una eficiencia alimenticia (EA) del 42%. El

análisis parcial de costos indica que en el tiempo de estudio se encuentra un equilibrio, teniendo una relación de beneficio costo cerca al 1.

Con la investigación se puede concluir que el sistema acuapónico demuestra que es una tecnología alternativa viable para el ahorro del recurso hídrico en la producción de alimento de calidad y alto valor nutritivo, además es viable para el mantenimiento de organismos acuáticos y plantas.

ABSTRACT

Aquaponics is a viable solution for the multitrophic integration of biosystems composed of "fish, plants and bacteria" that find a mutual benefit through a recirculation system, where the effluents from the aquaculture provide nutrients required by the plants and these in turn, they help maintain water quality, providing a high level of biosecurity.

The objective of the study was to evaluate the percentage of solids removal in an aquaponic system composed of red tilapia (*Oreochromis sp*) and lettuce (*Lactuca sativa*). The research was carried out for 60 days in the experimental farm Botana of the University of Nariño, an aquaponic system was used under greenhouse conditions with a water treatment system consisting of a clarifier of 105 liters, a biofilter of 330 liters and a tank Suction of 80 liters. It planted 25 specimens of red tilapia with an average weight of 134.5 grams, an initial seeding density of 7.47 kg / m³ and final of 11.77 kg / m³, feeding 2% of the biomass with a commercial concentrate 32% protein; For the agricultural component, 144 lettuce seedlings were planted with 15 days of germination in the 12 NFT tubes (nutrient film technique). Four treatments were evaluated, each with three réplicates using three types of substrate, the T0 without substrate, T1 with peat, T2 with gravel and T3 with rice husk. Parameters such as pH, dissolved oxygen and temperature were recorded, and the concentration of solids was determined in the same way.

The results obtained and the analysis of variance ($p < 0.05$) determined that there were no significant differences between the solids in the different treatments. In terms of concentrations for total solids (ST) values were in a range of 100 to 340 mg / L, volatile solids (SV) of 30 to 14 mg / L, fixed solids (SF) of 30 to 200 mg / L, suspended solids (SS) from 0 to 48 mg / L and dissolved solids (SD) from 30 to 270 mg / L. For the removal efficiency, general values of the aquaponic system for ST were obtained of $20.94 \pm 28.51\%$, SV of $17.92 \pm 35.68\%$, SF of $14.98 \pm 15.63\%$, SS of $56, 40 \pm 82.25\%$, SD of $12.23 \pm 35.10\%$ and sedimentable solids (Ssed) of $100 \pm 0.00\%$, whose values allowed to establish an adequate operation of the culture of red tilapia and lettuce.

In the hydraulic component, an average flow of 1.39 L / minute was handled, reaching a hydraulic retention time (TRH) for the culture tank of 26.98 minutes, the clarifier of 6 minutes, biofilter of 11.45 minutes and in the NFT tubes of 13.67 minutes.

The productive and physical-chemical parameters were in accordance with the ranges required by the species for their optimal growth, obtaining an average for pH of 7.54 ± 0.05 , temperature 26.20 ± 0.65 ° C, dissolved oxygen 3, 80 ± 0.20 mg / L; the animals finished with an average weight of 211.92 gr, a feed conversion factor (FCA) of 2.4 and an alimentary efficiency (EA) of 42%.

The partial cost analysis tells us that in the study time there is a balance, having a cost benefit ratio close to 1.

With the investigation it can be concluded that the aquaponic system demonstrates that it is a viable alternative technology for the saving of water resources in the production of quality food and high nutritional value, it is also viable for the maintenance of aquatic organisms and plants.

INTRODUCCIÓN

La organización de las naciones unidas para la alimentación (FAO)¹ presenta a la acuicultura como una fuente de producción alimenticia, la cual ha incrementado en los últimos años. Sin embargo, este crecimiento tan acelerado del sector ha desencadenado una fuerte competencia por estos recursos y un incremento en el impacto ambiental².

En este sentido es oportuno resaltar que los sistemas acuapónicos corresponden a una rama biotecnológica especializada de la producción acuícola que combina la hidroponía y los cultivos acuícolas para producir simultáneamente peces y plantas, donde los efluentes de los primeros brindan los nutrientes requeridos por los vegetales y estos a su vez ayudan al mantenimiento de la calidad del agua, combinando un alto nivel de bioseguridad con un bajo riesgo de contaminación externa y enfermedad, sin necesidad de fertilizantes y plaguicidas³.

Esta biotecnología sirve para una producción sostenible de alimentos, de acuerdo con los principios de reutilización de aguas residuales, la integración de sistemas acuícola-agrícola en un policultivo incrementan la diversidad, producción final y la posibilidad de obtener productos “más sanos” con importantes impactos socioeconómicos a nivel local⁴, procurando disminuir la presión de pesca en los mares y ríos.

Con base en lo anterior, la presente investigación evaluó el porcentaje de remoción de sólidos en un sistema acuapónico en condiciones de invernadero, para el cultivo de tilapia roja (*Oreochromis sp*) integrando la producción de hortalizas y monitoreando el desarrollo fisiológico de las especies en estudio.

¹ ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN (FAO). El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2016. Roma. p. 224

² DEDIU, Lorena; CRISTEA, Víctor; DOCAN, Angélica y VASILEAN, Ion. Evaluation of condition and technological performance of hybrid bester reared in standrad and aquaponic system. En: AACL Bioflux. Vol. 4, No 4 (2011); p490-498.

³ FAO. Op. cit., p. 224

⁴ MUÑOZ, Mario. Sistemas de recirculación acuapónicos. En: Informador Técnico (Colombia) Edición 76, (Ene - Dic 2012); p. 123 – 129.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el porcentaje de remoción de sólidos de un sistema acuapónico de tilapia roja (*Oreochromis sp*) y lechuga (*Lactuca sativa*) con tres diferentes sustratos en la granja experimental Botana, Municipio de Pasto.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar las concentraciones (Sólidos totales, sólidos fijos y volátiles totales, sólidos suspendidos o no filtrables totales, sólidos disueltos o filtrables totales, sólidos sedimentables), en los diferentes componentes del sistema.
- Determinar las características hidráulicas y su eficiencia de remoción en los diferentes componentes del sistema acuapónico
- Determinar la eficiencia nutricional del alimento suministrado a tilapias bajo condiciones de invernadero en el sistema acuapónico.
- Realizar un análisis parcial de costos del sistema acuapónico, enfocado a la producción.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 ACUICULTURA

La autoridad nacional de acuicultura y pesca (AUNAP), define la acuicultura como “El cultivo de organismos acuáticos, incluyendo peces, moluscos, crustáceos y plantas acuáticas, que implica la intervención del hombre en el proceso de cría para aumentar la producción, en operaciones como la siembra, la alimentación, la protección de los depredadores, etc. La actividad de cultivo también presupone que los individuos o asociaciones que la ejercen son propietarios de la población bajo cultivo”⁵.

La acuicultura debe enmarcarse en criterios de desarrollo sostenible, definido por la FAO como “El manejo y la conservación de la base de recursos naturales y la orientación del cambio tecnológico e institucional, de tal manera que se asegure la continua satisfacción de las necesidades humanas para las generaciones presentes y futuras”⁶. Este desarrollo sostenible (en los sectores agrícola, forestal y pesquero) conserva la tierra, el agua y los recursos genéticos vegetales y animales, no degrada el medio ambiente y es técnicamente apropiado, económicamente viable y socialmente aceptable.

La producción acuícola mundial de peces comestibles aumentó a una tasa media anual del 6,2 % en el período de 2000 a 2012, lo que supuso un ritmo menor que en los períodos de 1980-1990 (10,8 %) y 1990-2000 (9,5 %). Entre 1980 y 2012, el volumen de la producción acuícola mundial se incrementó a una tasa media anual del 8,6 %. La producción acuícola mundial de peces comestibles se duplicó con creces de 32,4 millones de toneladas en 2000 a 66,6 millones de toneladas en 2012⁷.

La producción de la piscicultura en Colombia durante los últimos diez años presentó un crecimiento sostenido del orden del 10,69%, al pasar de 39.774 toneladas en 2004 a 97.227 toneladas en 2014; la producción de Camarón de Cultivo durante el mismo período presentó un comportamiento decreciente de -15,46% al pasar de 18.040 toneladas en 2004 a 3.269 en 2014⁸.

La producción de la acuicultura nacional en el 2011 fue de 82.733 toneladas, de las cuales más de la mitad correspondió a las tilapias roja y plateada, casi un 20% a las

⁵ Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca (AUNAP). Plan Nacional para el Desarrollo de la Acuicultura Sostenible en Colombia – PlaNDAS. Bogotá D.C, 2014, p 7

⁶ FAO. Op. cit., p. 8-9

⁷ Ibid., p 21

⁸ FEDEACUA. Producción de la acuicultura colombiana 2004 – 2014.

cachamas blanca y negra, cerca de un 7% a trucha, 10% a camarón, un poco más del 0,13% a Cobia y el resto a otras especies nativas y exóticas⁹.

2.2 SISTEMAS DE RECIRCULACIÓN DE AGUA (SRA)

El sistema de recirculación para la acuicultura (SRA) es la tecnología que permite el cultivo de peces a mayor intensidad, además de ser un ambiente totalmente controlado¹⁰.

La producción en SRA es una alternativa al cultivo de organismos acuáticos, por medio de la reutilización del agua previamente tratado de manera física, química y biológica, se utiliza menos del 10% del agua requerida que en una producción convencional por estanque para producir rendimientos similares. Por ello cuando estos sistemas son bien diseñados proporcionan un ambiente adecuado para promover el crecimiento de los cultivos acuáticos, parámetros que incluyen concentraciones de oxígeno disuelto, nitrógeno amoniacal, nitritos, dióxido de carbono, temperatura, pH y los niveles de alcalinidad en el sistema¹¹.

Para Bijo¹² los sistemas SRA han obtenido mayor atención debido a las ventajas que presentan. Entre ellas la reducción de recursos tales como la tierra y el agua, el control de variables, la permisión de crecimiento de peces a lo largo de todo el año y la determinación precisa de biomasa de los peces. Según Ontiveros¹³, la configuración general de un sistema RAS consiste en un medio de suministro de agua, filtración mecánica y biológica, bombas, tanques de cultivo, dispositivos e aireación y otros componentes adicionales que cumple con la función de brindarle calidad al agua.

Esta técnica se usa para asegurar una mayor y estable producción acuícola, con menos enfermedades y mejores formas para controlar los parámetros que influyen en el crecimiento¹⁴. Se considera una manera respetuosa frente al medio ambiente, mediante la producción de pescado garantizando una viable comercialización. Los

⁹ AUNAP. Diagnóstico del estado de la acuicultura en Colombia. Bogotá; editorial 2013. p 135

¹⁰ TIMMONS, M.B., EBELING, J.M., WHEATON, F.W., SUMMERFELT, S.T. y VINVI, B.J. (eds.). Sistemas de Recirculación para la Acuicultura. Fundación Chile: Quebecor World Chile S.A, 2002. p. 6-7.

¹¹ JIMÉNEZ, Alberto. Sistemas de recirculación en acuicultura. una visión y retos diversos para Latinoamérica. Disponible en Internet:

http://www.industriaacuicola.com/PDFs/Sistemas_de_recirculacion.pdf

¹² BIJO, Pada. Feasibility study of a recirculation aquaculture system. En: Reykjavik, Iceland. (2007); p. 10-13

¹³ ONTIVEROS, Martha. Sistema de Producción Acuapónicos de Traspatio. México, 2013; p. 86. Trabajo de Grado (Licenciada en Diseño Industrial). Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería.

¹⁴ BREGNBALLE, Jacob. A Guide to Recirculation Aquaculture: An introduction to the new environmentally friendly and highly productive closed fish farming systems. FAO; Eurofish International Organization. 2015. p 100. Disponible en internet: <http://www.fao.org/3/a-i4626e.pdf>

nutrientes de los peces cultivados pueden ser utilizados como fertilizantes en tierras agrícolas o como base para la producción de biogás.

Timmons¹⁵, afirma que para el buen funcionamiento de los SRA, se cuenta con cinco principales operaciones en el sistema de tratamientos, como se nombra a continuación:

- Remoción de sólidos: consiste en remover los desechos producidos en los sistemas tales como las heces y el alimento no consumido.
- Biofiltración: controla los compuestos nitrogenados producto del metabolismo de los organismos
- Aireación u oxigenación: adicionar aire u oxígeno al agua
- Desgasificación: proceso de eliminación del dióxido de carbono acumulado en el sistema
- Circulación del agua

Para Bregnballe¹⁶ el SRA tiene como ventajas la economía en el empleo de espacio y agua, la posibilidad de controlar mejor la calidad del agua, viabilidad de una mayor tasa de siembra, y una más alta tasa de producción.

2.3 ACUAPONÍA

Para Ramírez¹⁷, la acuaponía es el sistema que combina Acuicultura (cultivo de peces) e Hidroponía (cultivo de plantas en soluciones acuosas), con la aplicación de los sistemas acuapónicos, surge como una solución para producir alimentos sin afectar sistemas como los cuerpos de agua y sin deteriorar el suelo. Para otros autores es la integración agro-acuícola da la posibilidad de hacer un mejor uso de la energía y los recursos naturales, ya que el uso de los desechos producidos en el sistema acuícola puede utilizarse como entrada al sistema agrícola, permitiendo mejorar la productividad y abatir costos¹⁸.

Según la FAO¹⁹, la acuaponía es un método que se encuentra en vías de crecimiento, divulgación y desarrollo, y son cada vez más los países que lo están implementando gracias a la optimización del recurso hídrico que se logra, ya que al ser un sistema de recirculación de agua, el gasto de ésta se reduce solamente a las

¹⁵TIMMONS et al., Op. cit.,p. 7

¹⁶ BREGNBALLE. Op. cit., p. 4

¹⁷ RAMÍREZ, Diego; SABOGAL, Daniel; JIMÉNEZ, Pedro y HURTADO, Hernán. La acuaponía: una alternativa orientada al desarrollo sostenible. En: Revista Facultad de Ciencias Básicas Universidad militar Nueva Granada. 2008. vol 4, no. 51, p 32-51.

¹⁸ PEÑUELAS, Ofelda; ARELLANO, Maritza; MUNGARRO, Catalina; GÓMEZ, Gilberto y VERDUGO, Edgar. Sistemas integrados agro-acuícolas para la producción de tomate: experiencias del cuerpo académico de Biotecnología Agrícola. En Pizá, R., González, M. y Beristáin, J. (Comp.). Avances de Investigación de Cuerpos Académicos. México: ITSON. 2013. p. 9-20.

¹⁹ FAO. El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2012. Roma. p 231.

perdidas por evaporación y lo que es absorbido por las plantas, por ello, resulta más ecológico.

Este sistema de cultivo ha sido ampliamente explotado a nivel comercial y casero alrededor del mundo debido a sus ventajas, ya que reduce el consumo del agua en los cultivos a través del SRA, genera una mayor sanidad para las plantas, representa un ahorro en el proceso productivo gracias a los nutrientes que son producidos por los peces²⁰. La acuaponía representa no solo una fuente completa de alimentos de alta calidad, sino también una oportunidad para mejorar las condiciones socioeconómicas del ser humano, contribuyendo a la vez con la seguridad alimentaria.

Para Nelson²¹ un sistema acuapónico consta de elementos como: tanque para peces (otros organismos acuáticos), clarificador (filtro de sólidos), biofiltro, cama(s) de crecimiento para plantas, sistemas de bombeo de agua y sistemas de aireación. Estos elementos se conectan de tal forma que el agua rica en nutrientes pasa del tanque de peces al clarificador, donde se eliminan la mayor parte de partículas disueltas, tanto grandes como pequeñas²². Después de pasar por el clarificador el flujo sigue al biofiltro, el cual tiene una gran superficie que le permite alojar una gran cantidad de bacterias que convierten el amonio en nitrito, y otras que convierten el nitrito en nitrato²³. Luego el líquido pasa a las camas de crecimiento que pueden tener grava o ser camas flotantes. El agua puede ser enviada directamente de regreso al tanque de peces, o pasar primero por un filtro que colecta el agua proveniente de todas las camas de crecimiento, para luego ser llevada nuevamente al tanque de peces y reiniciar el ciclo²⁴.

2.3.1 Sistemas Acuapónicos. Principalmente se utilizan tres tipos de sistemas de crecimiento para las plantas, los mismos que son utilizados en hidroponía: camas con sustrato sólido, sistemas de raíz flotante y técnicas de solución nutritiva recirculante²⁵.

- **NFT (nutrient film technique)** Es la técnica hidropónica donde una corriente de agua de poca profundidad, que contiene todos los nutrientes disueltos

²⁰ COLAGROSSO, Alessandro. Instalación y manejo de sistemas de cultivo acuapónicos a pequeña escala. Costa Rica: Prima edizione digitale, 2014. p 1-51

²¹ NELSON, RL. Acuaponía. Nelson/Pade Multimedia. Monti-Ilo, WI. USA. 2007

²² LENNARD, Wilson. y LEONARD Brian. A comparison of three different hydroponic sub-systems (gravel bed, floating and nutrient film technique) in an aquaponics test system. En: Aquaculture International. 2006. vol. 14, p. 539–550

²³ RAKOCY, James; MASSER, Michael y LOSORDO, Thomas. Recirculating aquaculture tank production systems: aquaponics – integrating fish and plant culture. En: SRAC Publication No 454. 2006. p 1-15

²⁴ Ibid., p 13.

²⁵ RAMIREZ et al., Op. cit., p. 32-51.

requeridos para el crecimiento vegetal, las raíces de las plantas están expuestas a un suministro adecuado de agua en recirculación con oxígeno²⁶.

- **Camas con sustrato sólido** Son contenedores llenos de un sustrato inerte que sirve de sostén a las plantas. Son utilizados para todo tipo de plantas, pero en especial, son muy útiles para aquellas plantas que necesitan buen sostén por su peso o bien, son empleados en condiciones climáticas adversas²⁷.
- **Sistema de raíz flotante** Se caracterizan por no necesitar reservorio de agua aparte de la zona de cultivo, constituyendo por si misma el reservorio. Flotando sobre esta, se coloca una plancha de icopor o similar de espesor adecuado (4-5 cm), en la que se efectúan perforaciones donde se colocan las plantas, sostenidas por vasos plásticos ranurados. De esta forma, las raíces quedan inmersas en la solución nutritiva²⁸.

2.4 SUSTRATO

Para Calderón²⁹, el sustrato es un medio sólido inerte, que tiene una doble función: la primera, anclar y aferrar las raíces protegiéndolas de la luz y permitiéndoles la respiración y la segunda, contener el agua y los nutrientes que las plantas necesitan. El sustrato hidropónico debe reunir un conjunto de características que lo hagan apto para el cultivo.

Un cultivo hidropónico debe tener una serie de aspectos los cuales retengan la humedad, permitan una buena aireación, debe tener una buena estabilidad física, química y biológicamente debe ser inerte junto a un buen drenaje y capilaridad, principalmente tiene que ser liviano con costo bajos³⁰.

2.4.1 Turba. Es un material importado a Colombia procedente por lo general de Canadá, es un excelente sustrato, por su buena capacidad de retención de humedad y disminuye el riesgo de propagación de plagas. Este sustrato viene completamente elaborado y no requiere de ningún proceso para ser utilizado, ofrece excelentes condiciones para el cultivo sin suelo³¹.

2.4.2 Cascarella de Arroz. Sustrato orgánico de baja tasa de descomposición, dado a su alto contenido de sílice. Es el sustrato más empleado para los cultivos hidropónicos en Colombia ya que es un material liviano, de buen drenaje, buena aireación, presenta una baja retención de humedad inicial y es difícil conservar la

²⁶ RAMIREZ et al., Op. cit., p 32-51

²⁷ Ibid., p. 40

²⁸ Ibid., p. 42.

²⁹ CALDERÓN, Felipe. y CEVALLOS, Francisco. Los sustratos. Bogotá: Calderón Laboratorios Ltda; 2002. p. 20.

³⁰ BELTRANO, José y GIMENEZ, Daniel. Cultivo en hidroponía. En: edulp, 2015. p. 2-181.

³¹ BELTRANO y GIMENEZ. Op. cit., p 84.

humedad homogéneamente cuando se usa como sustrato único en camas o bancadas³².

La principal función de este en el cultivo es favorecer la oxigenación del sustrato³³. Cuando se utiliza debe mantenerse un proceso de desinfección química o anaeróbico, con el fin de eliminar partículas pequeñas, como hongos o larvas de insectos.

Autores como Beltrano³⁴ mencionan que antes de utilizar este material, debe ser humedecido durante varias semanas para evitar la germinación de algunas semillas que ocasionen el uso de mano de obra después del funcionamiento del sistema ya que este tipo de hierba debe ser arrancado a mano.

2.4.3 Grava. Pequeños trozos de rocas trituradas artificialmente o encontradas en estado natural en los lechos de los ríos o en canteras en tamaños que van desde 1 a 2 mm o 5 a 25 mm.

Son buenos materiales para la hidroponía, su capilaridad es baja por lo que no presentan buena distribución horizontal, tienen magnifico drenaje, por lo que se pueden utilizar para cultivos en canaletas. Por lo afilado e irregular de las partículas, pueden presentar problemas a los cultivos de bulbos o raíces y a los tallos de las plantas³⁵.

2.5 SÓLIDOS

Las actividades ejercidas por el hombre como la acuicultura producen efectos negativos en la biota acuática como la intensificación de la acuicultura ha provocado un incremento en la concentración de nutrientes, conduciendo al aumento de la materia orgánica en inorgánica, igualmente de sólidos disueltos, e hipernitrificación de los cuerpos hídricos, esto promueve la introducción de otros residuos como sustancias químicas y los antibióticos que pueden contaminar el ambiente³⁶.

Los peces generan grandes cantidades de materia fecal, por lo que la mayor parte del cual debe ser eliminado del flujo de agua antes de llegar a los estanques

³² Ibid., p 18.

³³ Ibid., p 18-19.

³⁴ Ibid., p 18-19.

³⁵ SORIA, José. 6° Curso de hidroponía básica para principiantes. Hidroponía y acuarística del caribe 2012. Disponible en Internet:

http://www.asohofrucol.com.co/archivos/biblioteca/biblioteca_247_Curso%20Hidropon%C3%ADa%20Basica.pdf

³⁶ MAIGUAL, Yemall; SÁNCHEZ, Iván y MATSUMOTO, Tsunao. Desempeño de tanques decantadores de sólidos en un sistema de recirculación para producción de tilapia. En: Revista Mvz Córdoba. 2013. vol. 18(2). pag. 3492-3500.

hidropónicos. Otra de las fuentes de desechos participados son el alimento no ingerido y organismos como bacterias, hongos y algas que crecen en el sistema, la concentración de oxígeno disuelto es reducido cuando esta materia se descompone y libera grandes cantidades de dióxido de carbono y amoníaco, llegando a acumularse y descomponiéndose anaeróbicamente produciendo metano y ácido sulfhídrico que son muy tóxicos en concentraciones menores a 1 mg/L³⁷.

Los desechos producidos por las operaciones acuícolas incluyen principalmente compuestos disueltos y sólidos suspendidos. Actualmente, se considera que el tratamiento biológico es un método eficaz para convertir amoníaco en aguas residuales en nitratos con el fin de reutilizar el agua en los sistemas de recirculación. Sin embargo, la eliminación de otros contaminantes, especialmente los sólidos en suspensión, de las aguas residuales sigue siendo un gran desafío. La acumulación de sólidos conduce al deterioro de la calidad del agua del cultivo, lo que aumenta la tensión sobre los organismos de cultivo. Las tecnologías de asentamiento y filtración mecánica han sido ampliamente utilizadas para separar los sólidos de las rutas principales de reciclado de agua que proporcionan pretratamiento antes de que las aguas residuales entren en el filtro biológico. El lavado periódico y la descarga de efluentes se emplean generalmente para transportar sólidos concentrados lejos de los sistemas. Estos sólidos y/o algunos nutrientes disueltos en los efluentes tienen que tratarse adicionalmente antes de que se descarguen al medio ambiente.

Todos los desechos (excepto los gases), contribuyen a la formación de residuos sólidos. Dichos sólidos están compuestos por material orgánico e inorgánico. Su remoción es sumamente importante, pues pueden bloquear las cañerías del sistema, las bombas y el equipo de filtrado. Por otra parte, estos desechos son los que se descomponen y consumen el oxígeno del agua, produciendo amoníaco y ejerciendo, además, una actividad oxidativa sobre los filtros biológicos. Se estima que un 70% del amoníaco de los desechos de los peces está asociado con los sólidos orgánicos. Los desechos de los peces son diferentes en sus características a los desechos domésticos y a los industriales, y también difieren según la especie de pez que se esté cultivando (no es lo mismo desechos provenientes de los bagres que los de la tilapia, por ejemplo). Según su fisiología, la producción de heces en las distintas especies es diferente y contienen material digerido y no digerido, acompañado de una cantidad de mucus de diferente constitución que variará según la especie. La materia fecal es más densa que el agua y se deposita en los fondos, pero las pequeñas partículas a menudo flotan³⁸.

La remoción de sólidos separados de manera rápida y oportuna facilita el tratamiento complementario posterior de las aguas residuales; por ello la remoción

³⁷ TIMMONS et al., Op. cit., p. 627

³⁸ SAGPyA. Los sistemas cerrados de recirculación en piscicultura, 2006. Disponible en Internet: http://www.produccion-animal.com.ar/produccion_peces/piscicultura/36-sistemas_cerrados_de_recirculacion.pdf

de partículas de concentrado no consumido, heces y flocs de los biorreactores en un SRA, constituyen el proceso unitario más relevante. Lo anterior es importante en este sistema debido a que el agua se recircula por bombeo. Según Maigual et al.³⁹, evaluaron los efectos del bombeo en el tamaño de las partículas presentes en el agua de un SRA y sus resultados mostraron que la bomba quiebra las partículas de mayor tamaño y genera partículas con tamaños moderadamente menores cuya remoción resulta más difícil y costosa.

Según Timmons et al. “la producción de sólidos sedimentables en una SRA se encuentra en función de la cantidad de alimento suministrado (con base en materia seca), generalmente oscilando entre un 20% y 40%; sin embargo, un valor recomendado para efectos de diseño y control de sistemas de recirculación es asumir un 25%”⁴⁰.

Para Maigual et al.,⁴¹ la remoción de sólidos en las unidades de cultivo, es muy común en acuacultura el uso de tanques circulares (clarificadores) con entrada tangencial del agua y salida localizada en el fondo ya que permiten obtener patrones de flujo más estables. Esto permite una distribución más homogénea del oxígeno disuelto y mejores condiciones de auto limpieza, gracias a las características de flujo rotacional.

Se dividen en sólidos sedimentables, sólidos suspendidos y sólidos finos.⁴²

2.5.1 Sólidos Sedimentables. Son generalmente los más fáciles de remover de las tres categorías y debe ser eliminado en el tanque de cultivo con la mayor rapidez como sea posible. Esto se logra fácilmente dando pendiente suave a un desagüe central, con un modelo de flujo circular o efecto de taza de té. Los sólidos sedimentables se deben quitar desde el centro del tanque en una forma continua o por lo menos todos los días. Otra alternativa externa, al tanque de cultivo, es usar un componente que se conoce como hidrociclón o remolino de separación. En este diseño los sólidos del agua y las partículas entran al separador de manera tangencial, la creación de un flujo circular o remolino patrón en un tanque de forma cónica. Los sedimentables se clasifican como los que tienen partículas de un diámetro de 10-20 mm y más grandes.

2.5.2 Sólidos Suspendidos. Los sólidos suspendidos son transportados gracias a la acción de arrastre y soporte del movimiento del agua⁴³, desde un punto de vista

³⁹ MAIGUAL, et al. Op. cit. p. 3492-3500.

⁴⁰ TIMMONS. Op. cit., p. 627

⁴¹ Ibid., p. 3492-3500

⁴² JIMENEZ. Op. cit., p. 1-5.

⁴³ IDEAM. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial – República de Colombia, Sólidos suspendidos totales en agua secados a 103 – 105 °C. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/S%C3%B3lidos+Totales+secados+a+103+-+105%C2%BAC..pdf/d4faab4a-34e4-4159-bf4c-50353b101935>

de Ingeniería la diferencia entre sólidos suspendidos y sólidos sedimentables es netamente práctico, los sólidos suspendidos no están dentro de la columna de agua mientras que los sedimentables sí. Para remover estos tipos de sólidos se usa la filtración mecánica que incluye la Filtración por Pantalla y los filtros de medio granular expandible. Los sólidos suspendidos no sedimentan en una hora y por tanto no pueden ser retirados por métodos convencionales de gravedad.

2.5.3 Sólidos Disueltos. Muchos de los sólidos finos se acumulan dentro del cultivo intensivo y no pueden ser removidos por los sistemas anteriormente mencionados. Para remover los sólidos finos se utiliza el fraccionador de espuma o Skimmer (siglas en Ingles) es un proceso que se refiere como el aire- stripping o espumado de proteína, se emplea a menudo para eliminar y controlar la acumulación de estos sólidos.

Las partículas coloidales poseen diámetros entre 10^{-3} y 10^{-6} mm, que incluyen partículas de arcilla, algunos virus y bacterias no especificadas. Las partículas disueltas poseen diámetros menores de 10^{-6} mm y consisten en iones orgánicos e inorgánicos y moléculas que se encuentran presentes en la solución. Se incluyen en ellas metales como el cobre, hierro, aluminio o zinc; así como iones de amoníaco, nitritos y nitratos. Las partículas disueltas y las coloidales son demasiado pequeñas para sedimentar por gravedad y normalmente requieren métodos más avanzados para su remoción⁴⁴.

2.6 GENERALIDADES DE LA LECHUGA (*Lactuca sativa*)

Según Fajardo⁴⁵ es un cultivo que se conoce desde hace mucho tiempo, siendo uno de las plantas de cultivo más antiguas existiendo referencias en el 4500 A.C. Es una hortaliza típica de ensaladas, considerada como una planta con propiedades tranquilizantes. Tiene un alto contenido en vitaminas, lo que la hace que forme parte de muchas dietas⁴⁶. Según Ramírez⁴⁷, el cultivo de la lechuga posee características que facilitan su cultivo bajo los sistemas acuapónicos, ya que es una planta que tiene un ciclo de producción relativamente corto, utiliza cantidades de nitrato considerables ya que su interés comercial está enfocado en la producción de follaje, y es una planta que se habitúa muy bien bajo las condiciones ambientales.

⁴⁴ SAGPyA. Op. cit., 1-7

⁴⁵ FAJARDO, Sergio. Modelo tecnológico para el cultivo de lechuga bajo buenas prácticas agrícolas en el oriente antioqueño, Medellín, Colombia; Fotomontajes S.A.S, 2016. p 11-24.

⁴⁶ Ibid., p 12. Disponible en internet: <http://conectarural.org/sitio/sites/default/files/documentos/MANUAL%20DEL%20CULTIVO%20DE%20LA%20LECHUGA.pdf>

⁴⁷ RAMÍREZ. Diego; SABOGAL. Daniel; GOMEZ. Edwin; RODRÍGUEZ. Daniel y HURTADO. Hernán. Montaje y evaluación preliminar de un sistema acuapónico goldfish – lechuga. 2009. p 154-170

2.6.1 Clasificación taxonómica. Según Conabio⁴⁸

REINO: *Plantae*
DIVISIÓN: Magnoliophyta
CLASE: Magnoliopsida
ORDEN: Asterales
FAMILIA: *Asteraceae*
GÉNERO: *Lactuca L., 1753*
ESPECIE: *sativa L., 1753*

2.6.2 Descripción botánica. La lechuga es una planta herbácea anual, dicotiledónea, autógama⁴⁹. La lechuga comercial es una planta anual, de cabeza paniculada y flor amarilla.

El ovario es unicelular y su único óvulo madura en semilla⁵⁰. Dependiendo del tipo de hoja, se presentan dos variedades botánicas: las lechugas de hoja suelta y las lechugas de cabeza. El tipo de hoja suelta corresponde a la variedad botánica Crispa y el tipo de cabeza a la variedad Capitata.

2.7 GENERALIDADES DE LA TILAPIA ROJA (*Oreochromis sp*)

Según Pineda⁵¹, las tilapias son peces originarios del continente africano y cercano oriente, que en las últimas décadas han sido introducidas en muchas regiones tropicales y subtropicales, debido a su resistencia a enfermedades, amplio rango de alimentos, fácil reproducción, y adaptación a diferentes ambientes de aguas continentales y marinas, crecimiento rápido, tolerancia a altas densidades de siembras, tolerancias a bajas concentraciones, fácil manejo, resistencia a la manipulación en siembra, traslados y cosechas, capacidad de alcanzar tamaños comerciales antes de su madurez sexual, facilidad de reproducción, apariencia atractiva para diferentes mercados, buena conversión alimenticia, ganancia de peso y sobrevivencia.

La tilapia está comprendida entre los 5 y los 80 gramos de peso. Generalmente se realizan en estanques de 350 a 1000 m² con una densidad entre 20 y 50 peces por m². Este autor también afirma que los cultivos deben ser controlados periódicamente para evaluar su desarrollo y observar el estado de salud y

⁴⁸ CONABIO. Sistema de Información de Organismos Vivos Modificados (SIOVM), Proyecto GEF-CIBIOGEM de Bioseguridad. Disponible en Internet: http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/bioseguridad/pdf/21940_sg7.pdf

⁴⁹ Fajardo. Op. cit., p. 19

⁵⁰ Ibid., p 19

⁵¹ PINEDA, Hermes; ZULUAGA, Carlos y VERTEL, Diego. Evaluación de la morfometría y el hábito alimenticio en tilapia roja (*Oreochromis sp*) y tilapia nilótica (*Oreochromis niloticus var. chitralada*) bajo diferentes condiciones de manejo en dos granjas piscícolas del occidente antioqueño. En: Revista Politécnica. Medellín, Colombia. 2012. p. 98.

aparición de las tilapias y a la vez hacer los ajustes de alimentación diaria correspondiente⁵².

2.7.1 Clasificación taxonómica. Según Berg citado por Morales⁵³,

| | |
|------------|---------------------------------|
| Phylum | <i>Chordata</i> |
| Subphylum | <i>Vertebrata</i> |
| Superclase | Gnathostomata |
| Serie | <i>Pisces</i> |
| Clase | Actinopterygii |
| Orden | Perciforme |
| Suborden | <i>Percoidei</i> |
| Familia | Cichlidae |
| Género | <i>Tilapia (Oreochromis sp)</i> |

2.7.2 Biología de la tilapia. Son especies aptas para el cultivo en zonas tropicales y subtropicales. Debido a su naturaleza híbrida, se adapta con gran facilidad a ambientes lénticos (aguas poco estancadas), estanques, lagunas, reservorios y en general a medios confinados⁵⁴.

Son especies euritermas, con una temperatura ideal para cultivo fluctúa entre 29 °C, aunque se reproduce a los 18 °C, además soporta concentraciones de oxígeno bastantes bajas, su requerimiento mínimo es de 1 mg/L. Se reproduce a temprana edad, alrededor de las 8 o 10 semanas, teniendo una talla entre 7 a 16 cm⁵⁵.

2.7.3 Hábitos alimenticios. Según Marín⁵⁶, la tilapia roja, en su estrado adulto y en etapa de crecimiento es omnívora; hasta su etapa de cría (5 cm) presentan preferencias fito-planctófagas, puesto que su alimentación se basa en el consumo de zooplancton, insectos, vegetales acuáticos y alimentos artificiales como harinas y granos.

De acuerdo con Huet⁵⁷ las tilapias presentan conductas alimenticias que van desde macrófagas y herbívoras; sin embargo la mayoría de las de las tilapias se alimentan en mayor o menor proporción, de larvas de insectos, gusanos, crustáceos y detritos.

⁵² LIÑÁN, Wilbert. Crianza de tilapia, Lima: Editora Macro EIRL. 2007. 42 p

⁵³ MORALES DÍAZ, Armando. Biología, cultivo y comercialización de la tilapia. México D.F: AGT. Editor, S.A. 2004. p. 4-12

⁵⁴ NICOVITA. Manual de crianza Tilapia. Disponible en internet:

<http://www.industriaacuicola.com/biblioteca/Tilapia/Manual%20de%20crianza%20de%20tilapia.pdf>

⁵⁵ MARÍN, Mario. Manual de Producción de Tilapia, Puebla: Secretaria de Desarrollo Rural del Estado de Puebla, 2007. p 12. Disponible en internet: <http://es.slideshare.net/JCAMILOMOR/manual-de-produccion-de-tilapia>

⁵⁶ Ibid., p. 52.

⁵⁷ HUET, Marcel. Tratado de piscicultura. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 1998. 749 p. ISBN 847-50-9854-1c.

Otros autores como Bardach⁵⁸, afirma que todas las tilapias tienen una tendencia hacia hábitos alimenticios herbívoros, a diferencia de otros peces que se alimentan o bien de pequeños invertebrados o son piscívoros. Las adaptaciones estructurales de las tilapias a esta dieta son principalmente un largo intestino muy plegado, dientes bicúspides o tricúspides sobre las mandíbulas y la presencia de dientes faríngeos.

⁵⁸ BARDACH, John; RYTHER, John y MCLARNEY, William. Acuicultura Crianza y cultivo de organismos marinos y de agua dulce. México D.F.: A.G.T. Editor, S.A. 1990. 741.p. ISBN 968-463-022-0

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1 LOCALIZACIÓN

La presente investigación se ejecutó en la granja experimental Botana de la Universidad de Nariño (Figura 1), se encuentra localizada en el corregimiento de Catambuco, vereda Botana. Condiciones: temperatura promedio de 12,6 °C, precipitación de 820 mm, humedad relativa de 79% y una altura de 2800 msnm.

Figura 1. Granja experimental botana. Universidad de Nariño



Fuente: <http://www.udenar.edu.co/dependencias/vicerrectoria-academica/granjas/>

3.2 PERIODO DE ESTUDIO

La investigación tuvo una duración de 60 días en la granja Botana divididos en cuatro periodos de 15 días, en el cual se registró las variables productivas, análisis fisicoquímicos del agua y la eficiencia de la remoción de sólidos en el sistema.

3.3 INSTALACIONES, EQUIPOS, MATERIALES E INSUMOS

La investigación se realizó bajo condiciones de invernadero tipo túnel, el módulo consta de dos componentes de evaluación acuícola y agrícola (Figura 2), con el fin de facilitar la consolidación de las variables al momento de determinar el aporte de cada uno de estos al sistema total.

Figura 2. Invernadero y sistema acuapónico



3.3.1 Diseño del sistema acuapónico experimental. El sistema acuapónico cuenta con las unidades de cultivo conformadas por 12 tubos de PVC de 4" diámetro y un largo de 3 metros que constituye los NFT, cada uno con 12 perforaciones de 2" diámetro donde se realizó la siembra de las lechugas; un tanque de cultivo con un volumen efectivo de 450 L, donde se sembraron las tilapias a una carga de 10 kg/m³. Para el tratamiento de aguas a la salida del tanque de cultivo, se incorporó un clarificador de tanque cónico con una capacidad de 105 litros, un biofiltro conformado por tres tipos de grava en un tanque rectangular industrial de 330 litros y un tanque de succión de 80 litros el cual contenía una bomba sumergible que transportaba el agua por medio de manguera hacia una caja de nivel constante que contiene la misma capacidad, con el fin de distribuir el agua a los 12 tubos de cultivo. Cada uno de los componentes excepto la caja de succión y de nivel estuvieron aireados por medio de una turbina de aireación de múltiples salidas de 50 Watts con piedras difusoras en barra (Anexo A).

3.3.2 Equipos, materiales e insumos. A continuación, se presenta los equipos, materiales e insumos utilizados durante la investigación:

➤ **EQUIPOS**

- Balanza analítica
- Balanza digital CL SERIES
- Beaker 500 mL
- Blower RESUN AIR PUMP LP 50 Watts
- Bomba de vacío
- Desecador
- Electro bomba sumergible PEDROLLO 0,5 HP
- Estufa o plancha de calentamiento
- Horno o incubadora (105°C)
- Mufla (550°C)

- Oxímetro YSI 550 A
- Termostatos

➤ **MATERIALES**

- Pinza de sujeción
- Piedras difusoras en barra
- Baldes plásticos
- Calefactor digital
- Beakers
- Elenmeyers
- Embudos
- Probetas
- Vidrio reloj
- Papel filtro de 0,45 μm
- Vasos plásticos
- Crisoles
- Cono Imhoff (soporte)
- Nasas
- Varilla de vidrio

➤ **INSUMOS**

- Alimento comercial 32% proteína
- Eugenol
- Sustratos (turba, cascarilla de arroz, grava)
- Sal Marina
- Hipoclorito de Sodio

3.3.3 Material biológico. Se utilizaron 25 ejemplares de tilapia roja provenientes de la estación piscícola ubicada en el municipio de Remolino, Nariño con un peso y talla aproximado de $134,50 \pm 31,94$ gramos y $19,02 \pm 1,41$ cm respectivamente. Se inició con una carga de $7,47 \text{ kg/m}^3$ y se finalizó con una carga de $11,77 \text{ kg/m}^3$. Para el manejo agrícola se sembraron 144 plántulas de Lechuga de 15 días germinadas.

3.4 PLAN DE MANEJO

3.4.1 Adecuación de las instalaciones

El sistema acuapónico se adecuó antes de iniciar la investigación realizándole pruebas al sistema hidráulico. Adicional se desinfectó todo el sistema con hipoclorito de sodio a una dosis de 5 g/L, posterior a esto se recirculó y maduró el sistema. Igualmente se preparó el laboratorio de calidad de aguas del programa de ingeniería

en producción acuícola, el cual está equipado con los materiales necesarios para la determinación de las concentraciones de sólidos (Figura 3).

Figura 3. Sistema acuapónico (sistema de recirculación) y laboratorio de calidad de aguas



3.4.2 Manejo de los animales. Los animales fueron trasladados de la estación del Remolino hasta la granja Botana, utilizando un tanque de 250 litros con constante aireación. Se les realizó un tratamiento de sal 1 g/L y permanganato de potasio 6 mg/L durante 15 minutos, con el fin de eliminar bacterias o microorganismos. Antes de la siembra se aclimataron los animales a los parámetros físico-químicos del sistema. Durante el tiempo de estudio se tuvo en cuenta la biomasa de los animales, se alimentaba 4 veces al día con concentrado comercial del 32% de proteína.

Cada 15 días se realizó un muestreo de los animales para registrar datos de sobrevivencia, peso y talla (Figura 4), para esto se traspasada los animales por una solución de Eugenol a una concentración de 0,0125 ml/L (3 gotas en 12 L) para anestésarlos, aquí se esperaba alrededor de unos 3 minutos y se procedía a tomar registro de las variables, luego se recuperaba en otro recipiente con aireación y se devolvía al tanque de cultivo.

Figura 4. Muestreo de los animales



3.4.3 Adecuación de plantas. Inicialmente se adecuaron las unidades de cultivo NFT junto a los sustratos (turba, grava, cascarilla de arroz) (Figura 5). Se dispuso de plántulas con 15 días germinadas por estudiantes de ingeniería agronómica en los laboratorios de la universidad. Para la adecuación de las plantas se cuenta con espumas para que la raíz pueda fijarse al sustrato de cada vaso plástico con aberturas.

Cuadro 1. Distribución de los sustratos en las unidades de cultivo

| NFT | Sustrato |
|------------|-----------------|
| 1 | Turba |
| 2 | Grava |
| 3 | Grava |
| 4 | Sin sustrato |
| 5 | Turba |
| 6 | Cascarilla |
| 7 | Grava |
| 8 | Sin sustrato |
| 9 | Cascarilla |
| 10 | Turba |
| 11 | Cascarilla |
| 12 | Sin sustrato |

Figura 5. Unidades de cultivo de lechuga



3.4.4 Control de parámetros físico-químicos. Durante el tiempo de estudio se registraron los parámetros físico-químicos como oxígeno disuelto (OD), temperatura (°C) y pH, para el control de estos parámetros se contó con un calefactor digital y mangueras difusoras. Estos fueron tomados en el tanque de cultivo diariamente y el pH cada 10 días. Como actividad adicional se realizó la toma de la demanda

biológica de oxígeno a los 5 días (DBO₅) y demanda química de oxígeno (DQO), tomados en el tanque de cultivo.

En el Cuadro 2 se presenta los diferentes puntos de muestreo para la determinación de sólidos, estos se tomaron cada 10 días y en el Cuadro 3 se indican los métodos para esta determinación, los cuales fueron tomados del manual de métodos estándar para el análisis de aguas.

Cuadro 2. Puntos de muestreo para la determinación de sólidos

| No. | Punto de Muestreo |
|------------|--|
| 1 | Salida de los tubos del T ₀ |
| 2 | Salida de los tubos del T ₁ |
| 3 | Salida de los tubos del T ₂ |
| 4 | Salida de los tubos del T ₃ |
| 5 | Salida del Tanque de Cultivo |
| 6 | Salida del Clarificador |
| 7 | Salida del Biofiltro |

Cuadro 3. Métodos de determinación de Sólidos

| Parámetro | Método de determinación |
|---------------------------|--|
| Sólidos totales | Método 21-2540-B (Secado 103 - 105 °C) |
| Sólidos fijos y volátiles | Método 21-2540-E (Secado a 550 °C) |
| Sólidos suspendidos | Método 21-2540-D |
| Sólidos disueltos | Método 21-2540-C |
| Sólidos sedimentables | Método 21-2540-F |

3.4.5 Monitoreo del sistema acuapónico. Al hacer la investigación se hicieron revisiones del nivel de agua, con el fin de reposición de esta por causas de evaporación y evapotranspiración, así tener un funcionamiento correcto del sistema de recirculación, aproximadamente se hizo una reposición del 5% (47,29 litros) en todo el sistema. Para el control del caudal se tuvo en cuenta el balance de masas según Timmons⁵⁹, de tal manera se revisó la entrada y salida de las unidades de cultivo, aforando mediante el método volumétrico, lo cual determino un caudal promedio de 1,39 L/minuto.

Surgió la necesidad de realizar lavados parciales del clarificador, ya que este llegó a un punto en el que se colmató por los sólidos, debido a esto se realizó una reposición de agua del 30% (24 litros) del clarificador.

⁵⁹ TIMMONS et al.,. Op. cit., p. 87-114

3.5 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA HIDRÁULICO

El sistema de filtración empieza a la salida del tanque de cultivo, el sistema de rebose en este tanque se encarga de transportar los sólidos (heces, alimento no consumido) hacia el clarificador, disminuyendo la velocidad del agua para sedimentar algunos sólidos. A continuación, pasa al biofiltro el cual tiene un medio de soporte para la fijación de bacterias, este se conecta a un sumidero que por medio de una bomba sumergible transporta el agua a la caja de nivel (Figura 6).

Figura 6. Sistema de filtración



3.5.1 Clarificador. En esta investigación se manejó un tanque cónico de flujo ascendente con el fin de disminuir la velocidad del agua generando la sedimentación de los sólidos más pesados (Figura 7).

Figura 7. Clarificador



3.5.2 Biofiltro. Para este componente se utilizó un tanque industrial, donde el agua ingresa por flujo ascendente, conformado por tres tipos de grava de diferente diámetro (1/2", 3/4" y 1"), soportada en una malla mosquitera, con una base plástica y aireación (Figura 8). Continuación a este se encuentra un sumidero compuesto por un tanque de 80 litros, donde el agua ingresa por rebose conectándose a una tubería PVC de 1 ½ pulgadas, en el cual está dispuesta la bomba de succión para enviar el agua hacia la caja de nivel constante.

Figura 8. Biofiltro y sumidero



3.6 DISEÑO EXPERIMENTAL

En la presente investigación se utilizó un diseño experimental completamente aleatorizado con sub-muestreo, conformado por cuatro tratamientos con tres réplicas de la siguiente manera (Anexo A):

- T₀. Tratamiento sin sustrato
- T₁. Plántulas + turba comercial
- T₂. Plántulas + sustrato grava
- T₃. Plántulas + sustrato cascarilla de arroz.

Para realizar el análisis de varianza se utilizará la siguiente expresión algebraica⁶⁰:

$$Y_{ijk} = \mu + T_i + \varepsilon_{ij} + n_{ijk}$$

Dónde:

- Y_{ijk} . Variable respuesta
- μ : Media poblacional
- T_i . Efecto medio del I-ésimo tratamiento $i=1$

⁶⁰ SOLARTE, Carlos; GARCÍA, Hernán A y IMUEZ, Marco. Bioestadística: Aplicaciones en producción y salud animal, San Juan de Pasto: Editorial Universitaria – Universidad de Nariño, 2009. p 304

ε_{ij} : Error experimental asociado del i-ésimo tratamiento en la j-ésima unidad experimental.

η_{ijk} : Error de muestreo, asociado a la k-ésima muestra

k: Unidad observacional

3.6.1 Formulación de la Hipótesis

$H_0 = T_1 = T_2 = T_3$ No existen diferencias significativas entre los tratamientos.

$H_1 \neq T_1 \neq T_2 \neq T_3$ Por lo menos uno de los tratamientos presenta diferencias significativas.

3.6.2 Análisis Estadístico. Antes de realizar el análisis de los datos se verificará el cumplimiento de los supuestos estadísticos de normalidad (Chi-cuadrado, Shapiro-Wilk) Z para asimetría, homogeneidad de varianzas (Bartlett) e independencia (Durbin-Watson); se aplicó un análisis de varianza ANOVA, con el fin de determinar las diferencias significativas entre los tratamientos.

3.7 VARIABLES A EVALUAR

3.7.1 Eficiencia de remoción de sólidos. Capacidad para remover o eliminar los sólidos del sistema.

$$\text{Remoción (\%)} = \frac{(\text{Concentración Entrada} - \text{Concentración Salida})}{\text{Concentración Entrada}} * 100$$

3.7.2 Tiempo de retención hidráulica TRH. Tiempo de permanencia del agua en el sistema (días)

$$TRH = \frac{\text{Volumen (m}^3\text{)}}{Q \left(\frac{\text{m}^3}{\text{día}} \right)}$$

3.7.3 Incremento de peso IP (gramos)

$$\text{Incremento de peso} = (\text{Peso final} - \text{Peso Inicial})$$

3.7.4 Factor de Conversión Alimenticia y Eficiencia alimenticia

$$FCA = \frac{Kg A}{IP}$$

$$\text{Eficiencia alimenticia} = \frac{IP}{kg A} * 100$$

Donde:

kg A: Kilogramo de alimento suministrado

IP: Incremento de peso

3.7.5 Tasa de crecimiento específico (TCE). Incremento de peso expresado en porcentaje, de un individuo durante el periodo de estudio.

$$TCE = \frac{\ln(Wf) - \ln(Wi)}{\text{Tiempo (dias)}} * 100$$

Dónde:

TCE: Tasa de crecimiento específico (%/día).

Wf: Peso final

Wi: Peso inicial

3.7.6 Análisis parcial de costos

Es el índice que resulta de dividir los beneficios (flujos efectivos) entre los costos variables, a precios actuales de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$RBC = \left(\frac{B}{C} \right)$$

Donde:

RBC: relación beneficio costo

B: beneficio (cop)

C: costo (cop)

4. RESULTADOS

4.1 PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

En el Cuadro 4 se presentan los valores promedios de los parámetros físico-químicos registrados durante el periodo de la investigación, tomados en el tanque de cultivo; en el Anexo B, C y D se presenta la totalidad de los datos referentes al comportamiento de temperatura, oxígeno disuelto (OD), demanda biológica de oxígeno a los 5 días (DBO₅) y demanda química de oxígeno (DQO).

Cuadro 4. Valores promedios de los parámetros físico-químicos del sistema acuapónico

| Parámetro | Promedio | Unidades |
|-----------------------------|---------------|----------|
| pH | 7,54 ± 0,05 | |
| Temperatura | 26,20 ± 0,65 | °C |
| OD | 3,80 ± 0,20 | mg/L |
| CO ₂ | 7,63 ± 2,19 | mg/L |
| DBO ₅ | 5,26 ± 0,67 | mg/L |
| DQO | 27,75 ± 4,81 | mg/L |
| Alcalinidad | 59,00 ± 10,75 | mg/L |
| Dureza | 30,83 ± 10,24 | mg/L |
| Amonio | 0,22 ± 0,11 | mg/L |
| Nitrito (NO ₂) | 0,15 ± 0,25 | mg/L |
| Nitratos (NO ₃) | 20,97 ± 16,89 | mg/L |

Fuente: Duarte, D. Gómez, A. Jaramillo, M y Ramos, E. 2018

4.2 CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS

En el Cuadro 5 se presenta el comportamiento de la concentración promedio general de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), sólidos fijos (SF), sólidos suspendidos (SS), sólidos disueltos (SD) y sólidos sedimentables (Ssed), tomados a la salida de los respectivos tratamientos, tanque de cultivo (TC), clarificador (CLA) y biofiltro (BF). En el Anexo E y F se presentan la totalidad de las concentraciones de los sólidos.

Cuadro 5. Concentración promedio de sólidos (mg/L) en las unidades del sistema acuapónico

| | PARÁMETROS | | | | | |
|----------------------|-----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|-------------|
| | ST (mg/L) | SV (mg/L) | SF (mg/L) | SS (mg/L) | SD (mg/L) | Ssed (mg/L) |
| TC | 273,33 ± 113,43 | 95,00 ± 22,58 | 141,67 ± 37,64 | 37,33 ± 5,57 | 188,33 ± 53,45 | 0,83 ± 0,67 |
| CLA | 235,00 ± 90,94 | 83,33 ± 21,60 | 153,33 ± 43,67 | 32,67 ± 6,80 | 195,00 ± 61,56 | 0,25 ± 0,14 |
| BF | 211,67 ± 75,74 | 83,33 ± 25,82 | 126,67 ± 42,74 | 26,00 ± 8,53 | 183,33 ± 64,39 | 0,02 ± 0,04 |
| T₀ | 194,16 ± 49,77 | 74,44 ± 22,35 | 119,72 ± 38,55 | 15,94 ± 14,40 | 159,72 ± 65,47 | ---- |
| T₁ | 201,38 ± 60,55 | 84,05 ± 22,44 | 117,38 ± 51,03 | 19,33 ± 15,78 | 172,22 ± 55,60 | ---- |
| T₂ | 201,38 ± 63,40 | 81,11 ± 27,89 | 120,27 ± 49,95 | 18,88 ± 17,36 | 169,72 ± 73,15 | ---- |
| T₃ | 202,94 ± 58,48 | 73,38 ± 28,12 | 129,61 ± 43,31 | 14,86 ± 13,59 | 172,94 ± 45,42 | ---- |

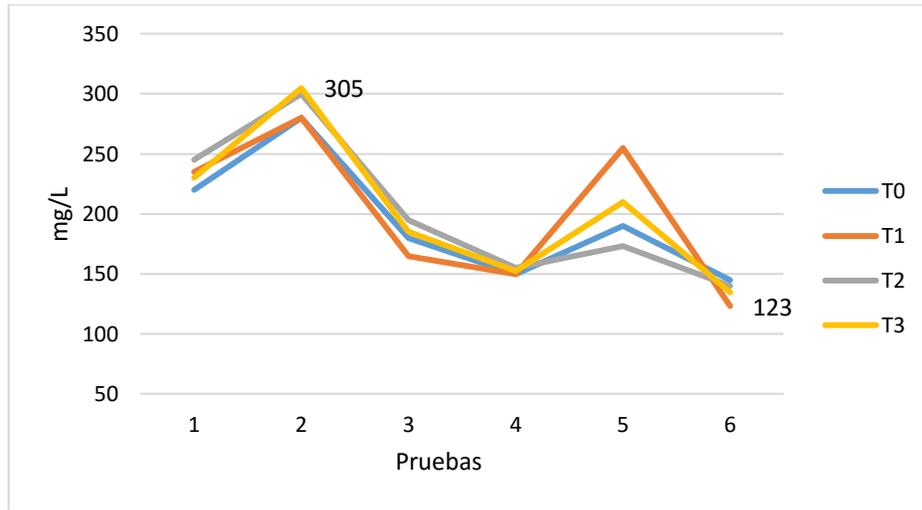
Según el análisis de varianza demostró que no existió diferencia significativa entre el comportamiento de los sólidos en los tratamientos, con un nivel del 95% de confianza (Anexo G, H, I, J y K).

Las altas concentraciones de sólidos en algunas pruebas se debieron a que durante la investigación se identificó en la entrada de los tubos una acumulación progresiva de sólidos que en algunas ocasiones los obstruía de manera parcial posiblemente por la baja pendiente del tubo. Para evitar tales acumulaciones se optó por el mantenimiento preventivo de los tubos NFT, por medio de un aumento momentáneo en los caudales; esto pudo liberar sólidos que estaban presentes en las raíces de las plantas, afectando las concentraciones y las eficiencias de remoción en cada uno de estos.

Los picos observados en las pruebas 3 y 4 de las diferentes figuras se debieron a un lavado del clarificador y biofiltro, al existir una alta cantidad de sólidos afectando el funcionamiento del sistema. Además, por mantenimiento del clarificador en el último periodo se realizó un vaciado parcial con reposición del 30%.

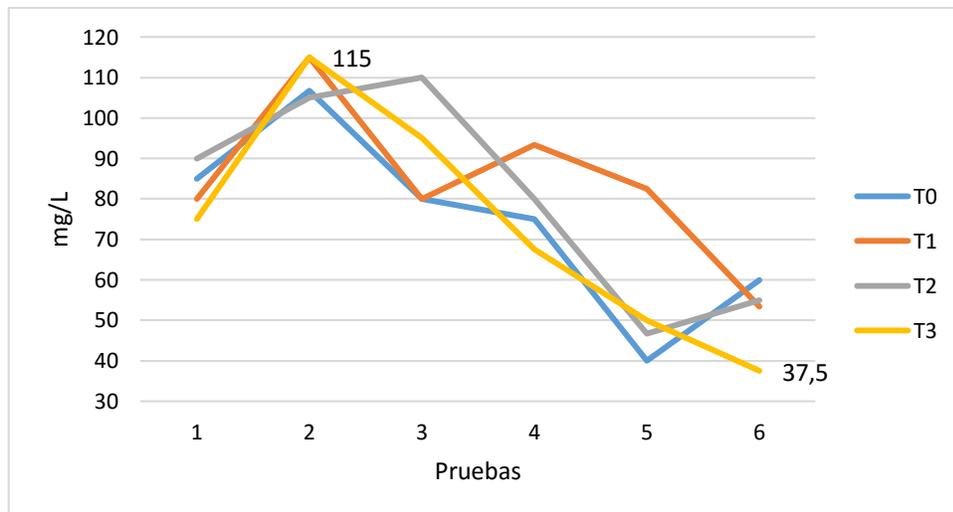
En la Figura 9 se registra el comportamiento de los ST a la salida de los respectivos tratamientos, en esta variable presentó una variación de menor a mayor de 123 mg/L en T₁ a 305 mg/L en T₃.

Figura 9. Comportamiento de ST en los tratamientos



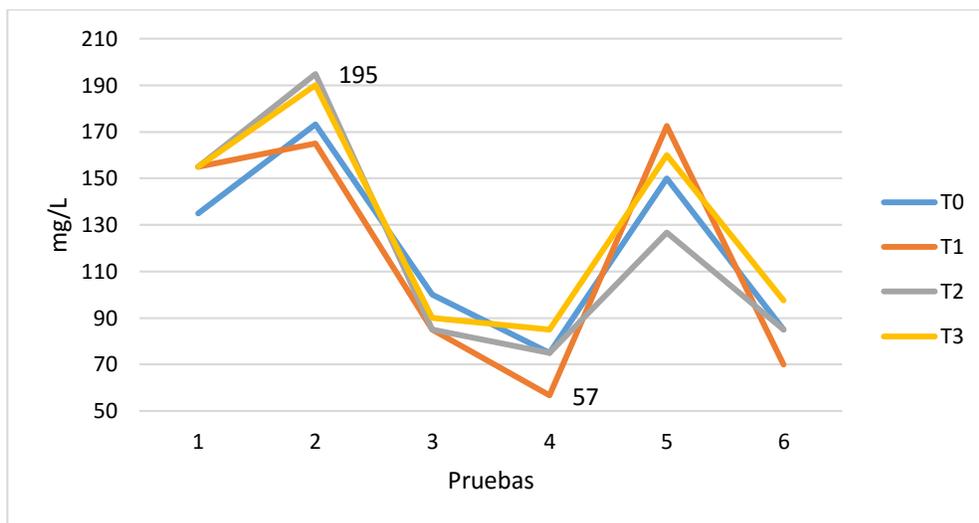
En la Figura 10 se registra el comportamiento de los SV a la salida de los respectivos tratamientos, en esta variable presentó una variación entre 37,5 mg/L en T₃ y 115 mg/L en T₁ y T₃.

Figura 10. Comportamiento de SV en los tratamientos



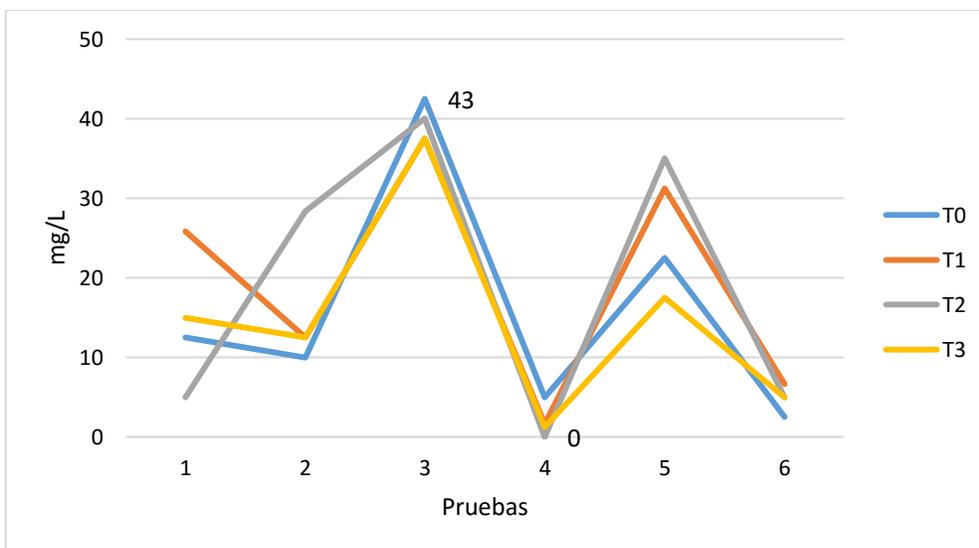
En la Figura 11 se registra el comportamiento de los SF a la salida de los respectivos tratamientos, en esta variable presentó una variación entre 57 mg/L en T₁ y 195 mg/L en T₂.

Figura 11. Comportamiento de SF en los tratamientos



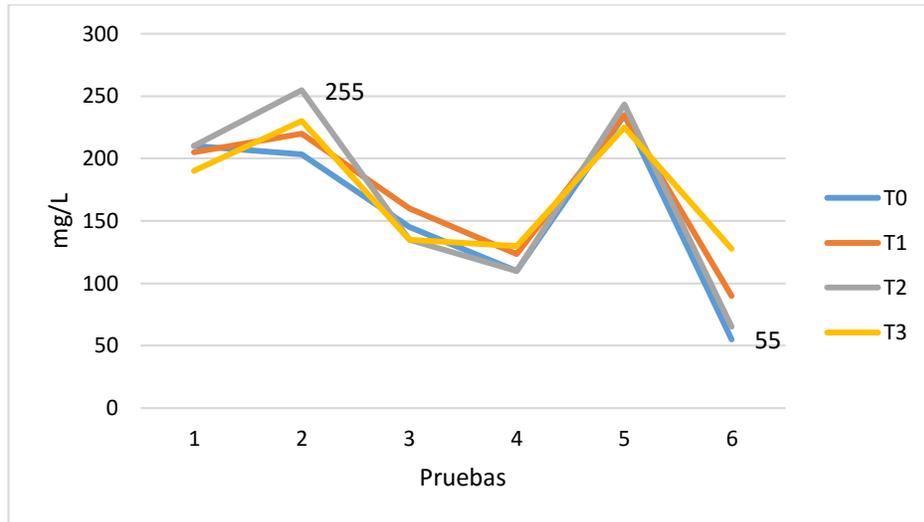
En la Figura 12 se registra el comportamiento de los SS a la salida de los respectivos tratamientos, en esta variable presentó una variación entre 0 mg/L en T₂ y 43 mg/L en T₀.

Figura 12. Comportamiento de SS en los tratamientos



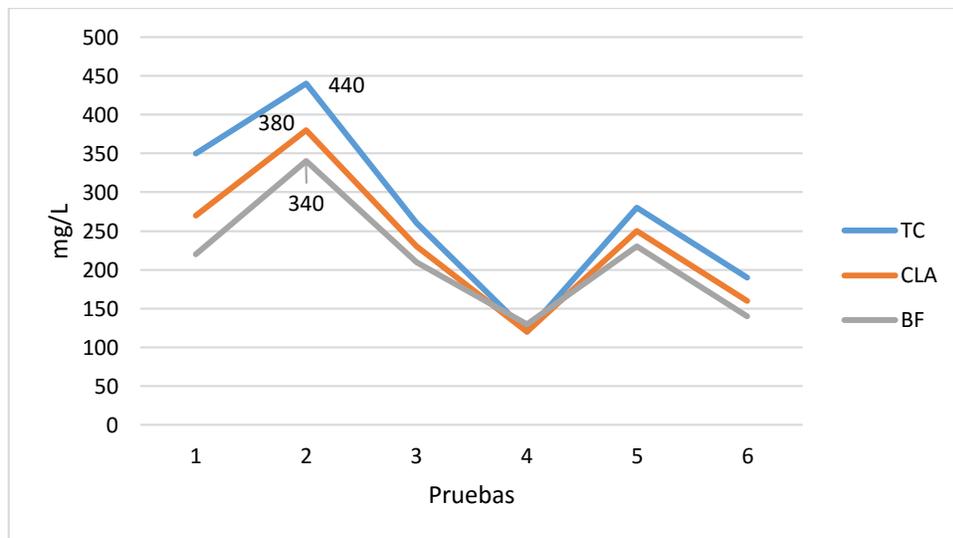
En la Figura 13 se registra el comportamiento de los SD a la salida de los respectivos tratamientos, en esta variable presentó una variación entre 55 mg/L en T₀ y 255 mg/L en T₂.

Figura 13. Comportamiento de SD en los tratamientos



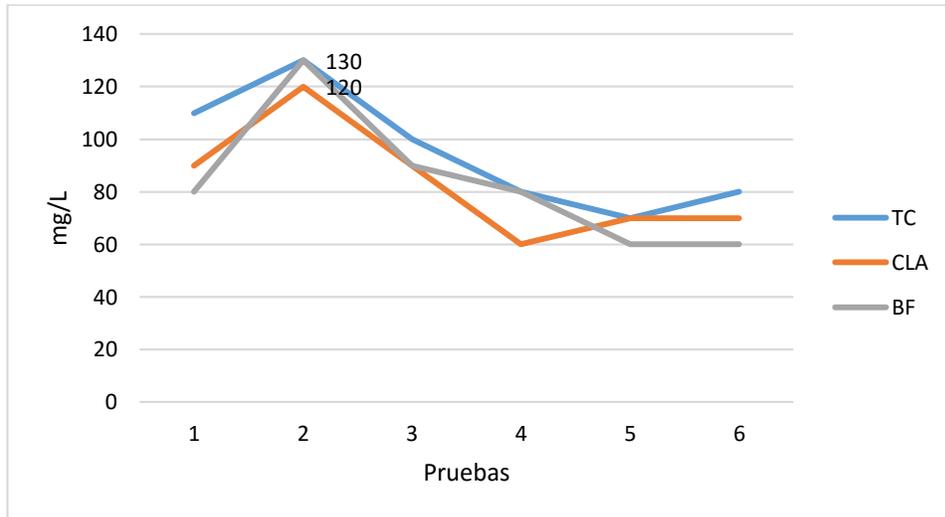
En la Figura 14 se registra el comportamiento de los ST a la salida del tanque de cultivo, clarificador y biofiltro, en la prueba 2 se presentaron los valores más altos de 440, 380 y 340 mg/L en los tres componentes del sistema.

Figura 14. Concentración de ST a la Salida del TC, CLA y BF



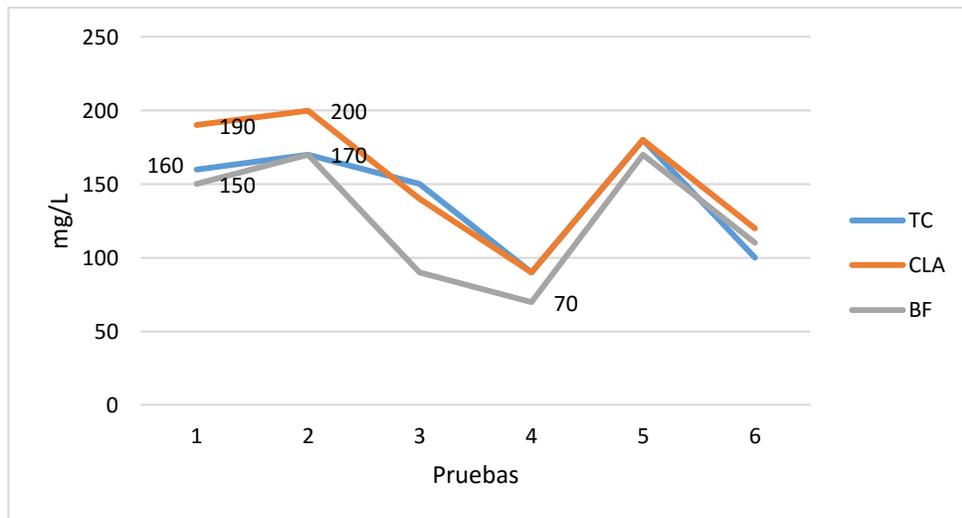
En la Figura 15 se registra el comportamiento de los SV a la salida del tanque de cultivo, clarificador y biofiltro, en la prueba 2 se presentaron los valores más altos de 130, 120 y 130 mg/L en los tres componentes del sistema.

Figura 15. Concentración de SV a la Salida del TC, CLA y BF



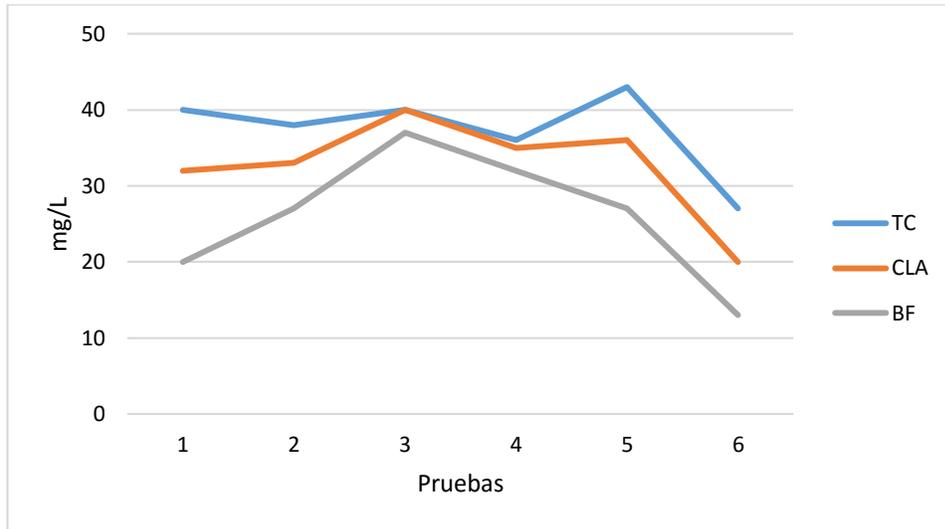
En la Figura 16 se registra el comportamiento de los SF a la salida del tanque de cultivo, clarificador y biofiltro, en las dos primeras pruebas arrojaron valores similares entre 150 y 200 mg/L para los tres componentes del sistema y el menor se presentó en la prueba 4 con un valor de 70 mg/L para el biofiltro.

Figura 16. Concentración de SF a la Salida del TC, CLA y BF



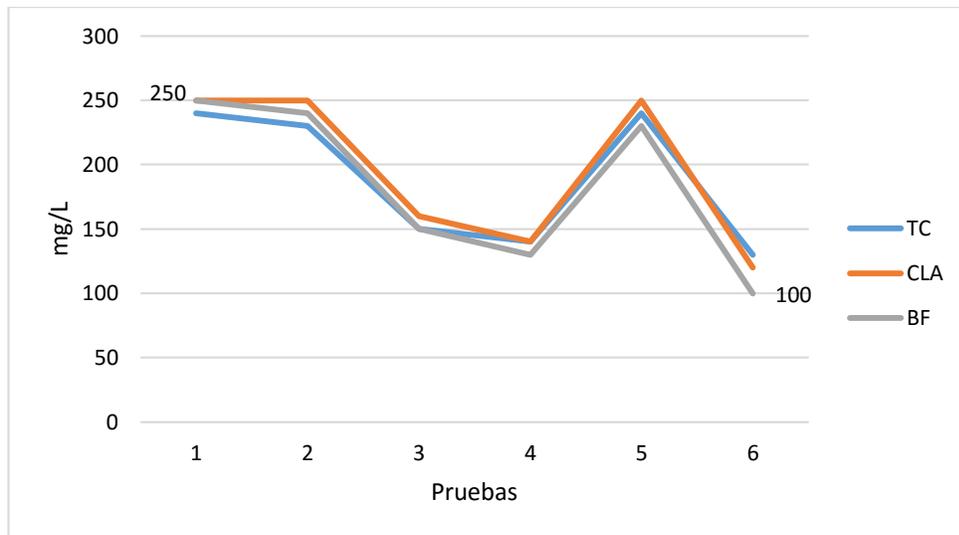
En la Figura 17 se registra el comportamiento de los SS a la salida del tanque de cultivo, clarificador y biofiltro, en esta variable los valores se comportaron uniformemente en las 6 pruebas.

Figura 17. Concentración de SS a la Salida del TC, CLA y BF



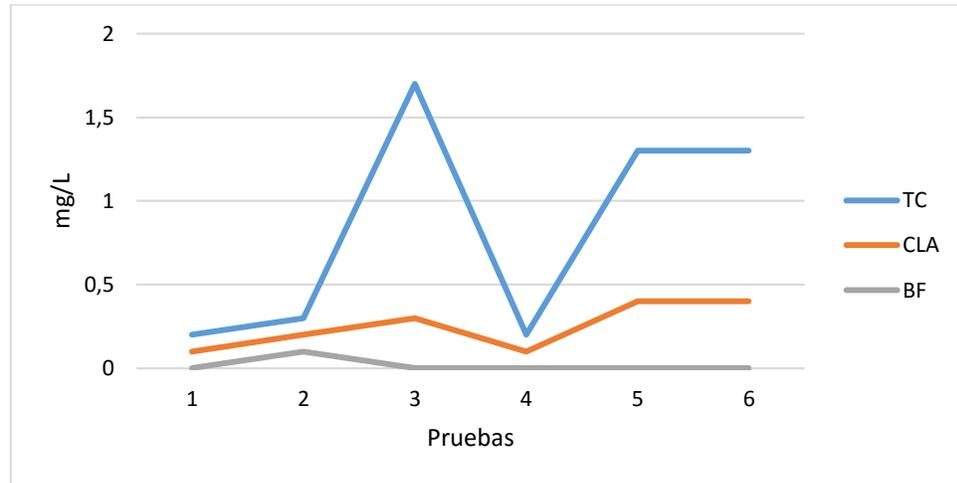
En la Figura 18 se registra el comportamiento de los SD a la salida del tanque de cultivo, clarificador y biofiltro, en esta variable presentó una variación de 100 mg/L y 250 mg/L.

Figura 18. Concentración de SD a la Salida del TC, CLA y BF



En la Figura 19 se registra el comportamiento de los SSed a la salida del tanque de cultivo, clarificador y biofiltro.

Figura 19. Concentración de SSed a la Salida del TC, CLA y BF



4.3 CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS Y EFICIENCIA DE REMOCIÓN

4.3.1 Caudales. Durante el periodo de estudio se manejó un caudal promedio de 1,39 L/minuto. A continuación, se observa en el Cuadro 6 los caudales a la entrada y en el Cuadro 7 los caudales a la salida de cada tratamiento NFT

Cuadro 6. Caudales promedios a la entrada de cada tratamiento en L/minuto

| Muestreo | T ₀ | T ₁ | T ₂ | T ₃ |
|----------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | BLANCO | TURBA | GRAVA | CASCARILLA |
| 1 | 0,0246 | 0,0228 | 0,0217 | 0,0247 |
| 2 | 0,0249 | 0,0192 | 0,0231 | 0,0253 |
| 3 | 0,0235 | 0,0238 | 0,0212 | 0,0233 |
| 4 | 0,0214 | 0,0235 | 0,0228 | 0,0251 |
| 5 | 0,0235 | 0,0238 | 0,0237 | 0,0224 |
| 6 | 0,0209 | 0,0257 | 0,0249 | 0,0215 |
| 7 | 0,0206 | 0,0230 | 0,0247 | 0,0250 |
| 8 | 0,0228 | 0,0237 | 0,0227 | 0,0251 |
| 9 | 0,0246 | 0,0228 | 0,0217 | 0,0247 |
| 10 | 0,0223 | 0,0240 | 0,0231 | 0,0238 |
| 11 | 0,0246 | 0,0229 | 0,0214 | 0,0245 |
| 12 | 0,0212 | 0,0239 | 0,0215 | 0,0268 |
| 13 | 0,0221 | 0,0229 | 0,0260 | 0,0226 |
| 14 | 0,0192 | 0,0255 | 0,0227 | 0,0258 |
| 15 | 0,0215 | 0,0228 | 0,0237 | 0,0238 |
| 16 | 0,0267 | 0,0240 | 0,0208 | 0,0224 |
| 17 | 0,0244 | 0,0245 | 0,0251 | 0,0204 |

| | | | | |
|-----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 18 | 0,0221 | 0,0246 | 0,0243 | 0,0217 |
| 19 | 0,0240 | 0,0230 | 0,0248 | 0,0208 |
| 20 | 0,0228 | 0,0217 | 0,0252 | 0,0239 |
| Promedio | 1,3729 | 1,4042 | 1,3953 | 1,4211 |

Fuente: Duarte, D. Gómez, A. Jaramillo, MC. y Ramos, E. 2018

Cuadro 7. Caudales promedios a la salida de cada tratamiento en L/minuto

| Muestreo | T ₀ | T ₁ | T ₂ | T ₃ |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------|
| | BLANCO | TURBA | GRAVA | CASCARILLA |
| 1 | 0,0245 | 0,0227 | 0,0216 | 0,0246 |
| 2 | 0,0247 | 0,0191 | 0,0230 | 0,0252 |
| 3 | 0,0234 | 0,0237 | 0,0211 | 0,0231 |
| 4 | 0,0212 | 0,0234 | 0,0227 | 0,0250 |
| 5 | 0,0234 | 0,0237 | 0,0236 | 0,0223 |
| 6 | 0,0208 | 0,0255 | 0,0248 | 0,0214 |
| 7 | 0,0205 | 0,0229 | 0,0246 | 0,0249 |
| 8 | 0,0227 | 0,0236 | 0,0226 | 0,0250 |
| 9 | 0,0245 | 0,0227 | 0,0216 | 0,0246 |
| 10 | 0,0222 | 0,0239 | 0,0230 | 0,0237 |
| 11 | 0,0245 | 0,0227 | 0,0213 | 0,0244 |
| 12 | 0,0211 | 0,0238 | 0,0214 | 0,0267 |
| 13 | 0,0220 | 0,0228 | 0,0259 | 0,0225 |
| 14 | 0,0191 | 0,0253 | 0,0226 | 0,0257 |
| 15 | 0,0213 | 0,0227 | 0,0236 | 0,0237 |
| 16 | 0,0266 | 0,0239 | 0,0207 | 0,0223 |
| 17 | 0,0242 | 0,0243 | 0,0250 | 0,0203 |
| 18 | 0,0219 | 0,0245 | 0,0242 | 0,0216 |
| 19 | 0,0239 | 0,0229 | 0,0246 | 0,0207 |
| 20 | 0,0227 | 0,0215 | 0,0251 | 0,0238 |
| Promedio | 1,3661 | 1,3973 | 1,3883 | 1,4141 |

Fuente: Duarte, D. Gómez, A. Jaramillo, MC. y Ramos, E. 2018

El análisis estadístico de comparación múltiple de varianza con un 95% de significancia determinó que no existió diferencias significativas en cuanto al caudal de entrada y salida de la unidad experimental durante todo el estudio (Anexo S). Para el cálculo de carga contaminante se debe tener en cuenta la variación del caudal, sin embargo, al no existir diferencias significativas se procedió a estimar la eficiencia de remoción solo con la diferencia de las concentraciones de la entrada y salida de la unidad experimental (Jaramillo y Ramos, 2018)⁶¹.

⁶¹ RAMOS, Edwin. y JARAMILLO, María. Evaluación de la remoción de compuestos nitrogenados de un sistema acuapónico compuesto por tilapia y lechuga utilizando tres tipos de sustratos (turba

4.3.2 Tiempo de retención hidráulica (TRH). En el Cuadro 8 se presenta los tiempos de retención hidráulica de las unidades experimentales NFT, tanque de cultivo y en cada componente del sistema de filtración:

Cuadro 8. Tiempo de retención hidráulica en los diferentes componentes del sistema

| | Volumen (Litros) | Caudal Q (L/min) | TRH Minutos |
|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------|
| T. Cultivo | 450 | 16,680 | 26,98 |
| Clarificador | 100 | 16,680 | 6,00 |
| Biofiltro | 191 | 16,680 | 11,45 |
| Tubos | 19 | 1,39 | 13,67 |

4.3.3 Eficiencia de remoción de sólidos en el sistema. En el Cuadro 9 se presenta el comportamiento promedio de la eficiencia de remoción de los diferentes sólidos tomados en todo el sistema acuapónico y en el Anexo L y M todos los datos tomados en las pruebas.

Cuadro 9. Eficiencia de remoción de sólidos (%) en las unidades del sistema acuapónico

| | PARÁMETROS | | | | | |
|----------------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | ST | SV | SF | SS | SD | Ssed |
| Global | 20,94 ± 28,51 | 17,92 ± 35,68 | 14,98 ± 15,63 | 56,40 ± 82,25 | 12,23 ± 35,10 | 100 ± 0,00 |
| CLA | 12,42 ± 7,48 | 12,23 ± 8,64 | -8,29 ± 11,79 | 13,02 ± 10,00 | -2,67 ± 5,85 | 59,02 ± 17,75 |
| FIL | 8,32 ± 8,99 | -0,33 ± 18,50 | 17,98 ± 10,93 | 17,98 ± 10,94 | 7,01 ± 5,53 | 91,67 ± 20,41 |
| T₀ | 5,05 ± 13,52 | 10,38 ± 14,03 | 4,05 ± 12,91 | 43,66 ± 40,69 | 15,46 ± 16,32 | ---- |
| T₁ | 2,96 ± 15,86 | -3,41 ± 19,96 | 9,85 ± 15,21 | 25,06 ± 48,11 | 5,41 ± 8,86 | ---- |
| T₂ | 2,15 ± 15,91 | 2,50 ± 17,56 | 4,78 ± 16,35 | 31,81 ± 53,58 | 10,71 ± 15,50 | ---- |
| T₃ | 2,11 ± 11,21 | 13,66 ± 14,22 | -3,20 ± 11,92 | 44,93 ± 33,62 | 2,15 ± 16,89 | ---- |

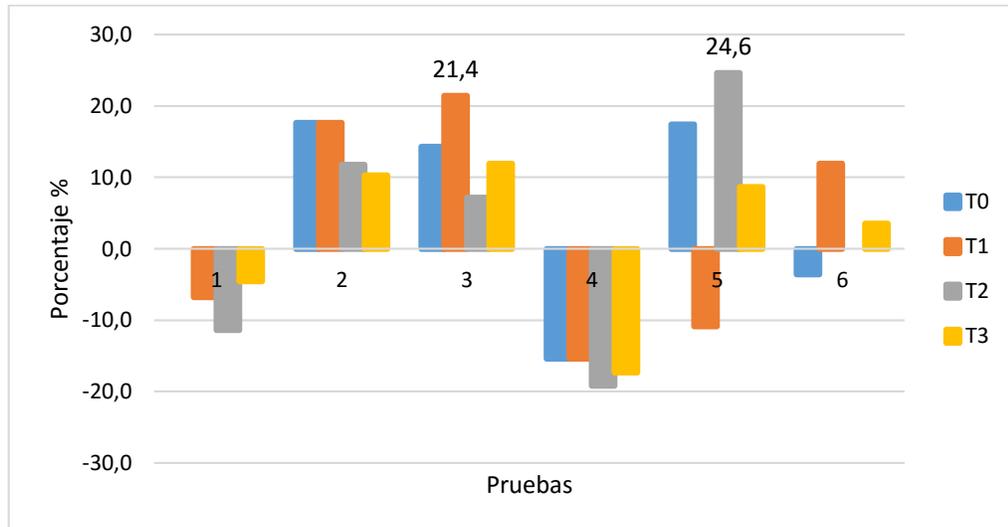
El análisis de varianza demostró que no existió diferencia significativa entre los tratamientos en cuanto la remoción de sólidos entre los tratamientos, con un nivel del 95% de confianza (Anexo N, O, P, Q y R).

En la Figura 20 se registra la eficiencia de remoción de ST a la salida de los respectivos tratamientos, en esta variable se obtuvo las mejores eficiencias en el T₁ y T₂ con valores de 21,4% y 24,6% respectivamente. Teniendo en cuenta el lavado

comercial, grava, cascarilla de arroz), bajo condiciones de invernadero en la granja experimental botana, municipio de pasto. Trabajo de grado: Ingeniero en Producción Acuícola. Facultad de Ciencias Pecuarias. Pasto – Nariño. 2018. p. 68.

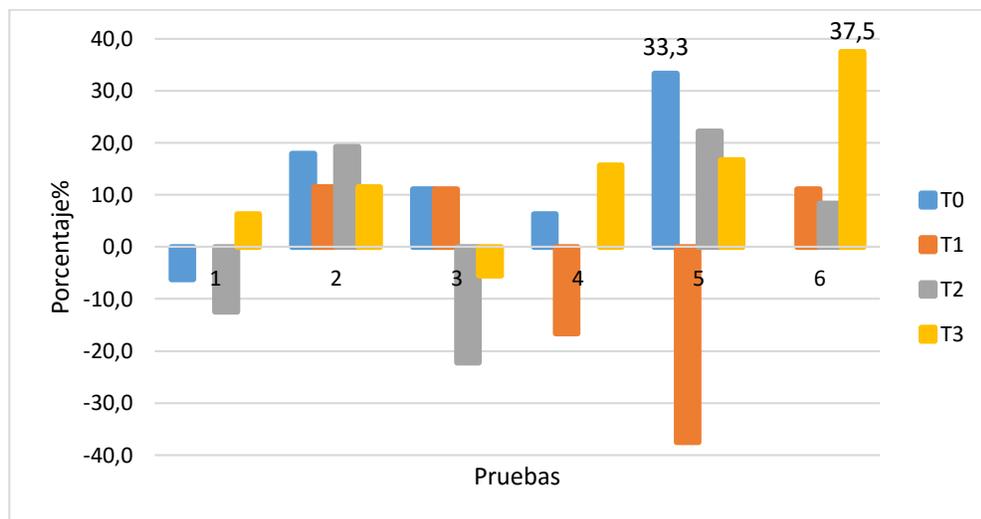
que se realizó y el movimiento provocado en el clarificador y biofiltro pudo haber aumentado los sólidos, por ello se dio la eficiencia negativa en la prueba 4.

Figura 20. Porcentaje de Remoción de ST



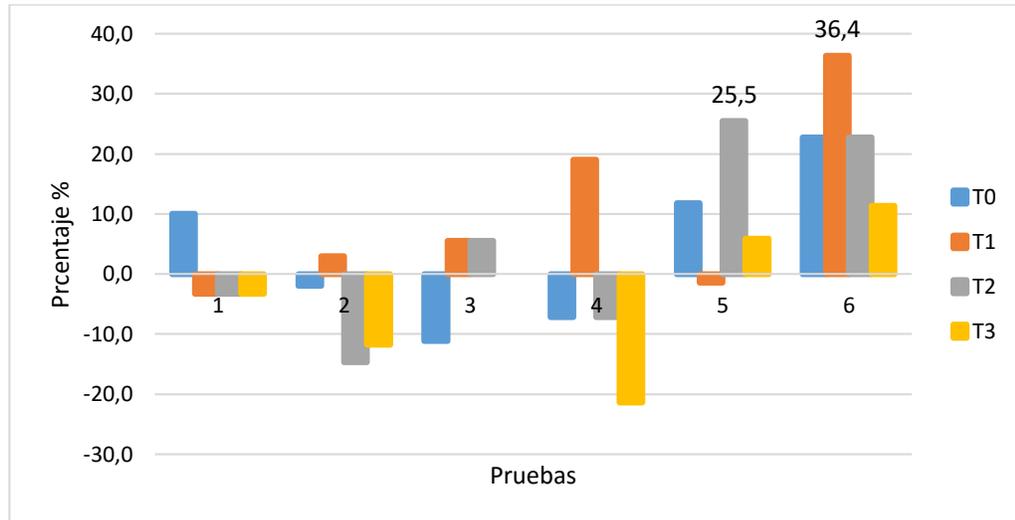
En la Figura 21 se registra la eficiencia de remoción de SV a la salida de los respectivos tratamientos, en esta variable se obtuvo las mejores eficiencias en el T₀ y T₃ con valores de 33,3% y 37,5% respectivamente.

Figura 21. Porcentaje de Remoción de SV



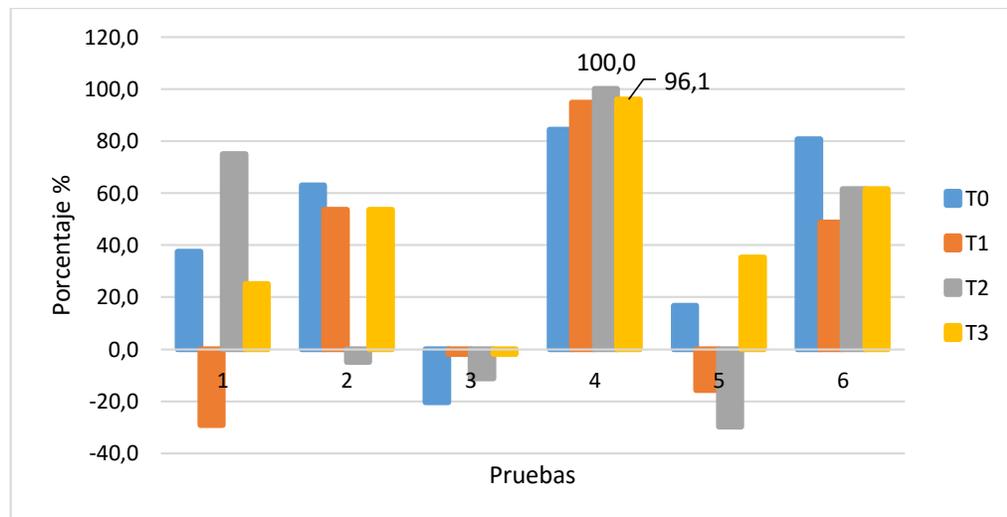
En la Figura 22 se registra la eficiencia de remoción de SF a la salida de los respectivos tratamientos, en esta variable se obtuvo las mejores eficiencias en el T₁ y T₂ con valores de 36,4% y 25,5% respectivamente.

Figura 22. Porcentaje de Remoción de SF



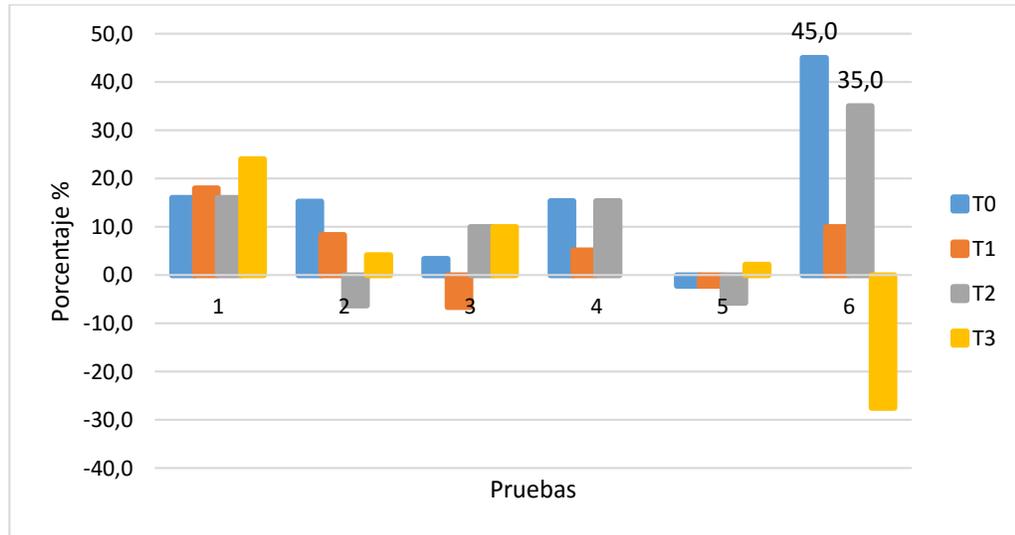
En la Figura 23 se registra la eficiencia de remoción de SS a la salida de los respectivos tratamientos, en esta variable se obtuvo las mejores eficiencias en el T₂ y T₃ con valores de 100% y 96,1% respectivamente.

Figura 23. Porcentaje de Remoción de SS



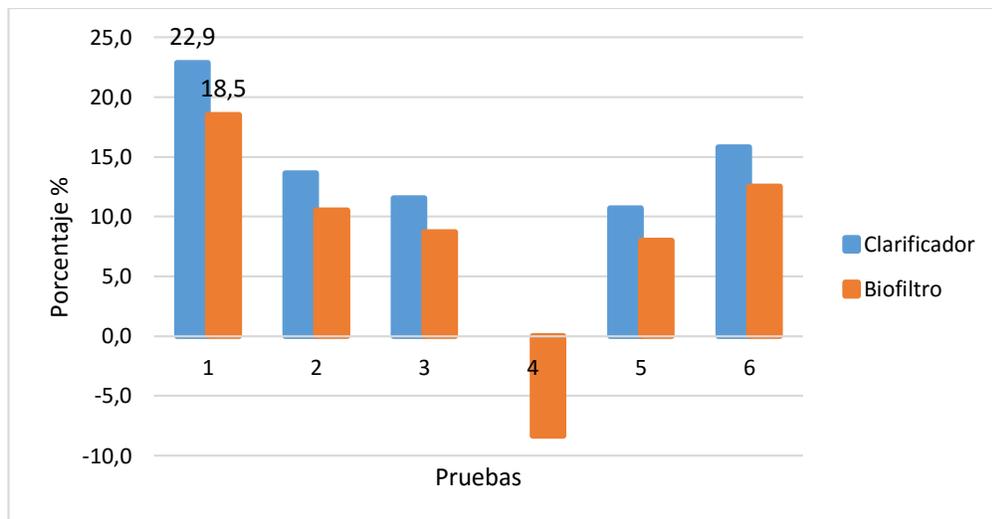
En la Figura 24 se registra la eficiencia de remoción de SD a la salida de los respectivos tratamientos, en esta variable se obtuvo las mejores eficiencias en el T₀ y T₂ con valores de 45% y 35% respectivamente.

Figura 24. Porcentaje de Remoción de SD



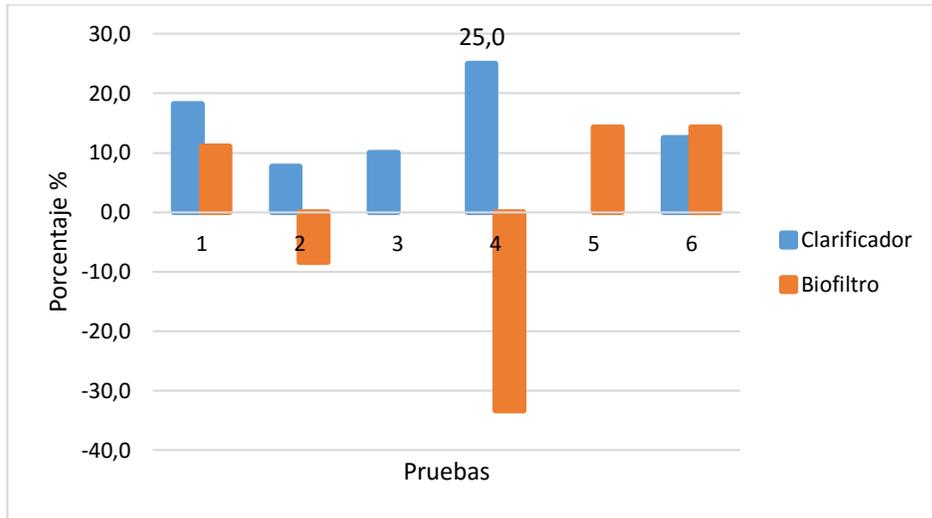
En la Figura 25 se registra la eficiencia de la remoción de ST en el clarificador y biofiltro, con valores de 22,9% en el clarificador y 18,5% en el biofiltro.

Figura 25. Eficiencia de Remoción de ST en CLA y BF



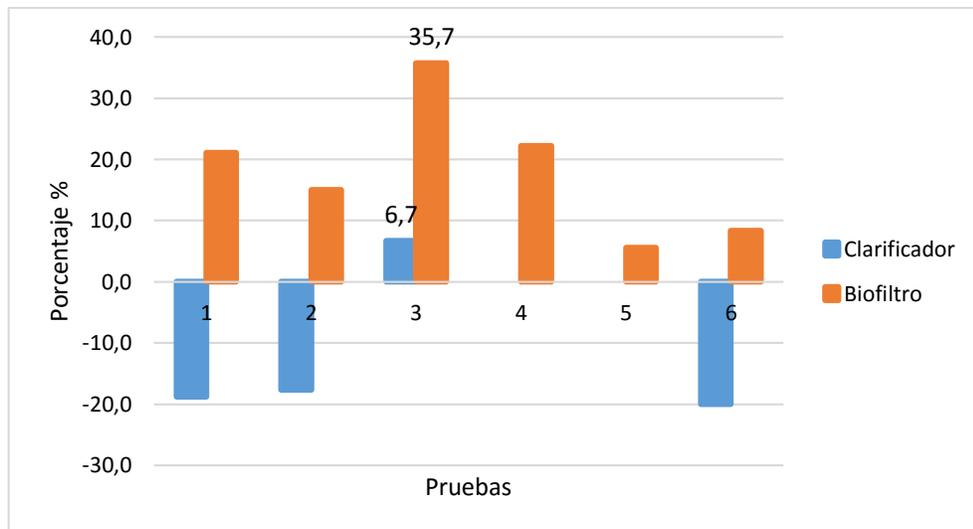
En la Figura 26 se registra la eficiencia de la remoción de SV en el clarificador y biofiltro, arrojando un valor alto en clarificador del 25%.

Figura 26. Eficiencia de Remoción de SV en CLA y BF



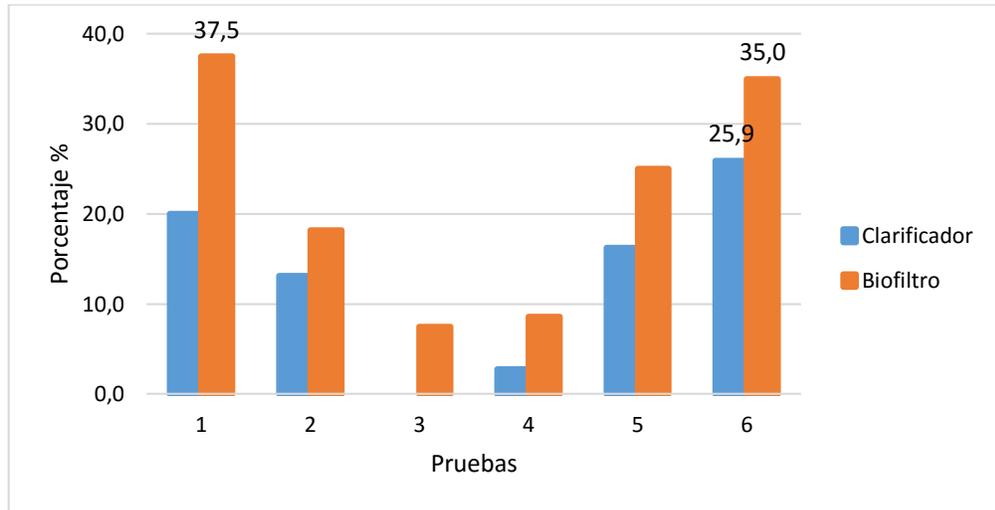
En la Figura 27 se registra la eficiencia de la remoción de SF en el clarificador y biofiltro, presentó unos valores altos en la prueba 3 de 6,7% para clarificador y 35,7% en el biofiltro.

Figura 27. Eficiencia de Remoción de SF en CLA y BF



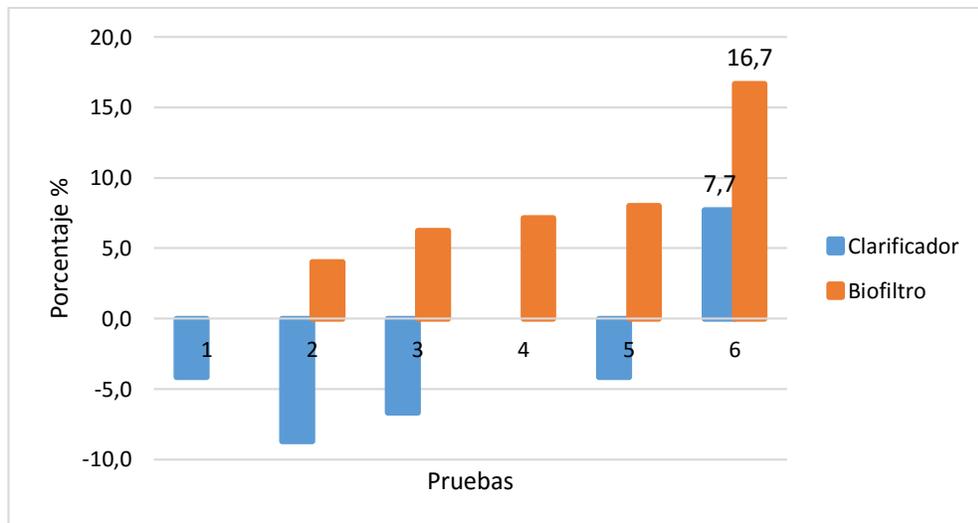
En la Figura 28 se registra la eficiencia de la remoción de SS en el clarificador y biofiltro. El biofiltro presentó valores altos en la prueba 1 y 6 de 37,5% y 35% respectivamente y en el clarificador presentó un valor alto en la prueba 6 de 25,9%.

Figura 28. Eficiencia de Remoción de SS en CLA y BF



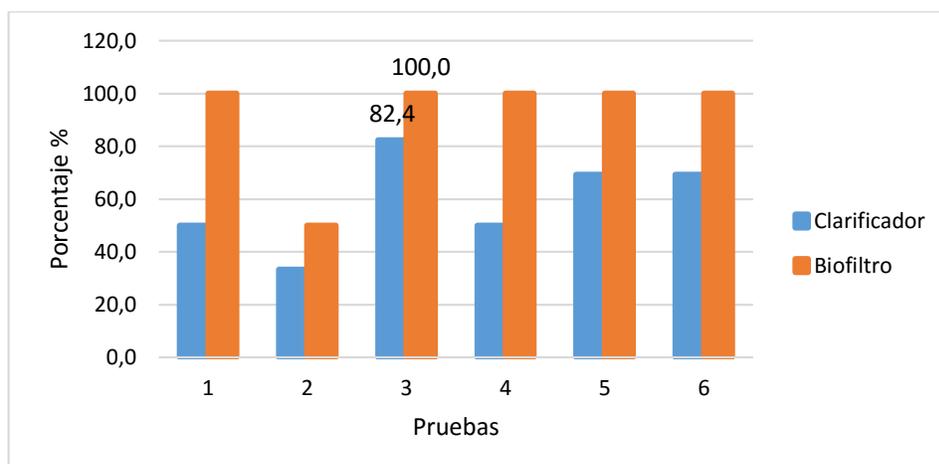
En la Figura 29 se registra la eficiencia de la remoción de SD en el clarificador y biofiltro, presentó unos valores altos en la prueba 6 de 7,7% y 16,7% respectivamente.

Figura 29. Eficiencia de Remoción de SD en CLA y BF



En la Figura 30 se registra la eficiencia de la remoción de SSed en el clarificador y biofiltro, en esta variable de promedio general se tuvo una eficiencia del 100% en el biofiltro y una eficiencia alta en la prueba 3 de 82,4% en el clarificador.

Figura 30. Eficiencia de Remoción de SSed en CLA y BF



4.4 VARIABLES PRODUCTIVAS Y EFICIENCIA NUTRICIONAL

4.4.1 Incremento Peso y Talla. En el Cuadro 10 se presenta las variables productivas peso y talla de la especie trabajada, al inicio y final de la investigación y en el Anexo T y U la totalidad de los datos tomados en los diferentes muestreos. Se inició con un peso promedio de 134,5 gr, obteniendo una ganancia de 77,4 gr. En la variable talla se inició con una longitud de 19 cm y al final incremento 3,6 cm en promedio. Durante el periodo de estudio se obtuvo una sobrevivencia del 100%.

Cuadro 10. Variables de peso y talla de Tilapia Roja

| | PESO (gr) | | TALLA (cm) | |
|-------------------------------|-----------|--------|------------|-------|
| | Inicial | Final | Inicial | Final |
| Media | 134,5 | 211,9 | 19 | 22,6 |
| Desviación estándar | 32,6 | 41,9 | 1,4 | 1,6 |
| Varianza poblacional | 1062,8 | 1754,2 | 2,1 | 2,5 |
| Mínimo | 90 | 149 | 17 | 20 |
| Máximo | 191 | 311 | 21 | 26 |
| Coefficiente de variación (%) | 24,23 | 19,77 | 7,36 | 7,07 |

Fuente: Duarte, D. Gómez, A. Jaramillo, M y Ramos, E. 2018

4.4.2 Tasa de Crecimiento Específico (TCE). En el Cuadro 11 se presentan los valores registrados para la tasa de crecimiento, el cual como promedio en esta investigación fue de 0,76%

Cuadro 11. Tasa de crecimiento específico en los periodos de estudio

| Periodo | TCE |
|-----------------|-------------|
| 1 | 1,48 |
| 2 | 0,77 |
| 3 | 0,66 |
| 4 | 0,12 |
| Promedio | 0,76 |

4.4.3 Factor de Conversión Alimenticia y Eficiencia Alimenticia. Manejando un porcentaje de 2% biomasa/día para cada periodo evaluado, se obtuvo un factor de conversión alimenticia (FCA) del 2,4 y una eficiencia alimenticia (EA) del 42%. Al inicio de la investigación se obtuvo un FCA de 1,45 con una EA de 69% como se puede observar en el Cuadro 12:

Cuadro 12. Factor de conversión alimenticia y eficiencia alimenticia aparente (%)

| Periodo | Alimento suministrado (kg) | Incremento biomasa (kg) | FCA | EA (%) |
|----------------|-----------------------------------|--------------------------------|-------------|---------------|
| 1 | 1,210 | 0,836 | 1,45 | 69 |
| 2 | 1,511 | 0,514 | 2,94 | 34 |
| 3 | 1,696 | 0,488 | 3,48 | 29 |
| Total | 4,418 | 1,838 | 2,40 | 42 |

Fuente: Duarte, D. Gómez, A. Jaramillo, M y Ramos, E. 2018

4.5 ANÁLISIS PARCIAL DE COSTOS

En el cuadro 13 se presenta los costos y beneficios parciales de la investigación, para este análisis se tuvo en cuenta el presupuesto inicial del montaje del sistema (Anexo V) y en el cuadro 14 la relación beneficio costo para los tratamientos.

Cuadro 13. Costos y beneficios parciales de la investigación

| ÍTEM | VALOR TOTAL | T ₀ | T ₁ | T ₂ | T ₃ |
|---|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | BLANCO | TURBA | GRAVA | CASCARILLA |
| Depreciación | \$99.613,33 | 18,33% | 18,17% | 18,32% | 18,32% |
| Consumo Eléctrico | \$236.160,00 | 43,47% | 43,07% | 43,43% | 43,43% |
| Mano de obra | \$138.750,00 | 25,54% | 25,31% | 25,52% | 25,51% |
| Alimento balanceado | \$14.786,20 | 2,72% | 2,70% | 2,72% | 2,72% |
| Juveniles de Tilapia | \$37.500,00 | 6,90% | 6,84% | 6,90% | 6,90% |
| Paquete de semillas (<i>Lactuca sativa</i>) | \$2.500,00 | 0,46% | 0,46% | 0,46% | 0,46% |
| Otros | \$9.000,00 | 1,66% | 1,64% | 1,66% | 1,65% |
| Sal marina | \$5.000,00 | 0,92% | 0,91% | 0,92% | 0,92% |
| Turba 1kg | \$5.000,00 | | 0,91% | | |
| Gravilla 60 kg | \$400,00 | | | 0,07% | |
| Cascarilla 40 kg | \$500,00 | | | | 0,09% |
| | | 100% | 100% | 100% | 100% |

| PRODUCTO | CANTIDAD TOTAL | PESO kg | VALOR UNITARIO | TOTAL |
|----------------------|----------------|---------|----------------|--------------|
| Lechuga | 144 | | \$3.300,00 | \$475.200,00 |
| Peces (Tilapia roja) | 25 | 0,211 | \$13.000,00 | \$68.575,00 |
| | | | | \$543.775,00 |

Fuente: Jaramillo, M y Ramos, E. 2018

Cuadro 14. Relación beneficio costo

| Relación Beneficio/Costo | | | |
|--------------------------|--------------|--------------|------|
| Tratamientos | Beneficio | Costo | B/C |
| T ₀ | \$543.775,00 | \$543.309,53 | 1 |
| T ₁ | \$543.775,00 | \$548.309,53 | 0,99 |
| T ₂ | \$543.775,00 | \$543.709,53 | 1 |
| T ₃ | \$543.775,00 | \$543.809,53 | 1 |

Fuente: Jaramillo, M y Ramos, E. 2018

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

El manejo apropiado de la calidad de agua durante el periodo de estudio, jugó un papel significativo para el funcionamiento del sistema, así como de la mejora del crecimiento y desempeño productivo de la especie.

Durante el periodo de investigación el oxígeno disuelto registró valores promedio de 3,8 mg/L, el cual se encuentra dentro de los rangos recomendados y reportados por Martínez y Mendoza⁶², quienes afirman que las tilapias se desarrollan normalmente en concentraciones de 3 a 5 mg/L. Nelson y Rakocy⁶³ afirman que es importante mantener óptimos niveles de oxígeno disuelto por los diversos requerimientos que necesitan los sistemas acuapónicos.

La temperatura presentó un promedio de 26,2 °C, durante la investigación se reportó fluctuaciones con valores mínimos de 21,6 y máximos de 32,2 °C, aunque para Poot et al.,⁶⁴ en el cultivo de tilapia es necesario que la temperatura fluctúe entre 28 a 32°C; ya que si se presentan cambios drásticos podrían afectar la tasa metabólica.

Los valores de pH reportados en la investigación se encuentran en los rangos óptimos para la especie, según Hurtado citado por Martínez y Mendoza⁶⁵, el rango de pH para el cultivo de tilapia se encuentra entre 6,5 – 8,5, adicionalmente indica que los valores de pH por debajo de 4 y por encima de 11 son mortales.

Al tener unos valores de DBO₅ y DQO de 5,2 mg/L y 27,75 mg/L, se los compara con el límite permisible en la resolución 0631 de 2015⁶⁶, estos valores cumplen para DBO₅ y DQO de 150 mg/L y 50 mg/L respectivamente. Según García et al.,⁶⁷ afirma

⁶² MARTÍNEZ, Víctor y MENDOZA, Wilber. Comportamiento del crecimiento de juveniles de tilapia *Oreochromis niloticus*, utilizando alimento comercial: para tilapia al 28% vs para camarón al 30%. Trabajo de grado: Ingeniero Acuícola. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua. Facultad de Ciencias y tecnología. Nicaragua. 2015. p. 59

⁶³ NELSON y RAKOCY. Op. cit., p. 1-15

⁶⁴ POOT, Carlos. NOVELO, Rafael y HERNÁNDEZ, Mizar. Cultivo integral de la Tilapia. Centro de Estudios Tecnológicos del Mar 02 en Campeche y Fundación Produce Campeche, A. C. 2009. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/55367067/20458321-ABC-en-El-Cultivo-Integral-de-La-Tilapia>

⁶⁵ Ibid., p. 66

⁶⁶ MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 631 DE 2015. (marzo 17). Parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. Disponible en:

https://docs.supersalud.gov.co/PortalWeb/Juridica/OtraNormativa/R_MADS_0631_2015.pdf

⁶⁷ GARCÍA, Daury; GALLEGO, Iván; DÍAZ, Carlos; FALL, Cheikh y BURROLA, Cristina. Evaluación de un sistema de recirculación y acondicionamiento de agua en truiticultura. México. Universidad Autónoma del Estado de México. Vol. II, núm. 2, 2011. p. 83-96.

que la DQO es un buen indicador de lo que ocurre con la materia orgánica. El estudio de Morillo et al.⁶⁸ afirman que los cultivos hidropónicos disminuyen la materia orgánica en un 50% aproximadamente gracias a la actividad metabólica de los microorganismos, los cuales, estimulados por la aireación, utilizan la materia orgánica como sustrato; este proceso convierte la hidroponía en un sistema de pulimento para aguas residuales.

Según Ramos y Jaramillo⁶⁹, reportan que los demás parámetros como es el caso de los compuestos nitrogenados, se encuentran dentro de los rangos recomendados para el cultivo de tilapia.

5.2 CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS

El análisis de varianza demostró que no existe una diferencia significativa en los diferentes sólidos (totales, volátiles, fijos, suspendidos y disueltos) entre los tratamientos, con un nivel del 95% de confianza.

La mayor concentración de ST obtenidos (305 mg/L, Figura 9) son menores al compararlos con el estudio de Possas⁷⁰, el cual evaluó un sistema de recirculación con una carga de 1129 L/kg obteniendo valores de ST de 401 mg/L, a pesar de cómo se puede observar en el presente trabajo se utilizó una carga mayor de kg de peso vivo/m³.

El sistema presentó un valor máximo para sólidos suspendidos de 43 mg/L (Figura 12) en los NFT, en relación a este parámetro Timmons⁷¹, sugiere que las concentraciones de SST deben estar en un rango de 20 a 40 mg/L como valor seguro en sistemas de recirculación, sin embargo, según este mismo autor se ha cultivado tilapia en sistemas que sobrepasan los 100 mg/L de SST; según lo anterior se estima que los valores de la presente investigación son aceptables y favorables para el cultivo de la especie. En este mismo sentido Possas⁷² reporta valores para sólidos suspendidos entre 26 mg/L y 40 mg/L, ratificando la coherencia de los valores presentados.

⁶⁸ MORILLO, Gustavo; ORTEGA, Belkys; ARAUJO, Ismenia; ISEA, Daisy; ANGULO, Nancy y VARGAS, Luis. Utilización de aguas residuales tratadas en cultivos hidropónicos de pimentón, *Capsicum annum* L. Centro de Investigación del Agua, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela. Volumen 17 N° 1, January - March 2009. p. 98-106.

⁶⁹ RAMOS, E. y JARAMILLO, MC. Op. cit., p. 83.

⁷⁰ POSSAS, Cassiano. Desempeño de un sistema de tratamiento de efluentes de acuicultura: en recirculación como una alternativa sustentable. Porto Alegre. 2010. p.47-51. Programa de posgrados. Universidad Federal Rio Grande del Sur. Master en recursos hídricos y saneamiento ambiental.

⁷¹ TIMMONS, 2002. Op. cit. p. 159

⁷² Ibid., p. 47-51

Para los diferentes tratamientos en esta investigación se registraron concentraciones de SD (mg/L) así: T₀ (159,72), T₁ (172,22), T₂ (169,72) y T₃ (172,94), valores que se encuentran por debajo del rango sugerido por Rakocy et al.⁷³ quien afirma que para un sistema acuapónico, se deben alcanzar mínimos de SD entre 200 - 400 mg/L para que se produzcan buenos resultados. El mismo autor agrega que si se alcanzaran niveles de SD próximos a 2000 mg/L, se deben tomar medidas como aumentar la tasa de recambio de agua, reducir la densidad de peces y la tasa de alimentación y aumentar la superficie aérea de crecimiento de plantas, lo cual para esta investigación no fue necesario teniendo un sistema acuapónico estable.

Por lo anterior, el análisis y discusión de los resultados con llevan a las reflexiones emitidas por la FAO⁷⁴, al mencionar que los sólidos interfieren en el crecimiento de las plantas y crean puntos anaerobios por procesos de mineralización en el sistema. Además un beneficio de este proceso se da por la acción de los microorganismos que los descomponen, existe evidencia que los consorcios microbianos compiten con patógenos en las raíces de las plantas y esto ayuda a mantener las raíces saludables (Timmons)⁷⁵.

El análisis de los picos arrojados de las pruebas 3 y 4, produjeron sólidos que se acumularon en el biofiltro, los cuales pudieron causar un alto consumo de oxígeno afectando el proceso de nitrificación como lo reporta Ramos y Jaramillo⁷⁶. Además, se desarrolló una capa de biopelícula microbiana en la malla del biofiltro, de acuerdo con Timmons⁷⁷ esto podría tener relación con bacterias filamentosas que aparecen por el alto contenido de materia orgánica disuelta en el agua.

5.3 CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS Y EFICIENCIA DE REMOCIÓN

5.3.1 Retención Hidráulica. En el transcurso de la investigación se registraron tiempos de retención de 27 minutos en el tanque de cultivo, 6 minutos en el clarificador, 11 minutos en el biofiltro y 13 minutos en los tubos de NFT. Rakocy⁷⁸, recomienda un lapso de retención de no menos de 20 minutos en las unidades clarificadoras, para el resultado de la eliminación más efectiva de los sólidos sedimentables.

⁷³ Rakocy et al. Op. cit., p. 1-15

⁷⁴ FAO. Op, cit.

⁷⁵ Ibid., p. 630

⁷⁶ RAMOS, E. y JARAMILLO, MC. Op. cit., p. 83.

⁷⁷ TIMMONS et al., p. 630

⁷⁸ CANDARLE, Pablo. Técnicas de Acuaponía. Centro Nacional de Desarrollo Acuícola (CENADAC). Argentina. 2006. p.34.

En el estudio de López y Martínez⁷⁹ se evaluaron 5 tiempos de retención hidráulica en un sistema acuapónico con un clarificador de 250 L, cuatro filtros físicos de 100 L y un filtro biológico de 400 L, he indican que no existen diferencia en el crecimiento de los peces en esté sistema. Sin embargo en el estudio de Zuluaga y Martínez⁸⁰, determina que el TRH afecta de forma directa a la capacidad de absorción por parte de las plantas; resultando que el mayor tiempo dentro del sistema permite a las plantas un mayor contacto con el agua, dejando que absorban más cantidad de compuestos aprovechables, por lo cual, la calidad del agua se puede controlar con el TRH en el sistema de filtración.

5.3.2 Remoción de sólidos. La eficiencia de remoción global de ST obtenida en la investigación (20,94%) se encuentran por debajo de los valores reportados por Cárdenas⁸¹ de 40,16%, quien utilizó un sistema de filtración más complejo, además el estudio de Sánchez citado por el mismo autor reporta 34,01% quien utilizo un decantador convencional.

La eficiencia de remoción de SV fue del 17,92% siendo mayor al valor obtenido por Cárdenas⁸² de 16,83%, esto se pudo dar a que las plantas sirven como filtro biológico para estos sólidos. Timmons⁸³ afirma que cierta acumulación de sólidos es beneficiosa ya que al descomponerse esta materia incrementa los niveles de ciertos nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas. Sánchez⁸⁴ en su estudio con un clarificador convencional obtuvo un valor de 21,10%, este valor se pudo deber a la acumulación de sólidos en el clarificador y la permanencia de ellos.

En el sistema acuapónico la mejor eficiencia de remoción se dio en SS con un valor de 56,40%, este porcentaje es mayor que el 49,94% alcanzado por el SRA de Cárdenas⁸⁵, pero menor al sistema reportado por Sánchez⁸⁶ con el 64,45%. Timmons y Ebeling⁸⁷, afirma que las altas eliminaciones cobran relevancia ya que

⁷⁹ LÓPEZ, Daniela y MARTÍNEZ, Rosario. Determinación del TRH para el crecimiento de lechugas en sistemas acuapónicos, resultados preliminares (2). Vol. 2 No. 1, México. Verano de la Investigación Científica, 2016. p. 1439 - 1443

⁸⁰ ZULUAGA, Néstor. y MARTÍNEZ, Rosario. Capacidad de absorción de amonio de plantas acuáticas como filtros biológicos en sistemas acuapónicos. Vol. 3 no. 2, México. Verano de la Investigación Científica, 2017. p. 112 – 116.

⁸¹ CÁRDENAS, G; SÁNCHEZ, I; MAYA, J y SOLARTE, A. Remoción de sólidos en aguas residuales de producción intensiva de trucha en un sistema de recirculación cerrado. Revista UNIMAR, 33(1), 2015. p. 229-236.

⁸² Ibid., p. 234

⁸³ TIMMONS et al., Op cit., p 804

⁸⁴ SÁNCHEZ, Iván. Remoção de nitrogênio de água residuária de produção intensiva de tilápias com recirculação utilizando reator de leito fluidizado com circulação em tubos concêntricos. UNESP, Mestre em Engenharia Civil – Ênfase em Recursos Hídricos e Tecnologías Ambientais. 2009. p.127-131

⁸⁵ Ibid., p. 234

⁸⁶ Ibid., p.127-131

⁸⁷ TIMMONS et al., p. 630

los sólidos suspendidos son un ítem de principal importancia desde la perspectiva de la producción de residuos y del impacto ambiental producido por la acuicultura.

Los diferentes componentes del sistema contribuyeron a la remoción de sólidos; el clarificador removió en gran parte los sólidos de mayor diámetro como son los sedimentables y el biofiltro aportó a la remoción de SS. Para SD la mayor remoción se encontró en los tratamientos NFT.

Algunos autores como Maigual et al.,⁸⁸, afirman que los sedimentadores de flujo ascendente logran sortear muchos de los problemas hidráulicos que presentan los sedimentadores de flujo horizontal, además, las trayectorias de sedimentación de las partículas pueden ser alteradas por cambios de temperatura o por movimientos superficiales en la masa líquida.

5.4 VARIABLES PRODUCTIVAS Y EFICIENCIA NUTRICIONAL

Se tuvo incrementos positivos en las variables productivas, obteniendo una ganancia de peso de 77,4 gr y un incremento de talla de 3,6 cm promedio en el periodo de estudio. Meyer y Trimino⁸⁹, afirman que el crecimiento de los peces depende de un número de factores incluyendo potencial genético, temperatura, densidad de siembra y calidad de los alimentos.

Durante el periodo de estudio se obtuvo una sobrevivencia del 100% con el total de 25 animales de tilapia roja; teniendo en cuenta los niveles reportados por la FAO⁹⁰ en sistemas de recirculación que varían de 60 a 120 kg/m³, en este estudio se realizó con una carga de 10 kg/m³, debido a que es un modelo experimental para encontrar un equilibrio entre peces y plantas.

El promedio de tasa de crecimiento fue de 0,76 % lo cual se encuentra en los rangos reportados por Aguilar F. et al.,⁹¹, afirmando que la tasa de crecimiento para tilapia (*Oreochromis niloticus*) a lo largo de un ciclo comercial (6 meses) de producción para juveniles es de 3,38%, para levante de 1,32% y finalización de 0,43%. Arce⁹² afirma

⁸⁸ MAIGUAL, Y. Op. cit., 3498

⁸⁹ TRIMINIO., S.A; MOLNAR, J; MEYER, D y TOLLNER. E. Tilapia fingerling production in Honduras. Journal of Applied Aquaculture. 2007. 19(2): p. 1-27.

⁹⁰ FAO. Op. cit, p. 8

⁹¹ AGUILAR, F; AFANADOR, G y MUÑOZ, A. Efecto del procesamiento de la dieta sobre el desempeño productivo de la tilapia nilotica (*Oreochromis niloticus* var. Chitralada) en un ciclo comercial de producción. Departamento de Ciencias para la Producción Animal. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 2010, 57 (II)

⁹² ARCE, José. Determinación de la tasa de alimentación para tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*, Linnaeus, 1759) en condiciones comerciales corregida por el Coeficiente Térmico de Crecimiento. Título de Grado: Licenciatura en Ingeniería Agronómica con énfasis en Zootecnia. Costa Rica. Universitaria Rodrigo Facio. 2014. p. 1-69.

que a causa de cambios de temperatura el animal determinará el pronóstico de su crecimiento y ajuste respectivo de la tasa de alimentación.

El factor de conversión alimenticia (FCA) fue de 2,4 y una eficiencia alimenticia (EA) del 42 % en general. Llanes et al.⁹³ reportan una FCA superior a 3.6 en alevines de tilapia roja (*Oreochromis sp*) alimentados con dietas con 40 % de ensilaje de pescado durante 60 días. Según Giraldo citado por Jaramillo y Ramos⁹⁴ este valor se pudo deber a las condiciones de calidad de agua tales como temperatura, oxígeno presentaron cambios bruscos en periodos de 24 horas generando estrés en los animales y disminuyendo como consecuencia la eficiencia.

Al inicio de la investigación se tuvo un FCA de 1,45 con una EA de 69%, cuyo valor fue mejor según lo reporta Espejo & Torres citado por Martínez et al.,⁹⁵ quien afirma que un FCA óptimo para el cultivo de tilapia es de 1,6 a 1,9; además para Diana et al., citado por el mismo autor un promedio de FCA aceptable en el cultivo de peces tropicales oscila entre 1.01 – 1,6 para tilapia de Nilo.

5.5 ANÁLISIS PARCIAL DE COSTOS

Según Pedroza y Criado⁹⁶, en su estudio de implementación de un cultivo acuapónico, obtuvieron una relación de 6 el cual es un indicador favorable, en esta investigación se tuvo un valor general de 1 en los respectivos tratamientos, lo cual significa que este estudio está en punto de equilibrio, ya que cada peso invertido se gana \$1.

En el estudio de Iriarte et al.,⁹⁷ obtuvieron un valor promedio de 1,15 para beneficio costo, el cual es un valor congruente con la finalidad y objetivo del sistema. Según la FAO citado por el mismo autor la acuaponía funciona bien en lugares donde el suelo es pobre y el agua es escasa.

Según Aguilera et al.,⁹⁸, la transferencia al ámbito productivo familiar permitirá aprovechar sus características técnicas y operativas de acuerdo a las necesidades,

⁹³ LLANES, José; TOLEDO, José y LAZO DE LA VEGA, José. Tecnología de producción de alimento semi-húmedo a base de ensilados de residuos pesqueros en la alimentación de tilapia roja (*Oreochromis mossambicus x Oreochromis niloticus*). 2007. Rev. Electrónica Vet. 9:1–6

⁹⁴ RAMOS, E. y JARAMILLO, MC. Op. cit., p. 79.

⁹⁵ MARTÍNEZ, et al., Op. cit., p. 59

⁹⁶ PEDROZA, José y CRIADO, Katherine. ESTUDIO DE FACTIBILIDAD E IMPLEMENTACIÓN DE UN CULTIVO ACUAPÓNICO EN EL MUNICIPIO DE OCAÑA, NORTE DE SANTANDER. Trabajo de Grado: Administrador de Empresas. Francisco de Paula Santander Ciencias Administrativas y económicas. Ocaña - Colombia 2016. p. 104.

⁹⁷ IRIARTE, Fernando; MENDOZA, Manuel; GÓMEZ, Regino; VAN DER WAL, Hans y PERERA, Martha. Viabilidad técnica-financiera de un Sistema Acuapónico de Baja Intensidad (SABI) para la seguridad alimentaria familiar. México. Academia Journals 2017. vol. 3. p. 1429-1434.

⁹⁸ AGUILERA, Martha. HERNÁNDEZ, Fabiola. MENDIETA, Edmundo. y HERRERA, César. Producción integral sustentable de alimentos. Ra Ximhai, vol. 8, Número 3. 2012. p. 71-7

alimentarias y nutricionales así como a las oportunidades económicas y de producción que los grupos familiares requieran, en tiempo y cantidad. Proporcionando alimentos disponibles siempre con los requerimientos nutrimentales básicos como proteínas, vitaminas y minerales; con las especies cultivadas mejorando así la calidad de vida de las personas.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- La remoción de sólidos en el sistema acuapónico fue eficiente disminuyendo las concentraciones, permitiendo el buen funcionamiento de este.
- Según el análisis de varianza no existieron diferencias significativas de la remoción de sólidos en los respectivos tratamientos, compuesto por los diferentes sustratos y teniendo en cuenta los costos, sería adecuado manejar el tratamiento 0 (sin sustrato).
- El sistema tuvo la mejor eficiencia de remoción por parte de sólidos suspendidos, donde se removió más del 50%; se concluye que el sistema de filtración fue efectivo para esta clase de sólidos los cuales son los que causan mayor inconveniente en los SRA.
- El sistema acuapónico es una buena alternativa para realizar la degradación de cargas contaminantes presentes en los SRA siendo sustentable y amigable para el medio ambiente.
- Al manejar una carga de 10 kg/m^3 se tuvieron excelentes resultados en la sobrevivencia (100%); esto se ve reflejado en las variables productivas cuyos valores se encuentran en los rangos de los ciclos comerciales.
- La relación costo beneficio obtenido indica que el sistema se encuentra en un punto de equilibrio. Adicional a esto la acuaponía demuestra que es una tecnología alternativa viable para ahorro del recurso hídrico en la producción de alimento de calidad y alto valor nutritivo, además es viable para el mantenimiento de organismos acuáticos y plantas.

6.2 RECOMENDACIONES

- Aumentar el tiempo de retención hidráulica en el clarificador y biofiltro (>20 minutos), para obtener mejores eficiencias por parte de los diferentes componentes del sistema acuapónico y una mejor absorción de nutrientes para las hortalizas.
- Incorporar al diseño del biofiltro y clarificador una llave en la base para realizar lavados, con el fin de mejorar el manejo y control de los sólidos que se puedan almacenar en este componente.
- Para la disminución de costos por parte de energía eléctrica, se recomienda utilizar una electrobomba de caudal o bombas Air Lift.
- Diseñar un ambiente del sistema acuapónico que no permita fluctuaciones altas de temperatura para las unidades de cultivo (lechuga y tilapia), teniendo en cuenta el valor requerido por la especie, bajo las condiciones del experimento.
- Debido a que no existieron diferencias con respecto a los tipos de sustratos, se recomienda dejar la raíz de las plantas libres (sin sustrato) para una disminución de costos.

BIBLIOGRAFÍA

- AGUILAR, F; AFANADOR, G y MUÑOZ, A. Efecto del procesamiento de la dieta sobre el desempeño productivo de la tilapia nilotica (*Oreochromis niloticus* var. Chitralada) en un ciclo comercial de producción. En: Rev. Med. Vet. Zoot., Volumen 57, Issue 2. Bogotá. 2010. p. 104-118.
- AGUILERA, Martha; HERNÁNDEZ, Fabiola; MENDIETA, Edmundo. y HERRERA, César. Producción integral sustentable de alimentos. En: Ra Ximhai, vol. 8, Número 3. 2012. p. 71-7
- ARCE, José. Determinación de la tasa de alimentación para tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*, Linnaeus, 1759) en condiciones comerciales corregida por el Coeficiente Térmico de Crecimiento. Título de Grado (Licenciatura en Ingeniería Agronómica con énfasis en Zootecnia). Costa rica. Universitaria Rodrigo Facio. 2014. p. 1-69.
- AUNAP. Diagnóstico del estado de la acuicultura en Colombia. Editorial: Bogotá. 2013. p 135
- . Plan Nacional para el Desarrollo de la Acuicultura Sostenible en Colombia – PlaNDAS. Bogotá D.C, 2014, p 7
- BARDACH, John; RYTHER, John y MCLARNEY, William. Acuicultura Crianza y cultivo de organismos marinos y de agua dulce. México: Editor, S.A. 1990. 741.p. ISBN 968-463-022-0
- BELTRANO, José y GIMENEZ, Daniel. Cultivo en hidroponía. En: edulp. Argentina. 2015. p. 2-181.
- BIJO, Pada. Feasibility study of a recirculation aquaculture system. En: Reykjavik, Iceland. 2007; p. 10-13
- BREGNBALLE, Jacob. A Guide to Recirculation Aquaculture: An introduction to the new environmentally friendly and highly productive closed fish farming systems. FAO; Eurofish International Organization. 2015. p 100. Disponible en internet: <http://www.fao.org/3/a-i4626e.pdf>
- CALDERÓN, Felipe. y CEVALLOS, Francisco. Los sustratos. Bogotá: Calderón Laboratorios Ltda; 2002. p. 20.
- CANDARLE, Pablo. Técnicas de Acuaponía. Centro Nacional de Desarrollo Acuícola (CENADAC). Argentina. 2006. p.34.

CÁRDENAS, G; SÁNCHEZ, I; MAYA, J. y SOLARTE, A. Remoción de sólidos en aguas residuales de producción intensiva de trucha en un sistema de recirculación cerrado. En: Revista UNIMAR, 33(1), 2015. p. 229-236.

COLAGROSSO, Alessandro. Instalación y manejo de sistemas de cultivo acuapónicos a pequeña escala. Costa Rica, 2014. p 1-51

CONABIO. Sistema de Información de Organismos Vivos Modificados (SIOVM), Proyecto GEF-CIBIOGEM de Bioseguridad. Disponible en Internet: http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/bioseguridad/pdf/21940_sg7.pdf

DEDIU, Lorena; CRISTEA, Víctor; DOCAN, Angélica y VASILEAN, Ion. Evaluation of condition and technological performance of hybrid bester reared in standrad and aquaponic system. En: AACL Bioflux. Vol. 4, No 4 (2011); p490-498.

FAJARDO, Sergio. Modelo tecnológico para el cultivo de lechuga bajo buenas prácticas agrícolas en el oriente antioqueño. Medellín; Fotomontajes S.A.S, 2016. p 11-24. Disponible en internet: <http://conectarural.org/sitio/sites/default/files/documentos/MANUAL%20DEL%20CULTIVO%20DE%20LA%20LECHUGA.pdf>

FAO. El estado mundial de la pesca y la acuicultura. Contribución a la seguridad alimentaria y la nutrición para todos. 2016. Roma. 224 pp. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i5555s.pdf>

FEDEACUA. Producción de la acuicultura colombiana 2004 – 2014.

GARCÍA, Daury; GALLEGU, Iván; DÍAZ, Carlos; FALL, Cheikh y BURROLA, Cristina. Evaluación de un sistema de recirculación y acondicionamiento de agua en truticultura. Universidad Autónoma del Estado de México. Tecnología y Ciencias del Agua, antes Ingeniería hidráulica en México, vol. II, núm. 2, abril-junio de 2011. p. 83-96.

HUET, Marcel. Tratado de piscicultura. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 1998. 749 p. ISBN 847- 50-9854-1c

IDEAM y MAYDT. Sólidos suspendidos totales en agua secados a 103 – 105 °C. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/S%C3%B3lidos+Totales+secados+a+103+-+105%C2%BAC..pdf/d4faab4a-34e4-4159-bf4c-50353b101935>

IRIARTE, Fernando; MENDOZA, Manuel; GÓMEZ, Regino; VAN DER WAL, Hans y PERERA, Martha. Viabilidad técnica-financiera de un Sistema Acuapónico de Baja Intensidad (SABI) para la seguridad alimentaria familiar. México. Academia Journals 2017. vol. 3. p. 1429-1434.

JIMÉNEZ, Alberto. Sistemas de recirculación en acuicultura. una visión y retos diversos para Latinoamérica. Disponible en Internet: http://www.industriaacuicola.com/PDFs/Sistemas_de_recirculacion.pdf

LENNARD, Wilson y LEONARD Brian. A comparison of three different hydroponic sub-systems (gravel bed, floating and nutrient film technique) in an aquaponics test system. En: Aquaculture International. 2006. vol. 14, p. 539–550

LIÑAN, Wilbert. 2007. Crianza de tilapia, Lima: Editora Macro EIRL. 42 p

LLANES, José; TOLEDO, José y LAZO DE LA VEGA, José. Tecnología de producción de alimento semi-húmedo a base de ensilados de residuos pesqueros en la alimentación de tilapia roja (*Oreochromis mossambicus* x *Oreochromis niloticus*). 2007. En: Rev. Electrónica Vet. 9:1–6

LÓPEZ, Daniela y MARTÍNEZ, Rosario. DETERMINACIÓN DEL TRH PARA EL CRECIMIENTO DE LECHUGAS EN SISTEMAS ACUAPÓNICOS, RESULTADOS PRELIMINARES (2). Vol. 2 No. 1, Verano de la Investigación Científica, 2016. p. 1439 - 1443

MAIGUAL, Yemall; SÁNCHEZ, Iván y MATSUMOTO, Tsunao. Desempeño de tanques decantadores de sólidos en un sistema de recirculación para producción de tilapia. En: Revista Mvz Córdoba. 2013. vol. 18(2). pag. 3492-3500.

MARÍN, Mario. Manual de Producción de Tilapia, Puebla: Secretaria de Desarrollo Rural del Estado de Puebla, 2007. p 12. Disponible en internet: <http://es.slideshare.net/JCAMILOMOR/manual-de-produccion-de-tilapia>

MARTÍNEZ, Víctor y MENDOZA, Wilber. Comportamiento del crecimiento de juveniles de tilapia *Oreochromis niloticus*, utilizando alimento comercial: para tilapia al 28% vs para camarón al 30%. Trabajo de grado: Ingeniero Acuícola. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua. Facultad de Ciencias y tecnología. Nicaragua. 2015. p. 59

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 631 DE 2015. (marzo 17). Parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. Disponible en: https://docs.supersalud.gov.co/PortalWeb/Juridica/OtraNormativa/R_MADS_0631_2015.pdf

MORALES DÍAZ, Armando. Biología, cultivo y comercialización de la tilapia. México D.F: AGT. Editor, S.A. 2004. p. 4-12

MORILLO, Gustavo; ORTEGA, Belkys; ARAUJO, Ismenia; ISEA, Daisy; ANGULO, Nancy y VARGAS, Luis. Utilización de aguas residuales tratadas en cultivos hidropónicos de pimentón, *Capsicum annum* L. En: Centro de Investigación del Agua. Venezuela. Volumen 17 N° 1. 2009. p. 98-106.

MUÑOZ, Mario. Sistemas de recirculación acuapónicos. En: Informador Técnico (Colombia) Edición 76, (Ene - Dic 2012); p. 123 – 129.

NELSON, RL. Acuaponía. Nelson/Pade Multimedia. En: Monti-Ilo, WI. USA. 2007

NICOVITA. MANUAL DE CRIANZA TILAPIA. Disponible en internet:
<http://www.industriaacuicola.com/biblioteca/Tilapia/Manual%20de%20crianza%20de%20tilapia.pdf>

ONTIVEROS, Martha. Sistema de Producción Acuapónicos de Traspatio. México, 2013; p. 86. Trabajo de Grado (Licenciada en Diseño Industrial). Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería.

PEDROZA, José y CRIADO, Katherine. Estudio de factibilidad e implementación de un cultivo acuapónico en el municipio de ocaña, norte de santander. Trabajo de Grado: Administrador de Empresas. Francisco de Paula Santander Ciencias Administrativas y económicas. Colombia 2016. p. 104.

PEÑUELAS, Ofelda; ARELLANO, Maritza; MUNGARRO, Catalina; GÓMEZ, Gilberto. y VERDUGO, Edgar. Sistemas integrados agro-acuícolas para la producción de tomate: experiencias del cuerpo académico de Biotecnología Agrícola. En Pizá, R., González, M. y Beristáin, J. (Comp.). Avances de Investigación de Cuerpos Académicos. México: ITSON. 2013. p. 9-20.

PINEDA, Hermes; ZULUAGA, Carlos y VERTEL, Diego. Evaluación de la morfometría y el hábito alimenticio en tilapia roja (*Oreochromis sp*) y tilapia nilótica (*Oreochromis niloticus var. chitralada*) bajo diferentes condiciones de manejo en dos granjas piscícolas del occidente antioqueño. Medellín, Colombia: Revista Politécnica. 2012. p. 98.

POOT, Carlos. NOVELO, Rafael y HERNÁNDEZ, Mizar. Cultivo integral de la Tilapia. Centro de Estudios Tecnológicos del Mar 02 en Campeche y Fundación Produce Campeche, A. C. 2009. Disponible en:
<https://es.scribd.com/doc/55367067/20458321-ABC-en-El-Cultivo-Integral-de-La-Tilapia>

POSSAS, Cassiano. Desempeño de un sistema de tratamiento de efluentes de acuicultura: en recirculación como una alternativa sustentable. Porto Alegre. 2010. p.47-51. Trabajo de grado: Master en recursos hídricos y saneamiento ambiental.

RAKOCY, James; MASSER, Michael y LOSORDO, Thomas. Recirculating aquaculture tank production systems: aquaponics – integrating fish and plant culture. En: SRAC Publication No 454. 2006. p 1-15

RAMÍREZ, Diego; SABOGAL, Daniel; GOMEZ, Edwin; RODRÍGUEZ, Daniel y HURTADO, Hernán. MONTAJE Y EVALUACIÓN PRELIMINAR DE UN SISTEMA ACUAPÓNICO GOLDFISH – LECHUGA. 2009. p 154-170

RAMÍREZ, Diego; SABOGAL, Daniel; JIMÉNEZ, Pedro y HURTADO, Hernán. La acuaponía: una alternativa orientada al desarrollo sostenible. En: Revista Facultad de Ciencias Básicas Universidad militar Nueva Granada. 2008. vol 4, no. 51, p 32-51.

RAMOS, Edwin y JARAMILLO, María. Evaluación de la remoción de compuestos nitrogenados de un sistema acuapónico compuesto por tilapia y lechuga utilizando tres tipos de sustratos (turba comercial, grava, cascarilla de arroz), bajo condiciones de invernadero en la granja experimental botana, municipio de pasto. Trabajo de grado: Ingeniero en Producción Acuícola. Facultad de Ciencias Pecuarias. Pasto – Nariño. 2018. p. 68.

SAGPyA. Los sistemas cerrados de recirculación en piscicultura, 2006. Disponible en Internet: http://www.produccion-animal.com.ar/produccion_peces/piscicultura/36-sistemas_cerrados_de_recirculacion.pdf

SÁNCHEZ, Iván. remoção de nitrogênio de água residuária de produção intensiva de tilápias com recirculação utilizando reator de leito fluidizado com circulação em tubos concêntricos. UNESP, Mestre em Engenharia Civil – Ênfase em Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais. 2009. p.127-131

SOLARTE, Carlos; GARCÍA, Hernán A y IMUEZ, Marco. Bioestadística: Aplicaciones en producción y salud animal, San Juan de Pasto: Editorial Universitaria – Universidad de Nariño, 2009. p 304

SORIA, José. 6° curso de hidroponía básica para principiantes. Hidroponía y acuarística del caribe 2012. Disponible en Internet: http://www.asohofrucol.com.co/archivos/biblioteca/biblioteca_247_Curso%20Hidropon%C3%ADa%20Basica.pdf

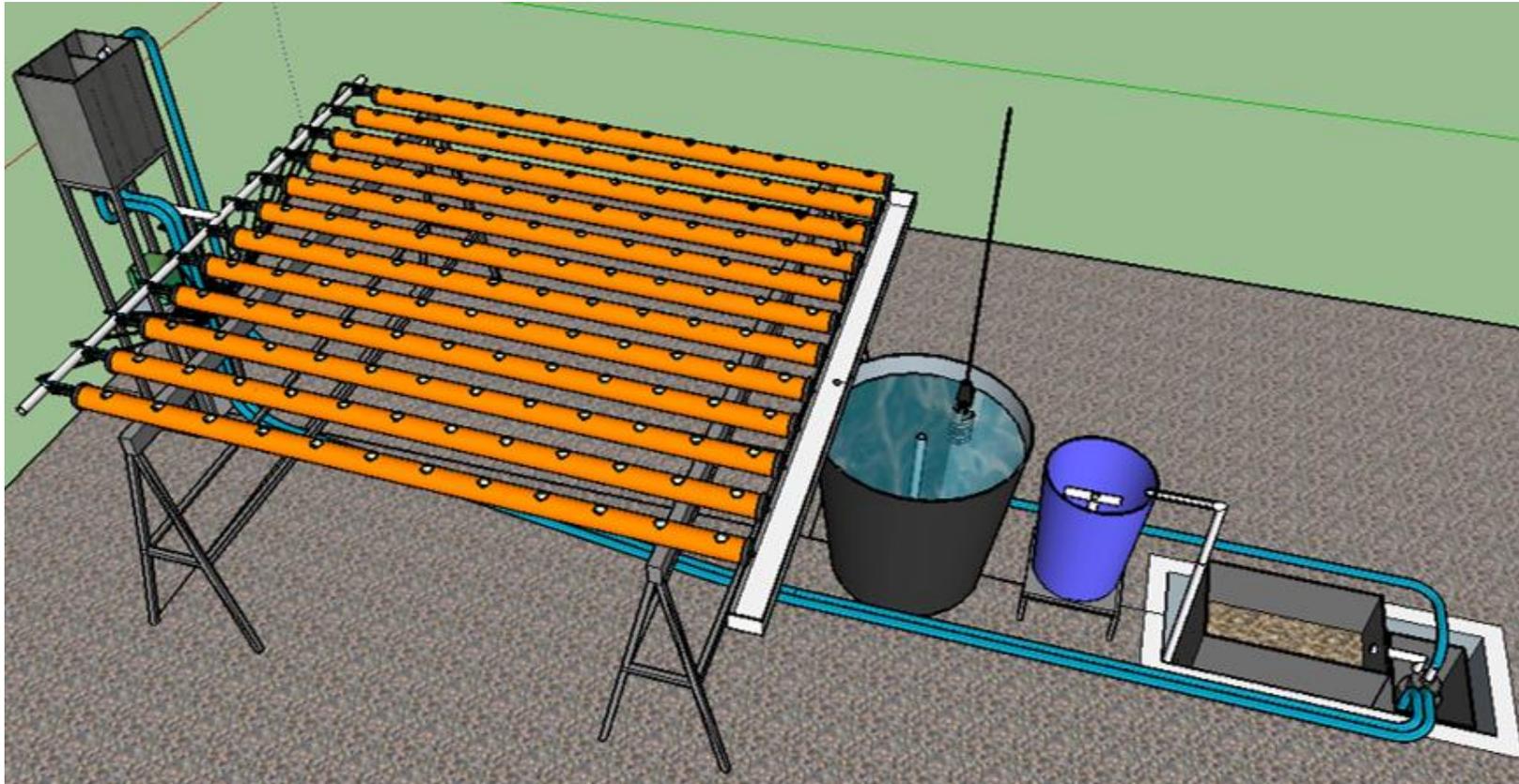
TIMMONS, M.B; EBELING, J.M; WHEATON, F.W; SUMMERFELT, S.T y VINVI, B.J (eds.). Sistemas de Recirculación para la Acuicultura. Fundación Chile: Quebecor World Chile S.A, 2002. p. 6-7.

TRIMINIO., S.A; MOLNAR, J; MEYER, D y TOLLNER. E. 2007. Tilapia fingerling production in Honduras. Journal of Applied Aquaculture 19(2):1-27.

ZULUAGA, Néstor. y Martínez, Rosario. CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE AMONIO DE PLANTAS ACUÁTICAS COMO FILTROS BIOLÓGICOS EN SISTEMAS ACUAPÓNICOS. Vol. 3 no. 2, Verano de la Investigación Científica, 2017. p. 112 – 116.

ANEXOS

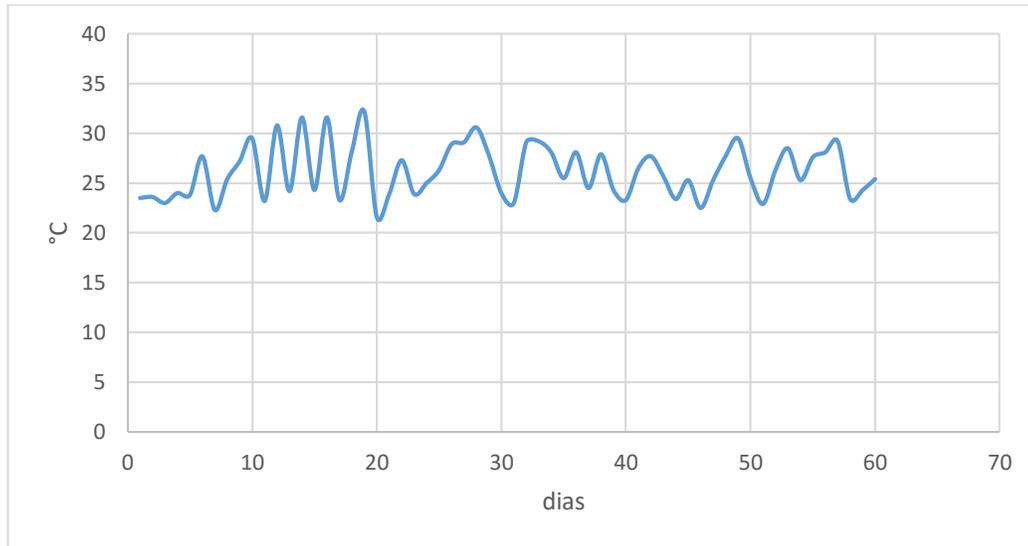
Anexo A. Diseño del sistema acuapónico experimental



Anexo B. Variaciones en el comportamiento de la temperatura (°C) durante el periodo de estudio.

| Días | Temperatura (°C) | Días | Temperatura (°C) |
|-------------------|-------------------------|-------------|-------------------------|
| 1 | 23,5 | 31 | 23,0 |
| 2 | 23,6 | 32 | 29,1 |
| 3 | 23,0 | 33 | 29,2 |
| 4 | 24,0 | 34 | 28,1 |
| 5 | 23,8 | 35 | 25,5 |
| 6 | 27,7 | 36 | 28,1 |
| 7 | 22,3 | 37 | 24,5 |
| 8 | 25,4 | 38 | 27,9 |
| 9 | 27,2 | 39 | 24,3 |
| 10 | 29,5 | 40 | 23,3 |
| 11 | 23,2 | 41 | 26,5 |
| 12 | 30,8 | 42 | 27,7 |
| 13 | 24,2 | 43 | 25,7 |
| 14 | 31,6 | 44 | 23,4 |
| 15 | 24,3 | 45 | 25,3 |
| 16 | 31,6 | 46 | 22,5 |
| 17 | 23,3 | 47 | 25,3 |
| 18 | 28,2 | 48 | 27,7 |
| 19 | 32,2 | 49 | 29,5 |
| 20 | 21,6 | 50 | 25,5 |
| 21 | 23,9 | 51 | 22,9 |
| 22 | 27,3 | 52 | 26,3 |
| 23 | 23,9 | 53 | 28,5 |
| 24 | 25,0 | 54 | 25,3 |
| 25 | 26,3 | 55 | 27,6 |
| 26 | 28,9 | 56 | 28,1 |
| 27 | 29,1 | 57 | 29,2 |
| 28 | 30,6 | 58 | 23,4 |
| 29 | 27,8 | 59 | 24,3 |
| 30 | 24,0 | 60 | 25,4 |
| Promedio | | 26,26 | |
| Desviación | | 3,08 | |

Comportamiento de la temperatura en la unidad de cultivo



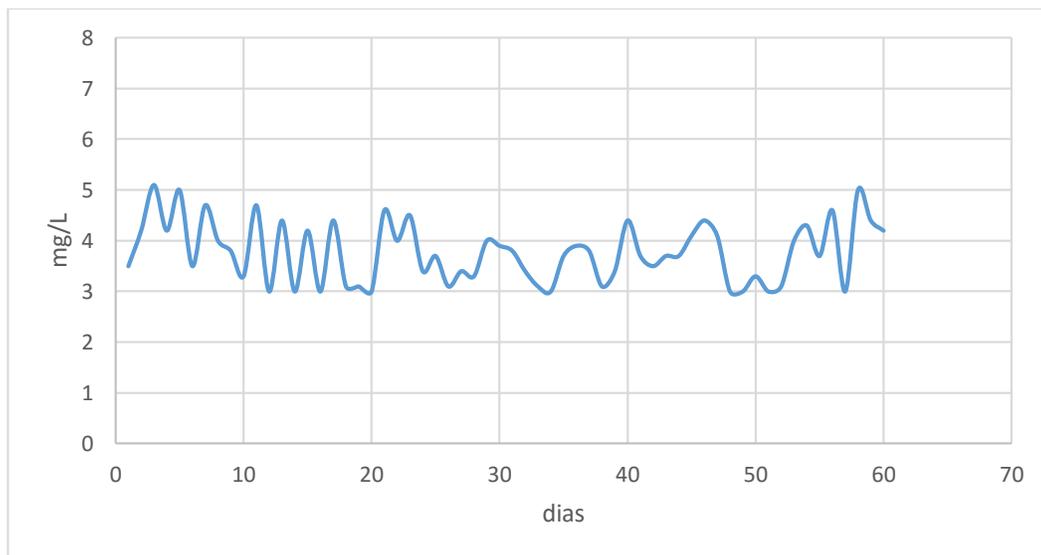
Fuente: Jaramillo, M y Ramos, E. 2018

Anexo C. Variaciones en el comportamiento del oxígeno disuelto (OD) durante el periodo de estudio.

| Días | Oxígeno (mg/L) | Días | Oxígeno (mg/L) |
|------|----------------|------|----------------|
| 1 | 3,5 | 31 | 3,8 |
| 2 | 4,2 | 32 | 3,4 |
| 3 | 5,1 | 33 | 3,1 |
| 4 | 4,2 | 34 | 3,0 |
| 5 | 5,0 | 35 | 3,7 |
| 6 | 3,5 | 36 | 3,9 |
| 7 | 4,7 | 37 | 3,8 |
| 8 | 4,0 | 38 | 3,1 |
| 9 | 3,8 | 39 | 3,4 |
| 10 | 3,3 | 40 | 4,4 |
| 11 | 4,7 | 41 | 3,7 |
| 12 | 3,0 | 42 | 3,5 |
| 13 | 4,4 | 43 | 3,7 |
| 14 | 3,0 | 44 | 3,7 |
| 15 | 4,2 | 45 | 4,1 |
| 16 | 3,0 | 46 | 4,4 |
| 17 | 4,4 | 47 | 4,1 |

| | | | |
|-------------------|-----|--------------|-----|
| 18 | 3,1 | 48 | 3,0 |
| 19 | 3,1 | 49 | 3,0 |
| 20 | 3,0 | 50 | 3,3 |
| 21 | 4,6 | 51 | 3,0 |
| 22 | 4,0 | 52 | 3,1 |
| 23 | 4,5 | 53 | 4,0 |
| 24 | 3,4 | 54 | 4,3 |
| 25 | 3,7 | 55 | 3,7 |
| 26 | 3,1 | 56 | 4,6 |
| 27 | 3,4 | 57 | 3,0 |
| 28 | 3,3 | 58 | 5,0 |
| 29 | 4,0 | 59 | 4,4 |
| 30 | 3,9 | 60 | 4,2 |
| Promedio | | 3,78 | |
| Desviación | | 0,597 | |

Comportamiento del oxígeno en la unidad de cultivo



Fuente: Jaramillo, M y Ramos, E. 2018

Anexo D. Comportamiento por periodo y promedio de la DBO₅ y la DQO en la unidad de cultivo.

| Periodo | Unidad de cultivo | |
|-----------------|-------------------|------------------|
| | DQO | DBO ₅ |
| 1 | 30 | 5,53 |
| 2 | 28 | 5,16 |
| 3 | 33 | 6,08 |
| 4 | 20 | 4,24 |
| Promedio | 27,75 | 5,25 |

Anexo E. Datos de las concentraciones y promedios de los sólidos tomados a la salida de cada tratamiento.

| | Réplica | Pruebas | T ₀ | T ₁ | T ₂ | T ₃ |
|------------------------|---------|---------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Sólidos Totales | 1 | 1 | 200 | 230 | 250 | 230 |
| | 1 | 2 | 240 | 280 | 300 | 280 |
| | 1 | 3 | 190 | 150 | 200 | 190 |
| | 1 | 4 | 150 | 130 | 160 | 155 |
| | 1 | 5 | 200 | 270 | 210 | 230 |
| | 1 | 6 | 160 | 130 | 110 | 130 |
| | 2 | 1 | 240 | 235 | 245 | 230 |
| | 2 | 2 | 310 | 280 | 340 | 305 |
| | 2 | 3 | 170 | 180 | 190 | 180 |
| | 2 | 4 | 150 | 160 | 150 | 153 |
| | 2 | 5 | 190 | 240 | 210 | 190 |
| | 2 | 6 | 130 | 120 | 170 | 140 |
| | 3 | 1 | 220 | 240 | 240 | 230 |
| | 3 | 2 | 290 | 280 | 260 | 330 |
| | 3 | 3 | 180 | 165 | 195 | 185 |
| | 3 | 4 | 150 | 160 | 155 | 150 |
| | 3 | 5 | 180 | 255 | 100 | 210 |
| | 3 | 6 | 145 | 120 | 140 | 135 |

PROMEDIOS

| | Pruebas | T ₀ | T ₁ | T ₂ | T ₃ |
|------------------------|---------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Sólidos Totales | 1 | 220 | 235 | 245 | 230 |
| | 2 | 280 | 280 | 300 | 305 |
| | 3 | 180 | 165 | 195 | 185 |
| | 4 | 150 | 150 | 155 | 153 |
| | 5 | 190 | 255 | 173 | 210 |
| | 6 | 145 | 123 | 140 | 135 |

| | Réplica | Pruebas | T ₀ | T ₁ | T ₂ | T ₃ |
|--------------------------|---------|---------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Sólidos Volátiles | 1 | 1 | 80 | 80 | 100 | 60 |
| | 1 | 2 | 100 | 115 | 105 | 100 |
| | 1 | 3 | 90 | 70 | 110 | 100 |
| | 1 | 4 | 70 | 100 | 90 | 75 |
| | 1 | 5 | 40 | 90 | 60 | 40 |
| | 1 | 6 | 70 | 70 | 50 | 35 |
| | 2 | 1 | 90 | 80 | 90 | 90 |
| | 2 | 2 | 120 | 140 | 140 | 115 |
| | 2 | 3 | 70 | 90 | 110 | 90 |
| | 2 | 4 | 75 | 90 | 70 | 68 |
| | 2 | 5 | 40 | 75 | 40 | 60 |
| | 2 | 6 | 50 | 60 | 60 | 40 |
| | 3 | 1 | 85 | 80 | 80 | 75 |
| | 3 | 2 | 100 | 90 | 70 | 130 |
| | 3 | 3 | 80 | 80 | 110 | 95 |
| | 3 | 4 | 80 | 90 | 80 | 60 |
| | 3 | 5 | 40 | 83 | 40 | 50 |
| | 3 | 6 | 60 | 30 | 55 | 38 |

PROMEDIOS

| | Pruebas | T ₀ | T ₁ | T ₂ | T ₃ |
|--------------------------|---------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Sólidos Volátiles | 1 | 85 | 80 | 90 | 75 |
| | 2 | 107 | 115 | 105 | 115 |
| | 3 | 80 | 80 | 110 | 95 |
| | 4 | 75 | 93 | 80 | 68 |
| | 5 | 40 | 83 | 47 | 50 |
| | 6 | 60 | 53 | 55 | 38 |

| | Réplica | Pruebas | T₀ | T₁ | T₂ | T₃ |
|----------------------|----------------|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Sólidos Fijos | 1 | 1 | 120 | 150 | 150 | 170 |
| | 1 | 2 | 140 | 165 | 195 | 180 |
| | 1 | 3 | 100 | 80 | 90 | 90 |
| | 1 | 4 | 80 | 30 | 70 | 80 |
| | 1 | 5 | 160 | 180 | 150 | 190 |
| | 1 | 6 | 90 | 60 | 60 | 95 |
| | 2 | 1 | 150 | 155 | 155 | 140 |
| | 2 | 2 | 190 | 140 | 200 | 190 |
| | 2 | 3 | 100 | 90 | 80 | 90 |
| | 2 | 4 | 75 | 70 | 80 | 85 |
| | 2 | 5 | 150 | 165 | 170 | 130 |
| | 2 | 6 | 80 | 60 | 110 | 100 |
| | 3 | 1 | 135 | 160 | 160 | 155 |
| | 3 | 2 | 190 | 190 | 190 | 200 |
| | 3 | 3 | 100 | 85 | 85 | 90 |
| | 3 | 4 | 70 | 70 | 75 | 90 |
| | 3 | 5 | 140 | 173 | 60 | 160 |
| | 3 | 6 | 85 | 90 | 85 | 98 |

PROMEDIOS

| | Pruebas | T₀ | T₁ | T₂ | T₃ |
|----------------------|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Sólidos Fijos | 1 | 135 | 155 | 155 | 155 |
| | 2 | 173 | 165 | 195 | 190 |
| | 3 | 100 | 85 | 85 | 90 |
| | 4 | 75 | 57 | 75 | 85 |
| | 5 | 150 | 173 | 127 | 160 |
| | 6 | 85 | 70 | 85 | 98 |

| | Réplica | Pruebas | T₀ | T₁ | T₂ | T₃ |
|----------------------------|----------------|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Sólidos Suspendidos | 1 | 1 | 5 | 15 | 0 | 30 |
| | 1 | 2 | 5 | 13 | 25 | 15 |
| | 1 | 3 | 45 | 35 | 40 | 45 |
| | 1 | 4 | 0 | 0 | 0 | 2,5 |
| | 1 | 5 | 20 | 35 | 20 | 10 |
| | 1 | 6 | 5 | 5 | 10 | 5 |
| | 2 | 1 | 20 | 48 | 5 | 0 |
| | 2 | 2 | 10 | 25 | 35 | 13 |
| | 2 | 3 | 40 | 40 | 40 | 30 |
| | 2 | 4 | 5 | 5 | 0 | 1 |
| | 2 | 5 | 23 | 28 | 40 | 25 |
| | 2 | 6 | 0 | 10 | 0 | 5 |
| | 3 | 1 | 13 | 15 | 10 | 15 |
| | 3 | 2 | 15 | 0 | 25 | 10 |
| | 3 | 3 | 43 | 38 | 40 | 38 |
| | 3 | 4 | 10 | 0 | 0 | 0 |
| | 3 | 5 | 25 | 31 | 45 | 18 |
| | 3 | 6 | 3 | 5 | 5 | 5 |

PROMEDIOS

| | Pruebas | T₀ | T₁ | T₂ | T₃ |
|----------------------------|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Sólidos Suspendidos | 1 | 13 | 26 | 5 | 15 |
| | 2 | 10 | 13 | 28 | 13 |
| | 3 | 43 | 38 | 40 | 38 |
| | 4 | 5 | 2 | 0 | 1 |
| | 5 | 23 | 31 | 35 | 18 |
| | 6 | 3 | 7 | 5 | 5 |

| | Réplica | Pruebas | T ₀ | T ₁ | T ₂ | T ₃ |
|--------------------------|---------|---------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Sólidos Disueltos | 1 | 1 | 200 | 210 | 210 | 190 |
| | 1 | 2 | 200 | 220 | 255 | 220 |
| | 1 | 3 | 140 | 150 | 130 | 140 |
| | 1 | 4 | 110 | 130 | 110 | 130 |
| | 1 | 5 | 230 | 230 | 250 | 220 |
| | 1 | 6 | 30 | 80 | 60 | 125 |
| | 2 | 1 | 220 | 205 | 210 | 190 |
| | 2 | 2 | 200 | 240 | 240 | 230 |
| | 2 | 3 | 150 | 170 | 140 | 130 |
| | 2 | 4 | 110 | 130 | 110 | 130 |
| | 2 | 5 | 235 | 240 | 230 | 230 |
| | 2 | 6 | 80 | 70 | 70 | 130 |
| | 3 | 1 | 210 | 200 | 210 | 190 |
| | 3 | 2 | 210 | 200 | 270 | 240 |
| | 3 | 3 | 145 | 160 | 135 | 135 |
| | 3 | 4 | 110 | 110 | 110 | 130 |
| | 3 | 5 | 240 | 235 | 250 | 225 |
| | 3 | 6 | 55 | 120 | 65 | 128 |

PROMEDIOS

| | Pruebas | T ₀ | T ₁ | T ₂ | T ₃ |
|--------------------------|---------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Sólidos Disueltos | 1 | 210 | 205 | 210 | 190 |
| | 2 | 203 | 220 | 255 | 230 |
| | 3 | 145 | 160 | 135 | 135 |
| | 4 | 110 | 123 | 110 | 130 |
| | 5 | 235 | 235 | 243 | 225 |
| | 6 | 55 | 90 | 65 | 128 |

Anexo F. Datos de las concentraciones de los sólidos tomados a la salida de los componentes del sistema acuapónico.

| | Pruebas | T. Cultivo | Clarificador | Biofiltro |
|------------------------------|----------------|-------------------|---------------------|------------------|
| Sólidos Totales | 1 | 350 | 270 | 220 |
| | 2 | 440 | 380 | 340 |
| | 3 | 260 | 230 | 210 |
| | 4 | 120 | 120 | 130 |
| | 5 | 280 | 250 | 230 |
| | 6 | 190 | 160 | 140 |
| Sólidos Volátiles | 1 | 110 | 90 | 80 |
| | 2 | 130 | 120 | 130 |
| | 3 | 100 | 90 | 90 |
| | 4 | 80 | 60 | 80 |
| | 5 | 70 | 70 | 60 |
| | 6 | 80 | 70 | 60 |
| Sólidos Fijos | 1 | 160 | 190 | 150 |
| | 2 | 170 | 200 | 170 |
| | 3 | 150 | 140 | 90 |
| | 4 | 90 | 90 | 70 |
| | 5 | 180 | 180 | 170 |
| | 6 | 100 | 120 | 110 |
| Sólidos Suspendidos | 1 | 40 | 32 | 20 |
| | 2 | 38 | 33 | 27 |
| | 3 | 40 | 40 | 37 |
| | 4 | 36 | 35 | 32 |
| | 5 | 43 | 36 | 27 |
| | 6 | 27 | 20 | 13 |
| Sólidos Disueltos | 1 | 240 | 250 | 250 |
| | 2 | 230 | 250 | 240 |
| | 3 | 150 | 160 | 150 |
| | 4 | 140 | 140 | 130 |
| | 5 | 240 | 250 | 230 |
| | 6 | 130 | 120 | 100 |
| Sólidos Sedimentables | 1 | 0,2 | 0,1 | 0 |
| | 2 | 0,3 | 0,2 | 0,1 |
| | 3 | 1,7 | 0,3 | 0 |
| | 4 | 0,2 | 0,1 | 0 |
| | 5 | 1,3 | 0,4 | 0 |
| | 6 | 1,3 | 0,4 | 0 |

Anexo G. Tabla ANOVA Análisis estadístico de comparación múltiple de varianza para las concentraciones de sólidos totales.

| Fuente | Suma de Cuadrados | GI | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|---------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------|----------------|
| Entre grupos | 837,944 | 3 | 279,315 | 0,08 | 0,9695 |
| Intra grupos | 230946, | 68 | 3396,26 | | |
| Total (Corr.) | 231784, | 71 | | | |

| Fuente | Suma de Cuadrados | GI | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|-----------------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------|----------------|
| Tratamiento | 837,944 | 3 | 279,315 | 0,07 | 0,9737 |
| Réplica (tratamiento) | 4412,67 | 8 | 551,583 | 0,15 | 0,9965 |
| Residuo | 226533, | 60 | 3775,56 | | |
| Total (corregido) | 231784, | 71 | | | |

R-Cuadrada = 2,2653 porciento

R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 0,0 porciento

Error estándar del est. = 61,4455

Error medio absoluto = 47,3796

Estadístico Durbin-Watson = 2,09518 (P=0,1736)

Anexo H. Tabla ANOVA Análisis estadístico de comparación múltiple de varianza para las concentraciones de sólidos volátiles.

| Fuente | Suma de Cuadrados | GI | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|---------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------|----------------|
| Entre grupos | 1440,06 | 3 | 480,019 | 0,75 | 0,5282 |
| Intra grupos | 43731,4 | 68 | 643,109 | | |
| Total (Corr.) | 45171,5 | 71 | | | |

| Fuente | Suma de Cuadrados | GI | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|-----------------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------|----------------|
| Tratamiento | 1440,06 | 3 | 480,019 | 0,68 | 0,5657 |
| Réplica (tratamiento) | 1588,11 | 8 | 198,514 | 0,28 | 0,9692 |
| Residuo | 42143,3 | 60 | 702,389 | | |
| Total (corregido) | 45171,5 | 71 | | | |

R-Cuadrada = 6,70371 porciento

R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 0,0 porciento

Error estándar del est. = 26,5026

Error medio absoluto = 19,5833

Estadístico Durbin-Watson = 1,44297 (P=0,0001)

Anexo I. Tabla ANOVA Análisis estadístico de comparación múltiple de varianza para las concentraciones de sólidos fijos.

| Fuente | Suma de Cuadrados | GI | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|---------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------|----------------|
| Entre grupos | 1567,72 | 3 | 522,574 | 0,25 | 0,8632 |
| Intra grupos | 143880,00 | 68 | 2115,88 | | |
| Total (Corr.) | 145448,00 | 71 | | | |

| Fuente | Suma de Cuadrados | GI | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|-----------------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------|----------------|
| Tratamiento | 1567,72 | 3 | 522,574 | 0,22 | 0,8799 |
| Réplica (tratamiento) | 3396,44 | 8 | 424,556 | 0,18 | 0,9926 |
| Residuo | 140483,00 | 60 | 2341,39 | | |
| Total (corregido) | 145448,00 | 71 | | | |

R-Cuadrada = 3,41303 porciento

R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 0,0 porciento

Error estándar del est. = 48,3879

Error medio absoluto = 40,6713

Estadístico Durbin-Watson = 2,44828 (P=0,7353)

Anexo J. Tabla ANOVA Análisis estadístico de comparación múltiple de varianza para las concentraciones de sólidos suspendidos.

| Fuente | Suma de Cuadrados | GI | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|---------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------|----------------|
| Entre grupos | 259,872 | 3 | 86,6238 | 0,37 | 0,7772 |
| Intra grupos | 16060,6 | 68 | 236,186 | | |
| Total (Corr.) | 16320,5 | 71 | | | |

| Fuente | Suma de Cuadrados | GI | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|-----------------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------|----------------|
| Tratamiento | 259,872 | 3 | 86,6238 | 0,34 | 0,7981 |
| Réplica (tratamiento) | 669,917 | 8 | 83,7396 | 0,33 | 0,9527 |
| Residuo | 15390,7 | 60 | 256,512 | | |
| Total (corregido) | 16320,5 | 71 | | | |

R-Cuadrada = 5,69706 porciento

R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 0,0 porciento

Error estándar del est. = 16,016

Error medio absoluto = 12,6481

Estadístico Durbin-Watson = 3,02986 (P=0,9997)

Anexo K. Tabla ANOVA Análisis estadístico de comparación múltiple de varianza para las concentraciones de sólidos disueltos.

| Fuente | Suma de Cuadrados | GI | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|---------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------|----------------|
| Entre grupos | 2017,04 | 3 | 672,347 | 0,18 | 0,9084 |
| Intra grupos | 251491,00 | 68 | 3698,40 | | |
| Total (Corr.) | 253508,00 | 71 | | | |

| Fuente | Suma de Cuadrados | GI | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|-----------------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------|----------------|
| Tratamiento | 2017,04 | 3 | 672,347 | 0,16 | 0,9222 |
| Réplica (tratamiento) | 937,111 | 8 | 117,139 | 0,03 | 1,0000 |
| Residuo | 250554,00 | 60 | 4175,90 | | |
| Total (corregido) | 253508,00 | 71 | | | |

R-Cuadrada = 1,16531 por ciento

R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 0,0 por ciento

Error estándar del est. = 64,6212

Error medio absoluto = 53,1528

Estadístico Durbin-Watson = 2,97353 (P=0,9993)

Anexo L. Datos de la eficiencia de remoción y promedios de sólidos de cada tratamiento.

| | Réplica | Pruebas | T₀ | T₁ | T₂ | T₃ |
|------------------------|----------------|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Sólidos Totales | 1 | 1 | 9,09 | -4,55 | -13,64 | -4,55 |
| | 1 | 2 | 29,41 | 17,65 | 11,76 | 17,65 |
| | 1 | 3 | 9,52 | 28,57 | 4,76 | 9,52 |
| | 1 | 4 | -15,38 | 0,00 | -23,08 | -19,23 |
| | 1 | 5 | 13,04 | -17,39 | 8,70 | 0,00 |
| | 1 | 6 | -14,29 | 7,14 | 21,43 | 7,14 |
| | 2 | 1 | -9,09 | -6,82 | -11,36 | -4,55 |
| | 2 | 2 | 8,82 | 17,65 | 0,00 | 10,29 |
| | 2 | 3 | 19,05 | 14,29 | 9,52 | 14,29 |
| | 2 | 4 | -15,38 | -23,08 | -15,38 | -17,31 |
| | 2 | 5 | 17,39 | -4,35 | 8,70 | 17,39 |
| | 2 | 6 | 7,14 | 14,29 | -21,43 | 0,00 |
| | 3 | 1 | 0,00 | -9,09 | -9,09 | -4,55 |
| | 3 | 2 | 14,71 | 17,65 | 23,53 | 2,94 |
| | 3 | 3 | 14,29 | 21,43 | 7,14 | 11,90 |
| | 3 | 4 | -15,38 | -23,08 | -19,23 | -15,38 |
| | 3 | 5 | 21,74 | -10,87 | 56,52 | 8,70 |
| | 3 | 6 | -3,57 | 14,29 | 0,00 | 3,57 |

PROMEDIOS

| | Pruebas | T₀ | T₁ | T₂ | T₃ |
|------------------------|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Sólidos Totales | 1 | 0,0 | -6,8 | -11,4 | -4,5 |
| | 2 | 17,6 | 17,6 | 11,8 | 10,3 |
| | 3 | 14,3 | 21,4 | 7,1 | 11,9 |
| | 4 | -15,4 | -15,4 | -19,2 | -17,3 |
| | 5 | 17,4 | -10,9 | 24,6 | 8,7 |
| | 6 | -3,6 | 11,9 | 0,0 | 3,6 |

| | Réplica | Pruebas | T₀ | T₁ | T₂ | T₃ |
|--------------------------|----------------|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Sólidos Volátiles | 1 | 1 | 0,00 | 0,00 | -25,00 | 25,00 |
| | 1 | 2 | 23,08 | 11,54 | 19,23 | 23,08 |
| | 1 | 3 | 0,00 | 22,22 | -22,22 | -11,11 |
| | 1 | 4 | 12,50 | -25,00 | -12,50 | 6,25 |
| | 1 | 5 | 33,33 | -50,00 | 0,00 | 33,33 |
| | 1 | 6 | -16,67 | -16,67 | 16,67 | 41,67 |
| | 2 | 1 | -12,50 | 0,00 | -12,50 | -12,50 |
| | 2 | 2 | 7,69 | -7,69 | -7,69 | 11,54 |
| | 2 | 3 | 22,22 | 0,00 | -22,22 | 0,00 |
| | 2 | 4 | 6,25 | -12,50 | 12,50 | 15,63 |
| | 2 | 5 | 33,33 | -25,00 | 33,33 | 0,00 |
| | 2 | 6 | 16,67 | 0,00 | 0,00 | 33,33 |
| | 3 | 1 | -6,25 | 0,00 | 0,00 | 6,25 |
| | 3 | 2 | 23,08 | 30,77 | 46,15 | 0,00 |
| | 3 | 3 | 11,11 | 11,11 | -22,22 | -5,56 |
| | 3 | 4 | 0,00 | -12,50 | 0,00 | 25,00 |
| | 3 | 5 | 33,33 | -37,50 | 33,33 | 16,67 |
| | 3 | 6 | 0,00 | 50,00 | 8,33 | 37,50 |

PROMEDIOS

| | Pruebas | T₀ | T₁ | T₂ | T₃ |
|--------------------------|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Sólidos Volátiles | 1 | -6,3 | 0,0 | -12,5 | 6,3 |
| | 2 | 17,9 | 11,5 | 19,2 | 11,5 |
| | 3 | 11,1 | 11,1 | -22,2 | -5,6 |
| | 4 | 6,3 | -16,7 | 0,0 | 15,6 |
| | 5 | 33,3 | -37,5 | 22,2 | 16,7 |
| | 6 | 0,0 | 11,1 | 8,3 | 37,5 |

| | Réplica | Pruebas | T₀ | T₁ | T₂ | T₃ |
|----------------------|----------------|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Sólidos Fijos | 1 | 1 | 20,00 | 0,00 | 0,00 | -13,33 |
| | 1 | 2 | 17,65 | 2,94 | -14,71 | -5,88 |
| | 1 | 3 | -11,11 | 11,11 | 0,00 | 0,00 |
| | 1 | 4 | -14,29 | 57,14 | 0,00 | -14,29 |
| | 1 | 5 | 5,88 | -5,88 | 11,76 | -11,76 |
| | 1 | 6 | 18,18 | 45,45 | 45,45 | 13,64 |
| | 2 | 1 | 0,00 | -3,33 | -3,33 | 6,67 |
| | 2 | 2 | -11,76 | 17,65 | -17,65 | -11,76 |
| | 2 | 3 | -11,11 | 0,00 | 11,11 | 0,00 |
| | 2 | 4 | -7,14 | 0,00 | -14,29 | -21,43 |
| | 2 | 5 | 11,76 | 2,94 | 0,00 | 23,53 |
| | 2 | 6 | 27,27 | 45,45 | 0,00 | 9,09 |
| | 3 | 1 | 10,00 | -6,67 | -6,67 | -3,33 |
| | 3 | 2 | -11,76 | -11,76 | -11,76 | -17,65 |
| | 3 | 3 | -11,11 | 5,56 | 5,56 | 0,00 |
| | 3 | 4 | 0,00 | 0,00 | -7,14 | -28,57 |
| | 3 | 5 | 17,65 | -1,47 | 64,71 | 5,88 |
| | 3 | 6 | 22,73 | 18,18 | 22,73 | 11,36 |

PROMEDIOS

| | Pruebas | T₀ | T₁ | T₂ | T₃ |
|----------------------|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Sólidos Fijos | 1 | 10,0 | -3,3 | -3,3 | -3,3 |
| | 2 | -2,0 | 2,9 | -14,7 | -11,8 |
| | 3 | -11,1 | 5,6 | 5,6 | 0,0 |
| | 4 | -7,1 | 19,0 | -7,1 | -21,4 |
| | 5 | 11,8 | -1,5 | 25,5 | 5,9 |
| | 6 | 22,7 | 36,4 | 22,7 | 11,4 |

| | Réplica | Pruebas | T₀ | T₁ | T₂ | T₃ |
|----------------------------|----------------|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Sólidos Suspendidos | 1 | 1 | 75,00 | 25,00 | 100,00 | -50,00 |
| | 1 | 2 | 81,48 | 53,70 | 7,41 | 44,44 |
| | 1 | 3 | -21,62 | 5,41 | -8,11 | -21,62 |
| | 1 | 4 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 92,19 |
| | 1 | 5 | 25,93 | -29,63 | 25,93 | 62,96 |
| | 1 | 6 | 95,45 | 95,45 | 90,91 | 95,45 |
| | 2 | 1 | 0,00 | -137,50 | 75,00 | 100,00 |
| | 2 | 2 | 62,96 | 7,41 | -29,63 | 53,70 |
| | 2 | 3 | -8,11 | -8,11 | -8,11 | 18,92 |
| | 2 | 4 | 84,38 | 84,38 | 100,00 | 96,09 |
| | 2 | 5 | 16,67 | -1,85 | -48,15 | 7,41 |
| | 2 | 6 | 100,00 | 90,91 | 100,00 | 95,45 |
| | 3 | 1 | 37,50 | 25,00 | 50,00 | 25,00 |
| | 3 | 2 | 44,44 | 100,00 | 7,41 | 62,96 |
| | 3 | 3 | -14,86 | -1,35 | -8,11 | -1,35 |
| | 3 | 4 | 68,75 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| | 3 | 5 | 7,41 | -15,74 | -66,67 | 35,19 |
| | 3 | 6 | 97,73 | 95,45 | 95,45 | 95,45 |

PROMEDIOS

| | Pruebas | T₀ | T₁ | T₂ | T₃ |
|----------------------------|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Sólidos Suspendidos | 1 | 37,5 | -29,2 | 75,0 | 25,0 |
| | 2 | 63,0 | 53,7 | -4,9 | 53,7 |
| | 3 | -20,4 | -1,9 | -11,1 | -1,9 |
| | 4 | 84,4 | 94,8 | 100,0 | 96,1 |
| | 5 | 16,7 | -15,7 | -29,6 | 35,2 |
| | 6 | 80,8 | 48,7 | 61,5 | 61,5 |

| | Réplica | Pruebas | T₀ | T₁ | T₂ | T₃ |
|--------------------------|----------------|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Sólidos Disueltos | 1 | 1 | 20,00 | 16,00 | 16,00 | 24,00 |
| | 1 | 2 | 16,67 | 8,33 | -6,25 | 8,33 |
| | 1 | 3 | 6,67 | 0,00 | 13,33 | 6,67 |
| | 1 | 4 | 15,38 | 0,00 | 15,38 | 0,00 |
| | 1 | 5 | 0,00 | 0,00 | -8,70 | 4,35 |
| | 1 | 6 | 70,00 | 20,00 | 40,00 | -25,00 |
| | 2 | 1 | 12,00 | 18,00 | 16,00 | 24,00 |
| | 2 | 2 | 16,67 | 0,00 | 0,00 | 4,17 |
| | 2 | 3 | 0,00 | -13,33 | 6,67 | 13,33 |
| | 2 | 4 | 15,38 | 0,00 | 15,38 | 0,00 |
| | 2 | 5 | -2,17 | -4,35 | 0,00 | 0,00 |
| | 2 | 6 | 20,00 | 30,00 | 30,00 | -30,00 |
| | 3 | 1 | 16,00 | 20,00 | 16,00 | 24,00 |
| | 3 | 2 | 12,50 | 16,67 | -12,50 | 0,00 |
| | 3 | 3 | 3,33 | -6,67 | 10,00 | 10,00 |
| | 3 | 4 | 15,38 | 15,38 | 15,38 | 0,00 |
| | 3 | 5 | -4,35 | -2,17 | -8,70 | 2,17 |
| | 3 | 6 | 45,00 | -20,00 | 35,00 | -27,50 |

PROMEDIOS

| | Pruebas | T₀ | T₁ | T₂ | T₃ |
|--------------------------|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Sólidos Disueltos | 1 | 16,0 | 18,0 | 16,0 | 24,0 |
| | 2 | 15,3 | 8,3 | -6,3 | 4,2 |
| | 3 | 3,3 | -6,7 | 10,0 | 10,0 |
| | 4 | 15,4 | 5,1 | 15,4 | 0,0 |
| | 5 | -2,2 | -2,2 | -5,8 | 2,2 |
| | 6 | 45,0 | 10,0 | 35,0 | -27,5 |

Anexo M. Datos de la eficiencia de remoción de sólidos en los componentes del sistema.

| | Pruebas | Clarificador | Biofiltro |
|------------------------------|----------------|---------------------|------------------|
| Sólidos Totales | 1 | 22,86 | 18,52 |
| | 2 | 13,64 | 10,53 |
| | 3 | 11,54 | 8,70 |
| | 4 | 0,00 | -8,33 |
| | 5 | 10,71 | 8,00 |
| | 6 | 15,79 | 12,50 |
| Sólidos Volátiles | 1 | 18,18 | 11,11 |
| | 2 | 7,69 | -8,33 |
| | 3 | 10,00 | 0,00 |
| | 4 | 25,00 | -33,33 |
| | 5 | 0,00 | 14,29 |
| | 6 | 12,50 | 14,29 |
| Sólidos Fijos | 1 | -18,75 | 21,05 |
| | 2 | -17,65 | 15,00 |
| | 3 | 6,67 | 35,71 |
| | 4 | 0,00 | 22,22 |
| | 5 | 0,00 | 5,56 |
| | 6 | -20,00 | 8,33 |
| Sólidos Suspendidos | 1 | 20,00 | 37,50 |
| | 2 | 13,16 | 18,18 |
| | 3 | 0,00 | 7,50 |
| | 4 | 2,78 | 8,57 |
| | 5 | 16,28 | 25,00 |
| | 6 | 25,93 | 35,00 |
| Sólidos Disueltos | 1 | -4,17 | 0,00 |
| | 2 | -8,70 | 4,00 |
| | 3 | -6,67 | 6,25 |
| | 4 | 0,00 | 7,14 |
| | 5 | -4,17 | 8,00 |
| | 6 | 7,69 | 16,67 |
| Sólidos Sedimentables | 1 | 50,00 | 100 |
| | 2 | 33,33 | 50 |
| | 3 | 82,35 | 100 |
| | 4 | 50,00 | 100 |
| | 5 | 69,23 | 100 |
| | 6 | 69,23 | 100 |

Anexo N. Tabla ANOVA Análisis estadístico de comparación múltiple de varianza para la eficiencia de remoción de sólidos totales.

| Fuente | Suma de Cuadrados | Gl | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|---------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------|----------------|
| Modelo | 2044,73 | 23 | 88,9011 | 0,29 | 0,9989 |
| Residuo | 14636,7 | 48 | 304,931 | | |
| Total (Corr.) | 16681,4 | 71 | | | |

| Fuente | Suma de Cuadrados | Gl | Cuadrado Medio | Razón-F |
|--------------------------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------|
| TRATAMIENTO | 408,838 | 3 | 136,279 | 1,74 |
| RÉPLICA (TRATAMIENTO) | 626,511 | 8 | 78,3139 | |
| MUESTREO (TRATAMIENTO RÉPLICA) | 1219,27 | 12 | 101,606 | 1,30 |
| Residuo | 14636,7 | 48 | 304,931 | |
| Total (corregido) | 16681,4 | 71 | | |

R-Cuadrada = 12,2575 porciento

R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 0,0 porciento

Error estándar del est. = 17,4623

Error medio absoluto = 12,0767

Estadístico Durbin-Watson = 2,80644 (P=0,7928)

Anexo O. Tabla ANOVA Análisis estadístico de comparación múltiple de varianza para la eficiencia de remoción de sólidos volátiles.

| Fuente | Suma de Cuadrados | Gl | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|---------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------|----------------|
| Modelo | 10253,5 | 23 | 445,805 | 1,11 | 0,3679 |
| Residuo | 19246,4 | 48 | 400,966 | | |
| Total (Corr.) | 29499,9 | 71 | | | |

| Fuente | Suma de Cuadrados | Gl | Cuadrado Medio | Razón-F |
|--------------------------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------|
| TRATAMIENTO | 794,772 | 3 | 264,924 | 1,41 |
| RÉPLICA (TRATAMIENTO) | 1505,91 | 8 | 188,239 | |
| MUESTREO (TRATAMIENTO RÉPLICA) | 4904,99 | 12 | 408,749 | 2,17 |
| Residuo | 19246,4 | 48 | 400,966 | |
| Total (corregido) | 29499,9 | 71 | | |

R-Cuadrada = 34,7578 por ciento

R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 3,49591 por ciento

Error estándar del est. = 20,0241

Error medio absoluto = 13,4225

Estadístico Durbin-Watson = 2,60602 (P=0,4081)

Anexo P. Tabla ANOVA Análisis estadístico de comparación múltiple de varianza para la eficiencia de remoción de sólidos fijos.

| Fuente | Suma de Cuadrados | Gl | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|---------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------|----------------|
| Modelo | 10034,0 | 23 | 436,26 | 1,68 | 0,0654 |
| Residuo | 12482,4 | 48 | 260,049 | | |
| Total (Corr.) | 22516,4 | 71 | | | |

| Fuente | Suma de Cuadrados | Gl | Cuadrado Medio | Razón-F |
|--------------------------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------|
| TRATAMIENTO | 286,215 | 3 | 95,405 | 0,89 |
| RÉPLICA (TRATAMIENTO) | 854,274 | 8 | 106,784 | |
| MUESTREO (TRATAMIENTO RÉPLICA) | 6543,17 | 12 | 545,264 | 5,11 |
| Residuo | 12482,4 | 48 | 260,049 | |
| Total (corregido) | 22516,4 | 71 | | |

R-Cuadrada = 44,5631 por ciento

R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 17,9996 por ciento

Error estándar del est. = 16,126

Error medio absoluto = 10,4995

Estadístico Durbin-Watson = 2,58057 (P=0,3588)

Anexo Q. Tabla ANOVA Análisis estadístico de comparación múltiple de varianza para la eficiencia de remoción de sólidos suspendidos.

| Fuente | Suma de Cuadrados | Gl | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|---------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------|----------------|
| Modelo | 55540,2 | 23 | 2414,79 | 0,81 | 0,7048 |
| Residuo | 143361, | 48 | 2986,68 | | |
| Total (Corr.) | 198901, | 71 | | | |

| Fuente | Suma de Cuadrados | Gl | Cuadrado Medio | Razón-F |
|--------------------------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------|
| TRATAMIENTO | 3797,72 | 3 | 1265,91 | 0,37 |
| RÉPLICA (TRATAMIENTO) | 27704,3 | 8 | 3463,04 | |
| MUESTREO (TRATAMIENTO RÉPLICA) | 39953,5 | 12 | 3329,46 | 0,96 |
| Residuo | 143361, | 48 | 2986,68 | |
| Total (corregido) | 198901, | 71 | | |

R-Cuadrada = 27,9235 porciento

R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 0,0 porciento

Error estándar del est. = 54,6505

Error medio absoluto = 39,6349

Estadístico Durbin-Watson = 3,33032 (P=1,0000)

Anexo R. Tabla ANOVA Análisis estadístico de comparación múltiple de varianza para la eficiencia de remoción de sólidos disueltos.

| Fuente | Suma de Cuadrados | Gl | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|---------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------|----------------|
| Modelo | 7599,4 | 23 | 330,409 | 1,48 | 0,1253 |
| Residuo | 10718,1 | 48 | 223,294 | | |
| Total (Corr.) | 18317,5 | 71 | | | |

| Fuente | Suma de Cuadrados | Gl | Cuadrado Medio | Razón-F |
|--------------------------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------|
| TRATAMIENTO | 1681,24 | 3 | 560,412 | 7,90 |
| RÉPLICA (TRATAMIENTO) | 567,314 | 8 | 70,9143 | |
| MUESTREO (TRATAMIENTO RÉPLICA) | 5292,96 | 12 | 441,08 | 6,22 |
| Residuo | 10718,1 | 48 | 223,294 | |
| Total (corregido) | 18317,5 | 71 | | |

R-Cuadrada = 41,4871 por ciento

R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 13,4497 por ciento

Error estándar del est. = 14,943

Error medio absoluto = 9,81117

Estadístico Durbin-Watson = 2,56933 (P=0,3377)

Anexo S. Tabla ANOVA Análisis estadístico de comparación múltiple de varianza para caudales de entrada y salida.

Pruebas de Normalidad

| Prueba | Estadístico | Valor-P |
|------------------------|-------------|----------|
| Valor-Z para asimetría | 0,91464 | 0,360379 |

Resumen Estadístico para Caudales

| TRATAMIENTO | Recuento | Promedio | Desviación Estándar | Coefficiente de Variación | Mínimo |
|--------------|----------|------------|---------------------|---------------------------|----------|
| 0 | 60 | 0,00011382 | 1,5606E-05 | 13,71% | 0,000089 |
| 1 | 60 | 0,00011645 | 1,5136E-05 | 13,00% | 0,000082 |
| 2 | 60 | 0,00011782 | 1,5758E-05 | 13,38% | 0,000088 |
| 3 | 60 | 0,00011568 | 1,7399E-05 | 15,04% | 0,000077 |
| Total | 240 | 0,00011594 | 1,5963E-05 | 13,77% | 0,000077 |

Tabla ANOVA para caudales por TRATAMIENTO

| Fuente | Suma de Cuadrados | GI | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|---------------|-------------------|-----|----------------|---------|---------|
| Entre grupos | 5,01383E-10 | 3 | 1,67128E-10 | 0,65 | 0,5818 |
| Intra grupos | 6,03978E-8 | 236 | 2,55923E-10 | | |
| Total (Corr.) | 6,08992E-8 | 239 | | | |

Pruebas de Múltiple Rangos para caudales por TRATAMIENTO

Método: 95,0 % Tukey HSD

| TRATAMIENTO | Casos | Media | Grupos Homogéneos |
|-------------|-------|------------|-------------------|
| 0 | 60 | 0,00011382 | X |
| 3 | 60 | 0,00011568 | X |
| 1 | 60 | 0,00011645 | X |
| 2 | 60 | 0,00011782 | X |

Anexo T. Peso promedio con su desviación estándar de cada muestreo realizado durante el periodo de estudio.

| N° Animales | PESO (gramos) | | | | |
|--------------------|----------------------|----------|----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | 103 | 267 | 278 | 167 | 244 |
| 2 | 100 | 184 | 208 | 152 | 230 |
| 3 | 169 | 199 | 228 | 267 | 169 |
| 4 | 143 | 170 | 141 | 223 | 200 |
| 5 | 132 | 198 | 246 | 146 | 296 |
| 6 | 130 | 158 | 198 | 231 | 267 |
| 7 | 151 | 265 | 162 | 168 | 311 |
| 8 | 129 | 147 | 180 | 310 | 164 |
| 9 | 90 | 175 | 186 | 307 | 231 |
| 10 | 170 | 226 | 145 | 205 | 198 |
| 11 | 130 | 194 | 178 | 151 | 214 |
| 12 | 94 | 137 | 148 | 195 | 158 |
| 13 | 170 | 162 | 146 | 241 | 223 |
| 14 | 130 | 119 | 205 | 245 | 194 |
| 15 | 94 | 129 | 288 | 216 | 221 |
| 16 | 179 | 138 | 188 | 180 | 194 |
| 17 | 149 | 132 | 210 | 229 | 162 |
| 18 | 102 | 194 | 200 | 162 | 221 |
| 19 | 190 | 137 | 129 | 171 | 253 |
| 20 | 191 | 117 | 158 | 233 | 184 |
| 21 | 93 | 125 | 144 | 220 | 182 |
| 22 | 148 | 177 | 216 | 160 | 183 |
| 23 | 111 | 115 | 155 | 255 | 249 |
| 24 | 163 | 221 | 135 | 191 | 149 |
| 25 | 101 | 112 | 240 | 175 | 201 |
| PROMEDIO | 134,48 | 167,92 | 188,48 | 208 | 211,92 |
| DESVIACIÓN | 31,94 | 43,82 | 43,1 | 45,62 | 41,04 |

Anexo U. Talla promedio con su desviación estándar de cada muestreo realizado durante el periodo de estudio.

| TALLA (centímetros) | | | | | |
|----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| N° Animales | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | 17,5 | 23,0 | 24,0 | 24,0 | 24,0 |
| 2 | 17,0 | 21,0 | 22,0 | 21,0 | 24,5 |
| 3 | 20,0 | 21,0 | 23,0 | 24,0 | 21,0 |
| 4 | 19,0, | 19,5 | 21,0 | 22,0 | 22,0 |
| 5 | 20,0 | 21,0 | 23,0 | 20,0 | 25,0 |
| 6 | 19,0 | 21,0 | 22,0 | 23,0 | 24,0 |
| 7 | 19,5 | 23,0 | 20,0 | 21,0 | 26,0 |
| 8 | 19,5 | 21,0 | 22,0 | 25,0 | 20,0 |
| 9 | 17,0 | 20,5 | 22,0 | 26,0 | 24,0 |
| 10 | 21,0 | 22,0 | 20,0 | 22,0 | 21,5 |
| 11 | 18,5 | 20,5 | 21,0 | 19,0 | 23,0 |
| 12 | 17,5 | 19,0 | 20,0 | 22,5 | 20,5 |
| 13 | 21,0 | 19,5 | 19,0 | 25,0 | 22,5 |
| 14 | 18,5 | 19,0 | 22,0 | 24,5 | 23,0 |
| 15 | 17,5 | 17,5 | 24,0 | 22,0 | 23,5 |
| 16 | 21,0 | 19,0 | 21,0 | 21,5 | 22,0 |
| 17 | 19,5 | 20,0 | 22,0 | 24,0 | 20,5 |
| 18 | 17,5 | 22,0 | 23,0 | 20,5 | 23,0 |
| 19 | 21,0 | 19,0 | 20,0 | 21,0 | 23,5 |
| 20 | 21,0 | 18,0 | 21,0 | 24,0 | 21,0 |
| 21 | 18,0 | 19,0 | 20,0 | 23,5 | 21,5 |
| 22 | 19,0 | 21,0 | 21,5 | 20,5 | 21,0 |
| 23 | 17,0 | 18,5 | 20,0 | 24,0 | 24,0 |
| 24 | 21,0 | 22,0 | 19,0 | 22,5 | 21,0 |
| 25 | 18,0 | 17,5 | 24,0 | 20,5 | 22,0 |
| PROMEDIO | 19,02 | 20,18 | 21,46 | 22,52 | 22,56 |
| DESVIACIÓN | 1,42 | 1,55 | 1,47 | 1,79 | 1,55 |

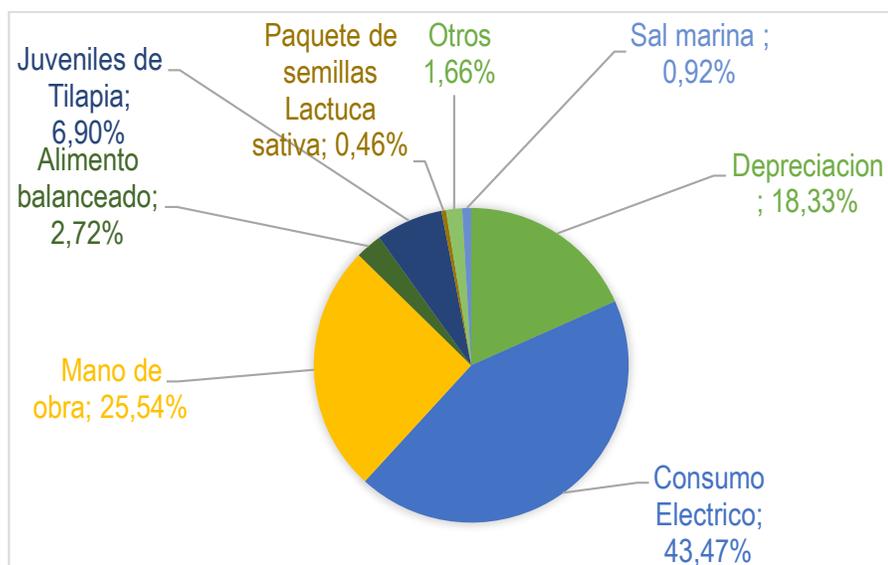
Anexo V. Tablas costos del sistema acuapónico

| | Costos Mensual | Meses | Valor total |
|---------------------------------|----------------|-------|--------------|
| Depreciación Sistema Eléctrico | \$12.895,00 | 2 | \$25.790,00 |
| Consumo Eléctrico | \$118.080,00 | 2 | \$236.160,00 |
| Depreciación Sistema Acuapónico | \$20.661,67 | 2 | \$41.323,33 |
| Depreciación Invernadero | \$16.250,00 | 2 | \$32.500,00 |
| Mano de obra | \$138.750 | 1 | \$138.750,00 |

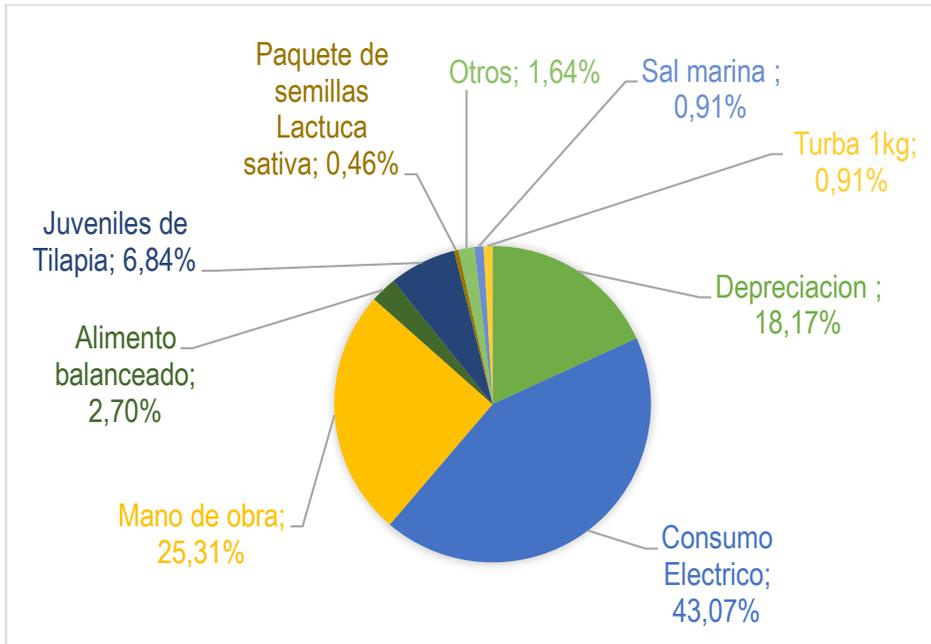
| Descripción | Cantidad | Unidad | Valor unitario | Valor total |
|---|----------|--------|----------------|-------------|
| Alimento balanceado | 6,292 | kg | 2350 | 14786 |
| Juveniles de Tilapia | 25 | und | 1500 | 37500 |
| Paquete de semillas <i>Lactuca sativa</i> | 1 | und | 2500 | 2500 |
| Paquete de vasos desechables | 3 | und | 3000 | 9000 |
| Sal marina | 10 | kg | 500 | 5000 |

Anexo W. Gráficas relación costos para el sistema acuapónico

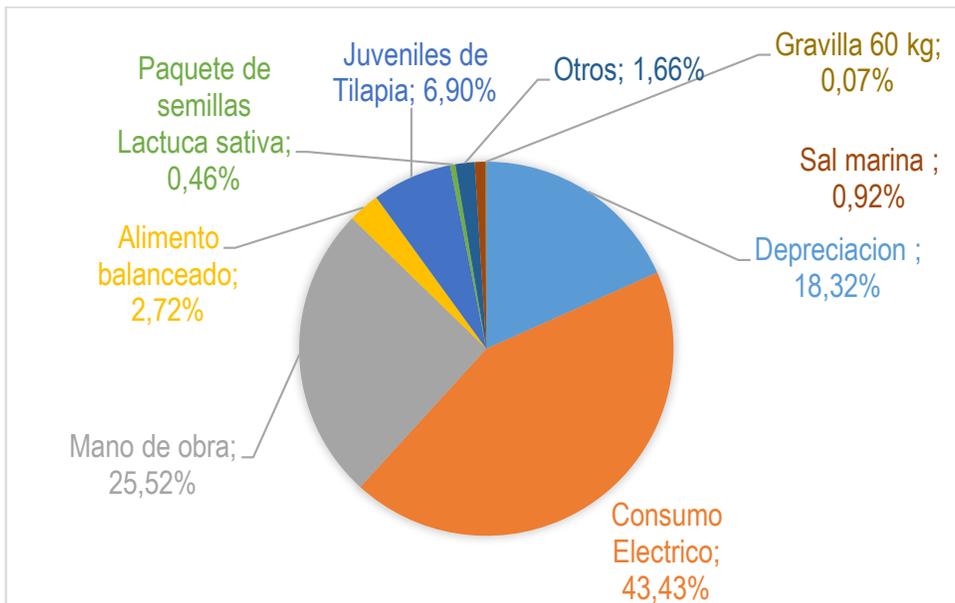
BLANCO (T₀)



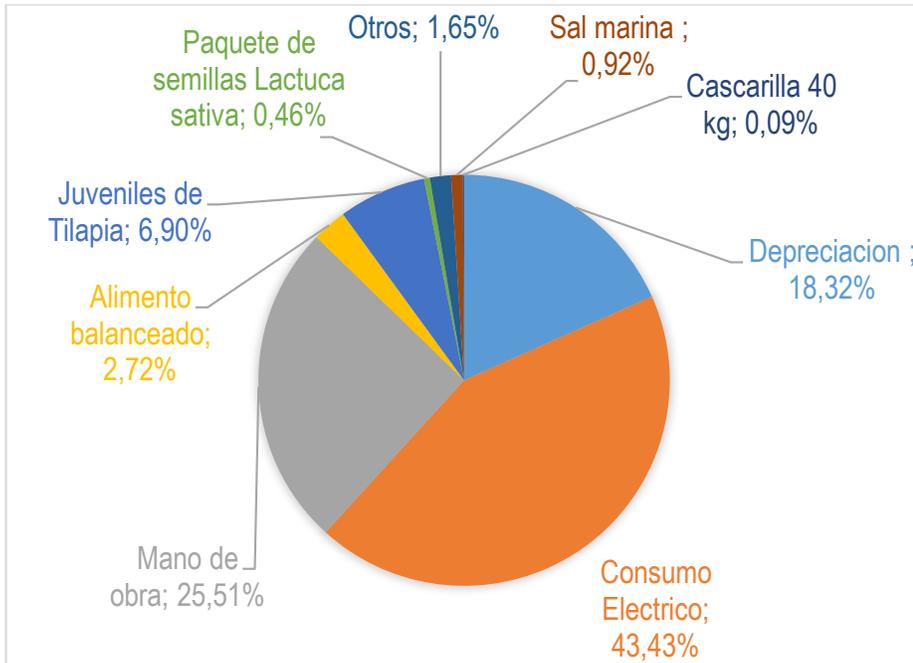
TURBA (T₁)



GRAVA (T₂)



CASCARILLA DE ARROZ (T₃)



Anexo X. Balance de masas.

| Periodo de crecimiento | | | | |
|------------------------|------|---------|-------|--------|
| Temperatura | 78,8 | °F | | |
| Temperatura | 26 | °C | | |
| Peso Inicial | 130 | g | 0,29 | Lb |
| Peso Final | 200 | g | 0,44 | Lb |
| Longitud Inicial | 7,22 | Pul | 18,35 | cm |
| Longitud Final | 8,34 | Pul | 21,18 | cm |
| Crecimiento requerido | 1,12 | pul | 2,83 | cm |
| Tasa de crecimiento | 0,92 | pul/mes | 2,34 | cm/mes |
| Periodo crecimiento | 1,21 | mes | | |

Longitud está en función del peso.

Diseño de flujo requerido

| | | |
|----------------------------|---------|-------|
| Cultivo | Tilapia | |
| Talla (L): | 21,18 | cm |
| Peso (W): | 0,2 | kg |
| Número animales (N°): | 25 | |
| Biomasa (B): | 5 | kg |
| Volum. tanque cultivo (V): | 0,5 | m3 |
| Densidad siembra (Ds): | 10 | kg/m3 |
| Tasa alimentación (Ta): | 1% | % |

| | | |
|----------------------|------|--------|
| Recirculación | 100 | % |
| Tasa de alimentación | 0,06 | kg/dia |

Valores límites para el diseño para calidad de agua

| | | | |
|-------------------|--------|------|----------------|
| Temperatura: | 26 | °C | Efici. Tratam. |
| | 299,15 | °K | TE |
| SST: | 10 | mg/l | 0,75 |
| NAT: | 10 | mg/l | 0,35 |
| Oxígeno: | 3 | mg/l | 0,70 |
| CO ₂ : | 30 | mg/l | 0,70 |

Balance general de masas: $Q_1C_2 + P = Q_1C_1 - Q(C_2 - C_1) = -P$

Oxígeno: $C_2 = C_1 + (C_{sat} - C_1) \text{ Si } C_1 = 5 \text{ mg/l y } TE = 70\%$

| Coef. Bunsen $B = \exp[A_1 + A_2(100/T) + A_3 \ln(T/100)]$. Const. A1, A2, A3 Variables aire estándar | | | | | | |
|--|--------------|-------------|------------------|-------------|-------------|--------|
| Gas especie | Fracc. molar | K1 | A1 | A2 | A3 | J1 |
| Oxígeno | 0,20946 | 1,4290 3 | - 58,387 7 | 85,807 9 | 23,843 9 | 0,5318 |
| Nitrógeno | 0,78084 | 1,2504 3 | - 59,627 4 | 85,766 1 | 24,369 6 | 0,6078 |
| CO ₂ | 0,00032 | 1,9768 1 | - 58,093 1 | 90,506 9 | 22,294 | 0,3845 |

| | | |
|----------------|------|----------|
| Elevación (h): | 2800 | m.s.n.m. |
| BP: | 548 | mm de Hg |

| | | |
|---|--------|----------|
| Presión de vapor de agua $P_w = A_o * e^{(0,0645*T)}$ Si $A_o = 4,7603 \text{ } ^\circ\text{C}$ o $1,65^{-7} \text{ } ^\circ\text{K}$ | | |
| Pw: | 23,874 | mm de Hg |

| | | |
|---|--|--|
| Relación entre el peso molecular y volumen $K = \text{mg/ml} = 1,42903/\text{ml}$ | | |
| Fracción molar del gas $x = 0,5$ (50 % dispositivo de atmósfera de oxígeno) | | |

| | | |
|---|--------|------|
| Concentración de saturación $C_{sat} = 1000 * K * B * ((BP - P_w)) / 760$ | | |
| Csat: | 16,324 | mg/l |

| | | |
|--|--------|------|
| $C_2 \text{ o salida} = C_{ingreso} + T/100 * (C_{mejor} - C_{ingreso})$ | | |
| C2: | 11,577 | mg/l |

| | | | |
|---|------|--------|-----------------------------|
| Producción de oxígeno: $(-P) = Q * (C_2 - C_1)$. Suma consumo de peces y bacterias. | | | |
| Kg O ₂ cons. Peces/kg alim: | | 0,25 | |
| Kg O ₂ cons. bacterias/kg alim: | | 0,12 | |
| (-P): | | 0,37 | kg O ₂ /kg alim. |
| Para kg/día(P): | 0,06 | 0,0222 | kg O ₂ /día |
| | | 22200 | mg O ₂ /día |
| $Q * (C_2 + (-P)) = Q(C_1)$ $Q = P/(C_2 - C_1)$ | | | |
| Caudal reque. para control O ₂ . Q: | | 2004,2 | l/día |
| | | 0,4 | g.p.m. |
| | | 0,023 | l.p.s. |

| | | | | | |
|--|-----|------|-----|-----|------|
| Dióxido de carbono: $C_2 \text{ o salida} = C_{ingreso} + T/100 * (C_{mejor} - C_{ingreso})$ | | | | | |
| Cingreso: | 30 | mg/l | | | |
| T/100: | 0,7 | % | C2: | 9,4 | mg/l |
| Cmejor: | 0,5 | mg/l | | | |

| | | | | | |
|---|---|--------|--------------------------|--------|--|
| La producción de CO ₂ (+P) se basa en el consumo de oxígeno. | | | | | |
| 0,37 | kg O ₂ cons./kg alimento. | | | | |
| 1,375 | kg CO ₂ prod./kg O ₂ cons. | | (+P): | 0,5088 | kg CO ₂ /kg alimento |
| 0,06 | kg alimento/día. | | | | |
| | | | P: | 30525 | mgCO ₂ /día |
| $Q_1 * C_2 + P = Q_1 * C_1$ | | | $Q * ((C_2 - C_1)) = -P$ | | Cada 100 kg alim/día prod. Cantid. CO ₂ . |
| Q; | Caudal requerido para controlar CO ₂ : | | | | |
| Q: | 1478,2 | l/día | | | |
| | 0,27 | g.p.m. | | | |
| | 0,02 | l.p.s. | | | |

| Sólidos Suspendidos Totales SST: C2 o salida = Cingreso + T/100*(Cmejor - Cingreso) | | | | | |
|--|--------------------------|------|-------|-------|---------------------------------|
| Cingreso: | 10 | mg/l | | | |
| T/100: | 0,8 | % | C2: | 2 | mg/l |
| Cmejor: | 0 | mg/l | | | |
| La producción de SST (+P) se basa en tasa de alimentación (0% humedad alimento). | | | | | |
| 0,25 | kg SSTcons./kg alimento. | | | | |
| 0,06 | kg alimento/día. | | (+P): | 0,015 | kg CO ₂ /kg alimento |

| | | | | | |
|---------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|----|---|-----------|
| | | | P: | 15000 | mgSST/día |
| $Q1 \cdot C2 + P = Q1 \cdot C1$ | | $Q \cdot ((C2 - C1)) = -P$ | | Cada 100 kg alim/día prod. Cantid. SST. | |
| Q; | Caudal requerido para controlar SST: | | | | |
| Q: | 1875,0 | l/día | | | |
| | 0,34 | g.p.m. | | | |
| | 0,02 | l.p.s. | | | |

| Nitrógeno Amoniacal Tota, NAT.C2 o salida = Cingreso + T/100*(Cmejor - Cingreso) | | | | | |
|---|--------------------------------------|----------------------------|-------|---|---------------------------------|
| Cingreso: | 9 | mg/l | | | |
| T/100: | 0,4 | % | C2: | 5,4 | mg/l |
| Cmejor: | 0 | mg/l | | | |
| La producción de NAT (+P) se basa en tasa de alimentación (con 38% proteína/kg alimento). | | | | | |
| 0,38 | kg proteína/kg alimento. | | | | |
| 0,092 | kg NAT/kg proteína. | | (+P): | 0,0021 | kg CO ₂ /kg alimento |
| 0,06 | kg alimento/día. | | | | |
| | | | P: | 2097,6 | mgNAT/día |
| | $Q1 \cdot C2 + P = Q1 \cdot C1$ | $Q \cdot ((C2 - C1)) = -P$ | | Cada 100 kg alim/día prod. Cantid. NAT. | |
| Q; | Caudal requerido para controlar NAT: | | | | |
| Q: | 582,7 | l/día | | | |
| | 0,11 | g.p.m. | | | |
| | 0,01 | l.p.s. | | | |

| FLUJOS REQUERIDOS | | | |
|--------------------------|-----------------|-----------------|-------------|
| Parámetro calidad agua | flujo requerido | Flujo requerido | l.p.m |
| | g.p.m. | l.p.s. | |
| SST | 0,34 | 0,022 | 1,3021 |
| NAT | 0,11 | 0,007 | 0,4046 |
| Oxígeno | 0,37 | 0,023 | 1,3918 |
| Dióxido de carbono | 0,27 | 0,017 | 1,0265 |
| | | | utilizado |
| | | | 0,023 |
| | | | 1,391797031 |