

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE BIOFILTROS AEROBIOS DE FLUJO  
ASCENDENTE CON PELÍCULA FIJA TOTALMENTE SUMERGIDA PARA EL  
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN EL CULTIVO DE TRUCHA  
ARCOÍRIS (*Oncorhynchus mykiss*) EN UN SISTEMA DE RECIRCULACIÓN**

GIOVANY JOJOA CABRERA  
ELSY IBARRA CHAVES

UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE CIENCIAS PECUARIAS  
DEPARTAMENTO DE RECURSOS HIDROBIOLÓGICOS  
INGENIERÍA EN PRODUCCIÓN ACUÍCOLA  
SAN JUAN DE PASTO  
2012

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE BIOFILTROS AEROBIOS DE FLUJO ASCENDENTE CON PELÍCULA FIJA TOTALMENTE SUMERGIDA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN EL CULTIVO DE TRUCHA ARCOÍRIS (*Oncorhynchus mykiss*) EN UN SISTEMA DE RECIRCULACIÓN**

GIOVANY JOJOA CABRERA  
ELSY IBARRA CHAVES

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

**Presidente**  
IVÁN ANDRÉS SÁNCHEZ ORTIZ  
Ing. Civil., Esp., M.Sc.

UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE CIENCIAS PECUARIAS  
DEPARTAMENTO DE RECURSOS HIDROBIOLÓGICOS  
INGENIERÍA EN PRODUCCIÓN ACUÍCOLA  
SAN JUAN DE PASTO  
2012

**“Las ideas aportadas en este trabajo de grado son responsabilidad exclusiva de su autor”.**

**Artículo 1° del acuerdo No. 324 de octubre 11 de 1966, emanado del Honorable Concejo Directivo de la Universidad de Nariño.**

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

-----  
-----  
-----  
-----  
-----  
-----

-----  
**IVÁN ANDRÉS SÁNCHEZ ORTIZ**  
Presidente de Tesis

-----  
**ROBERTO GARCÍA CRIOLLO**  
Jurado Delegado

-----  
**GLORIA LUCÍA CÁRDENAS CALVACHI**  
Jurado

**San Juan de Pasto, Junio del 2012.**

## AGRADECIMIENTOS

Expresamos los más sinceros agradecimientos a:

IVÁN ANDRÉS SÁNCHEZ ORTIZ	Ingeniero civil, MSc Docente Profesor de la Facultad de Ciencias Pecuarias de la Universidad de Nariño
GLORIA LUCÍA CÁRDENAS CALVACHI	Profesora de la Facultad de Ciencias Pecuarias de la Universidad de Nariño.
ROBERTO GARCIA CRIOLLO	Ingeniero en producción acuícola Profesor de la Facultad de Ciencias Pecuarias de la Universidad de Nariño.
ÁLVARO BURBANO MONTENEGRO	Ingeniero en Producción Acuícola, M.Sc en Ciencias Estadísticas. Profesor de la Facultad de Ciencias Pecuarias de la Universidad de Nariño.
MARCO ANTONIO IMUEZ FIGUEROA	Zootecnistas. Esp, MSc Profesor de la Facultad de Ciencias Pecuarias de la Universidad de Nariño
CAMILO LENIN GUERRERO ROMERO	Ingeniero en producción acuícola Técnico de laboratorio
JOSE ESTEBAN MONCAYO ERAZO	Ingeniero en producción acuícola
LUIS 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
OSCAR MEJÍA SANTACRUZ	Auxiliar del Centro de Documentación Especializada del Departamento de Recursos Hidrobiológicos de la Universidad de Nariño

## **DEDICATORIA**

A Dios, a mi familia; mi padre Parménides Jojoa, mi madre Dilia Cabrera, mi hermana Yuly Paola Jojoa, mi hermano Yilver Mauricio Jojoa a ellos por su apoyo incondicional durante esta etapa de mi vida.

GIOVANY ALEXANDER JOJOA CABRERA

## DEDICATORIA

A ti Señor, porque hiciste realidad este sueño, por todo el amor con el que me rodeas y porque me tienes en tus manos. Esta tesis es para ti, porque me diste la oportunidad de vivir y de regalarme una hija maravillosa; Isabela, que aunque todavía no puede leer, un día va a aprender y por eso también te dedico esta tesis, gracias por alegrarme con tus palabras, que a veces no logro descifrar, eres el combustible q mueve mi vida...Te amo.

Con mucho cariño, principalmente a mis padres que me dieron la vida y han estado conmigo en todo momento. Gracias por todo papá y mamá por creer en mí, aunque hemos pasado momentos difíciles siempre han sido incondicionales conmigo, brindándome su apoyo y todo su amor; le agradezco a la vida el tenerlos a mi lado. A mis hermanos Jaime, Helena y Rodrigo gracias por estar conmigo y apoyarme siempre, los quiero mucho.

A mis profesores por confiar en mí, a los Ingenieros Iván Sánchez y Roberto García por tenerme la paciencia necesaria, gracias por apoyarme en los momentos difíciles Agradezco el haber tenido una guía profesional y personal, un ejemplo de disciplina y perseverancia, que marco mi vida y que siempre recordaré con todo mi afecto. Nunca los olvidaré. Son muchas las personas especiales a las que me gustaría agradecer su amistad, apoyo, ánimo y compañía en las diferentes etapas de mi vida. Algunas están aquí conmigo, otras en mis recuerdos y en el corazón. Sin importar en dónde estén o si alguna vez llegan a leer esta dedicatoria quiero darles las gracias por formar parte de mí, por todo lo que me han brindado y porque han hecho de mí lo que ahora soy.

ELSY IBARRA CHAVES

## RESUMEN

**Objetivo.** El objetivo principal del presente proyecto fue la evaluación de la eficiencia de biofiltros aerobios de flujo ascendente con película fija totalmente sumergida a diferentes tiempos de retención hidráulica para el tratamiento de aguas residuales en el cultivo de trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*) en un sistema de recirculación localizado en el laboratorio de hidráulica del programa de Ingeniería en Producción Acuícola de la Universidad de Nariño.

**Materiales.** En la investigación se utilizó un tanque polietileno de 0,250 m<sup>3</sup> destinado al cultivo de juveniles de trucha arcoiris; un sistema de prefiltración de medio granular de flujo ascendente para la retención de sólidos de gran tamaño construidos en tubo PVC de 6" de diámetro; una caja para control de nivel fabricada en acrílico; un tanque de succión para elevar el efluente del sistema de prefiltración hacia la caja de nivel constante y distribución del flujo hacia el sistema de biofiltración; constituido por seis biofiltros de medio granular de flujo ascendente dividido en dos tratamientos con diferente tiempo de retención hidráulico (TRH), tratamiento 1 (T1) de 15 a 20 min y tratamiento dos (T2) de 20 a 25 min, cada unidad experimental estuvo constituida por un tubo de PVC de 3" de diámetro; arena con  $D_{10} = 0,45\text{mm}$  como medio de soporte y un sistema de tuberías en PVC.

**Modelo estadístico para el análisis de datos.** Fue realizado por comparación de medias

**Métodos.** El sistema de cultivo fue puesto en operación durante un tiempo experimental de maduración de biopelícula mayor a 20 días, con carga de 5 kg/m<sup>3</sup> de peso vivo, después de este periodo de tiempo inicio la investigación que se extendió durante un mes más quince días en los cuales se realizaron los muestreos para los parámetros físico químicos de: demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno amoniacal total (NAT), amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), sólidos fijos totales (SFT), color aparente, turbiedad, temperatura, oxígeno, pH, alcalinidad, dióxido de carbono y peso los peces cada quince días

**Conclusiones.** La investigación demostró que se presentaron diferencias significativas con el 95% de confianza para los parámetros de Turbiedad y Nitrato en la variable eficiencia de remoción para este estudio, siendo el mejor tratamiento T2; además, se encontró que para un nivel de confianza del 90% existen diferencias significativas para cinco parámetros siendo el mejor tratamiento el T1 para Turbiedad y Nitrato y T2 para Color, sólidos Totales y Sólidos Volátiles; los parámetros diarios y productivos se mantuvieron dentro del rango para la especie.

**Palabras claves:** biofiltro, flujo ascendente, tiempo de retención hidráulica, Trucha.

## ABSTRACT

**Objective:** The main of this project was to evaluation of the efficiency of aerobic rising flow with fixed film totally submerged at different hydraulic retention times for sewage treatment in the growing of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) in a recirculation system localized in the hydraulics laboratory of the program Aquaculture Production Engineering at the University of Nariño.

**Materials:** In the research, a polyethylene tank of 0,250 m<sup>3</sup> intended for the growing of rainbow trout was used, also a prefiltration granular system of rising flow for large-size solids retention built in a 6" PVC tube, an acrylic-made box used for level control, a suction tank for raising the effluent of the prefiltration system; built by six granular biofilters of rising flow divided into two treatments with different hydraulic retention time (HRT), treatment 1 (T1) from 15 to 20 minutes and treatment 2 (T2) from 20 to 25 minutes. Every experimental unit was built by a 3 inch-PVC tube in diameter, sand of D10 = 0.45 mm as support medium, and a system of PVC tubes.

**Statistical Model for data analysis.** It was carried out through media comparison.

**Methods:** The system was implemented during an experimental period of biofilm maturing of more than 20 days, with a load of 5 kg/m<sup>3</sup>, after this period the started the research which extended for a month and fifteen days, a time within which the samplings for the physical- chemical parameters of: oxygen chemical demand (OCD), total ammoniac nitrogen (TAN), ammonia (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), nitrite (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), phosphate (PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>), total solids (TS), volatile solids (VS), total fixed solids (TFP), apparent color, turbidity, temperature, oxygen, pH, alkalinity, carbon dioxide and fish were weighed every fifteen days.

**Conclusions:** The system evaluated showed that there were significant differences of at 95% of confidence in the efficiency removal variable for this study for the Turbidity and Nitrate parameters, being T2 the best treatment; moreover, it was discovered that for confidence level of 90% there are significant differences for five parameters, being T1 the best treatment for Turbidity and Nitrate and T2 for color and Volatile Solids; daily and productive parameters were maintained within the range for this species.

**Keywords:** biofilter, rasing flow, hydraulic retention time, trout.

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	23
1. DEFINICIÓN Y DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA	24
2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	25
3. OBJETIVOS	26
3.1 OBJETIVO GENERAL	26
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	26
4. MARCO TEÓRICO	27
4.1 LA ACUACULTURA	28
4.2 LA TRUCHA	29
4.2.1 Clasificación taxonómica	29
4.3 CLASIFICACIÓN DE LA ACUICULTURA	32
4.3.1 Acuicultura extensiva	32
4.3.2 Acuicultura semiintensiva	32
4.3.3 Acuicultura intensiva	32
4.3.4 Acuicultura superintensiva	32
4.4 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN	33
4.4.1 Sistemas abiertos	33
4.4.2 Sistemas semicerrados	33
4.4.3 Sistemas cerrados	33
4.5 SISTEMAS DE RECIRCULACIÓN PARA LA ACUACULTURA (SRA)	33

4.6	RESIDUOS QUE GENERA LA PISCICULTURA	34
4.7	CARACTERIZACIÓN DE LOS CONTAMINANTES	34
4.7.1	Sólidos	34
4.7.2	Turbidez	35
4.7.3	Color	35
4.7.4	Olor	35
4.7.5	Temperatura	35
4.7.6	Densidad	35
4.7.7	Conductividad	35
4.7.8	Ph	35
4.7.9	Nitrógeno	36
4.7.10	Alcalinidad	36
4.7.11	Cloruros	36
4.7.12	Azufre	36
4.7.13	Metales	36
4.7.14	Gases	36
4.7.15	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	37
4.8	TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	37
4.8.1	Los Biofiltros	37
4.8.1.1	Biofiltros sumergidos	38
4.8.1.2	Los Biofiltros percoladores	39
4.8.2	Experiencias en sistemas de tratamiento de aguas residuales mediante el uso de biofiltros	40

5.	DISEÑO METODOLÓGICO	43
5.1	LOCALIZACIÓN	43
5.2	PERIODO DE ESTUDIO	43
5.3	MATERIALES Y MÉTODOS	44
5.3.1	Instalaciones	46
5.3.2	Material biológico	50
5.3.3	Insumos	50
5.3.4	Reactivos	50
5.3.5	Materiales	52
5.3.6	Equipos	53
5.3.7	Plan de manejo	54
5.3.7.1	Adecuación de las instalaciones	54
5.3.7.2	Transporte y climatización de los animales	54
5.3.7.3	Periodo de maduración de los biofiltros	54
5.3.7.4	Muestreo y alimentación	55
5.3.7.5	Parámetros físico químicos	55
5.3.7.6	Toma de muestras	55
5.4	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	56
5.5	VARIABLES A EVALUAR	57
5.6	Tratamientos	57
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	58
6.1	EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN EN LOS BIOFILTROS EN TÉRMINOS DE TRH PARA LOS PARÁMETROS EVALUADOS	58

6.1.1	Demanda química de oxígeno (DQO)	58
6.1.2	Nitrógeno amoniacal total (NAT)	60
6.1.3	Fosfato	63
6.1.4	Nitrito	65
6.1.5	Nitrato	67
6.1.6	Turbiedad	70
6.1.7	Color aparente	71
6.1.8	Sólidos totales (ST)	73
6.1.9	Sólidos volátiles (SV)	76
6.1.10	Sólidos fijos totales (SFT)	78
6.1.11	Amonio	80
6.2	DATOS OBTENIDOS PARA LOS PARÁMETROS DE CONTROL DIARIOS	83
6.2.1	Ph	83
6.2.2	Oxígeno	84
6.2.3	Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	85
6.2.4	Alcalinidad	86
6.2.5	Temperatura	87
6.3	COMPORTAMIENTO DE PARÁMETROS PRODUCTIVOS	88
6.3.1	Incremento de peso (IP)	88
6.3.2	Conversión alimenticia (CA)	89
7.	CONCLUSIONES	90
8.	RECOMENDACIONES	92

BIBLIOGRAFÍA	93
ANEXOS	98

## LISTA DE TABLAS

		pág.
<b>Tabla 1</b>	Clasificación taxonómica de la trucha arcoíris ( <i>Oncorhynchus mykiss</i> )	29
<b>Tabla 2</b>	Valores normales, dudosos y peligrosos de los factores físicos químicos para salmónidos	30
<b>Tabla 3</b>	Densidades aconsejadas consideradas como prototipo en cultivo de la trucha arcoíris ( <i>Oncorhynchus mykiss</i> ), que corresponden a una tolerancia social bien admitida aconsejadas por Blanco	31
<b>Tabla 4</b>	Características de los sedimentos según Timmons <i>et al.</i> (2002)	34
<b>Tabla 5</b>	Ventajas y desventajas de los biofiltros percoladores	39
<b>Tabla 6</b>	Comparación de rendimiento de UABF con otros reactores aeróbicos	41
<b>Tabla 7</b>	Composición de lecho filtrante en el sistema de prefiltración	48
<b>Tabla 8</b>	Composición peso y altura del lecho filtrante	50
<b>Tabla 9</b>	Resumen estadístico resultados parámetros semanales	83
<b>Tabla 10</b>	Parámetros productivos evaluados	89

## LISTA DE FIGURAS

		pág.
<b>Figura 1</b>	Clasificación de los biofiltros	38
<b>Figura 2</b>	Laboratorio de hidráulica Ingeniería en Producción Acuícola	43
<b>Figura 3</b>	Fotografía del sistema evaluado	44
<b>Figura 4</b>	Vista en planta del sistema	45
<b>Figura 5</b>	Vista posterior del sistema	45
<b>Figura 6</b>	Vista isométrica sentido NorEste	46
<b>Figura 7</b>	Implementación del granito en la segunda torre de prefiltración	47
<b>Figura 8</b>	Composición granulométrica del sistema de pre-filtración	48
<b>Figura 9</b>	Composición granulométrica del sistema de bio-filtración	49
<b>Figura 10</b>	Alimento balanceado	50
<b>Figura 11</b>	Reactivos utilizados	51
<b>Figura 12</b>	Materiales de vidriería utilizados	52
<b>Figura 13</b>	Equipos electrónicos para control de calidad del agua	53
<b>Figura 14</b>	Equipos eléctricos utilizados	54
<b>Figura 15</b>	Muestreo de animales	55
<b>Figura 16</b>	Medias obtenidas para DQO en T1 y T2	58
<b>Figura 17</b>	Comportamiento de DQO en T1 y T2 urante el periodo de estudio	59
<b>Figura 18</b>	Medias obtenidas para NAT en T1 y T2	61

<b>Figura 19</b>	Comportamiento de NAT en T1 y T2 durante el periodo de estudio	61
<b>Figura 20</b>	Medias obtenidas para Fosfato en T1 y T2	63
<b>Figura 21</b>	Medias obtenidas para Nitrito en T1 y T2	65
<b>Figura 22</b>	Comportamiento del Nitrito en T1 y T2 durante el periodo de estudio	66
<b>Figura 23</b>	Medias obtenidas para Nitrato en T1 y T2	67
<b>Figura 24</b>	Comportamiento del Nitrato en T1 y T2 durante el periodo de estudio	68
<b>Figura 25</b>	Medias obtenidas para Turbiedad en T1 y T2	70
<b>Figura 26</b>	Comportamiento del Turbiedad en T1 y T2 durante el periodo de estudio	70
<b>Figura 27</b>	Medias obtenidas para Color Aparente en T1 y T2	72
<b>Figura 28</b>	Comportamiento del Color Aparente en T1 y T2 durante el periodo de estudio	72
<b>Figura 29</b>	Medias obtenidas para ST en T1 y T2	74
<b>Figura 30</b>	Comportamiento del ST en T1 y T2 durante el periodo de estudio	74
<b>Figura 31</b>	Medias obtenidas para SV en T1 y T2	76
<b>Figura 32</b>	Comportamiento del SV en T1 y T2 durante el periodo de estudio	77
<b>Figura 33</b>	Medias obtenidas para SFT en T1 y T2	79
<b>Figura 34</b>	Comportamiento del SFT en T1 y T2 durante el periodo de estudio	79
<b>Figura 35</b>	Medias obtenidas para Amonio en T1 y T2	80
<b>Figura 36</b>	Comportamiento del Amonio en T1 y T2 durante el periodo de estudio	81

<b>Figura 37</b>	Comportamiento del pH en T1, T2 y CNC durante el periodo de estudio	83
<b>Figura 38</b>	Comportamiento del Oxígeno en T1, T2 y CNC durante el periodo de estudio	84
<b>Figura 39</b>	Comportamiento del CO <sub>2</sub> en T1, T2 y CNC durante el periodo de estudio	85
<b>Figura 40</b>	Comportamiento de la Alcalinidad en T1, T2 y CNC durante el periodo de estudio	86
<b>Figura 41</b>	Comportamiento de la Temperatura en T1, T2 y CNC durante el periodo de estudio	87

## LISTA DE ANEXOS

		pág.
<b>Anexo A</b>	Parámetros diarios	99
<b>Anexo B</b>	Parámetros semanales	105
<b>Anexo C</b>	Análisis estadísticos	109

## GLOSARIO

**ACUICULTURA:** cultivo de organismos acuáticos bajo condiciones controladas por el hombre hasta su cosecha, procesamiento, comercialización y consumo.

**ÁERACION:** proceso en el que se produce un contacto entre el aire y el agua con el objetivo de oxigenarla o de excluir gases y sustancias volátiles.

**AFLUENTE:** agua residual u otro líquido que ingrese a un reservorio, estanque o algún proceso de tratamiento

**AGUAS RESIDUALES:** desecho líquido proveniente del consumo humano y su destinación para fines domésticos, agrícolas, pecuarios o industriales.

**AIREADOR:** dispositivo o equipo que permite transferir aire al agua.

**ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO DEL AGUA:** pruebas de laboratorio que se efectúan a una muestra para determinar sus características físicas, químicas o ambas.

**ANOXIA:** reducción de oxígeno en los tejidos corporales por debajo de los niveles fisiológicos. Ausencia de oxígeno.

**BIOFILTRO:** también denominados filtros biológicos, son dispositivos que eliminan una amplia gama de compuestos contaminantes desde un fluido mediante un proceso biológico.

**BIOMASA:** cantidad de materia en los organismos por unidad de superficie o volumen expresado en unidad de peso. Masa de material viviente. Cantidad total de material vivo de un cuerpo de agua particular.

**CALIDAD DE AGUA:** conjunto de características organolépticas, físicas, químicas, y microbiologías propias del agua.

**CONCENTRACIÓN:** cantidad de sustancia presente en un fluido dada en una unidad específica de medida.

**CONVERSIÓN ALIMENTICIA:** es la cantidad de alimento que se utiliza para producir un kilo de biomasa.

**DENSIDAD:** relación existente entre la masa del cuerpo y el volumen ocupado por este.

**DENSIDAD DE SIEMBRA:** número de animales de la producción acuícola que se cultiva por unidad de área o volumen.

**DESNITRIFICACIÓN:** es el proceso anaeróbico por el cual una bacteria quimiotrófica convierte nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) a nitrógeno gaseoso ( $\text{N}_2$ ),  $\text{N}_2\text{O}$  o amoníaco ( $\text{NH}_3$ ).

**EFICIENCIA DE REMOCIÓN:** medida de efectividad de un proceso en la remoción de una sustancia específica.

**EFLUENTE:** flujo proveniente de un sistema hidráulico.

**ESPECIE:** grupo de poblaciones naturales que se entrecruzan y que están reproductivamente aisladas de otros grupos.

**FILTRACIÓN:** proceso mediante el cual se remueven las partículas suspendidas y coloidales del agua al hacerlas pasar a través de un medio poroso.

**GRANULOMETRÍA:** técnica para la medida del tamaño de los granos o partículas que constituyen un suelo o un medio poroso y estudio de la distribución de los mismos con arreglo a una escala de clasificación.

**LECHO DE FILTRACIÓN:** medio constituido por material granular poroso por el que se hace percolar un flujo.

**MORTALIDAD:** proporción de individuos muertos en relación con los organismos de una población.

**NITRIFICACIÓN:** proceso aeróbico por el cual las bacterias convierten el amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) a nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ). La nitrificación es más rápida de pH 7-8 y a temperaturas de 25-30°C.

**OPTIMIZACIÓN:** proceso de diseño y/o construcción para lograr la mejor armonía y compatibilidad entre los componentes de un sistema o incrementar su capacidad o la de sus componentes, aprovechando al máximo todos los recursos disponibles.

**RECAMBIO:** hacer sustitución de un volumen de agua.

**SEDIMENTACIÓN:** proceso por el cual los sólidos suspendidos en el agua se descantan por gravedad.

**SEDIMENTO:** material (minerales, materia orgánica, etc.) que habiendo estado suspendido en un líquido, se deposita en el fondo.

**TASA DE APLICACIÓN SUPERFICIAL:** relación entre caudal y el área superficial de una determinada estructura hidráulica ( $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{dia}$ ), también denominado "carga inicial" ó "carga superficial".

**TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA (TRH):** tiempo medio teórico que se demoran las partículas de agua en un proceso de tratamiento.

**TURBIEDAD:** propiedad del agua de dispersión de la luz, este parámetro indica la calidad de las aguas naturales, y las aguas residuales tratadas con relación al material residual en suspensión coloidal.

## INTRODUCCIÓN

“El agua es un producto vital para la supervivencia humana y para la seguridad alimentaria y a su vez se configura como un producto estratégico para la industrialización, el desarrollo económico, la seguridad energética o el transporte, su reducción o pérdida podría generar graves dificultades en términos económicos, sociales, políticos ambientales y de salud pública”<sup>1</sup>. La acuicultura es una actividad productiva que ha ido creciendo y que encaja dentro de la configuración anteriormente nombrada, contribuye al desarrollo económico pero que causa contaminación. Timmons *et al.*<sup>2</sup>, afirman que los peces excretan varios productos nitrogenados residuales por difusión e intercambio iónico a través de las branquias orina y heces, concepto que coincide con la contaminación definida por Roldán como “la adición de sustancias extrañas que deterioran la calidad del agua”<sup>3</sup>.

En la actualidad se propone la implementación de nuevas tecnologías con las que se haga uso más eficiente de este recurso; entre estos se encuentran los sistemas de recirculación para acuicultura (SRA) que tienen como objetivo la reutilización del agua, estos a su vez están acompañados en su conjunto por otros subsistemas de tratamiento los cuales garantizan la calidad de agua del sistema; entre los sistemas anteriormente citados se destacan los biofiltros de flujo ascendente, alternativa que se manejó en esta investigación, por medio de la evaluación de dos tiempos de retención hidráulica.

---

<sup>1</sup> PEREZ ORTIZ, Volmar. Derecho Humano al agua. Bogotá, D.C.: Imprenta Nacional de Colombia. 2009. p. 16.

<sup>2</sup> TIMMONS, *et al.* Sistemas de Recirculación para la Acuicultura. 2 ed. Santiago de Chile.: Quebecor World Chile S.A., 2002. p. 207

<sup>3</sup> ROLDÁN PÉREZ, Gabriel. Fundamentos De Limnología Neotropical. Medellín.: Universidad de Antioquia. 1992. p. 439.

## 1. DEFINICIÓN Y DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

La problemática mundial relacionada con el calentamiento global, el rompimiento de la capa de ozono, eutrofización de fuentes de agua y extinción de especies nativas es causada por la excesiva contaminación de diferentes industrias de consumo y producción; entre ellas; la acuicultura se destaca como un contribuyente de este fenómeno, tras el vertimiento de desechos provenientes del cultivo de especies hidrobiológicas. La mayor parte del cultivo de peces de aguas continentales y marinas es manejada mediante sistemas de jaulas flotantes en las zonas costeras y lagunas utilizando flujo continuo de agua, dependiente de la fuente de origen. El buen funcionamiento del sistema de cultivo, y de las operaciones hidráulicas se ven afectados por los cambios climáticos sobre los cuales no se tiene control además de hacer descarga directa de los desechos a la fuente natural. Los sistemas de recirculación para acuicultura que reutilizan el agua mediante su tratamiento con sistemas de estabilización mecánicas y biológicas, han ganado amplia aceptación debido a su capacidad para reducir la descarga de desechos contaminantes minimizando la eutrofización de las fuentes de agua e incrementando la producción, aprovechando al máximo la capacidad instalada en las piscifactorías. Este tipo de sistemas, tienen la ventaja de utilizar cantidades muy pequeñas de agua para la producción piscícola en comparación con el caudal de sistemas abiertos; por lo tanto, es más fácil mantener el control de parámetros fisicoquímicos y productivos adecuados en las especies manejadas en acuicultura.

Siguiendo esta secuencia de ideas, por medio de este estudio se busca comparar dos rangos de tiempos de retención hidráulica (TRH) mediante la evaluación de biofiltros aerobios de flujo ascendente con película fija totalmente sumergida para el tratamiento de aguas residuales en el cultivo de Trucha Arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) en un SRA, y saber cual demuestra más eficiencia.

## 2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cuál de los dos tiempos de retención hidráulicos evaluados en los biofiltros aerobios de flujo ascendente con película fija totalmente sumergida para el tratamiento de aguas residuales en el cultivo de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) en un sistema de recirculación, es el más efectivo en términos de remoción de nutrientes?

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1 OBJETIVO GENERAL

- Evaluar la eficiencia de biofiltros aerobios de flujo ascendente con película fija totalmente sumergida a diferentes tiempos de retención hidráulica para el tratamiento de aguas residuales en el cultivo de Trucha Arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) en un sistema de recirculación.

#### 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

En 6 biofiltros de medio granular de flujo ascendente con película fija totalmente sumergida para el tratamiento de aguas residuales en el cultivo de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) en un sistema de recirculación, se pretendió:

- Evaluar la eficiencia en términos de remoción de demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno amoniacal total (NAT), amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), sólidos fijos totales (SFT), color aparente y turbiedad.
- Evaluar parámetros de operación diarios en el SRA como temperatura, oxígeno, pH, alcalinidad, dióxido de carbono.
- Evaluar los parámetros productivos obtenidos con el SRA: crecimiento y conversión alimenticia.

#### 4. MARCO TEÓRICO

En la actualidad la disponibilidad hídrica es uno de los componentes de mayor relevancia “El agua a nivel mundial se encuentra en alto riesgo de agotamiento por los daños ambientales que han reducido la capacidad de auto regeneración de los ecosistemas y por la fuerte presión de la demanda doméstica, agrícola e industrial sobre el recurso, la escasez del agua es hoy un posible factor de confrontación geopolítica entre países”<sup>4</sup>. Según Pérez<sup>5</sup>, no solamente las organizaciones internacionales han expresado la estrecha relación que tiene el derecho al agua con otros derechos fundamentales, también se ha ocupado del tema al señalar su importancia para garantizar el derecho a la vida, a la salud y a la salubridad pública.

Para la FAO<sup>6</sup>, se calcula que la pesca y la acuicultura suponen el medio de subsistencia para 540 millones de personas en el mundo, el 8 % de la población mundial; los mares de América Latina y el Caribe suponen una fuente de alimentación sana y una fuente de recursos para miles de familias. La misma organización afirma que la contribución de la acuicultura a la economía regional ha crecido sustancialmente en los últimos 10 años, da empleo a más de 200000 personas directamente, y a cerca de 500 mil de manera indirecta; desde la perspectiva alimentaria, son más de 100000 familias rurales en la región que dependen directa o indirectamente de la acuicultura para su sustento, incluidas la alimentación por autoconsumo.

---

<sup>4</sup> PÉREZ. Op. cit., p. 73-74.

<sup>5</sup> Ibid., p.17.

<sup>6</sup> OFICINA REGIONAL DE LA FAO PARA AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE (FAO). Pesca y Acuicultura [en línea]. Edición en internet. Santiago de Chile: 2012[citado el 10 de abril 2012]. Disponible en internet: < URL: <http://www.rlc.fao.org/es/areas-tecnicas/pesca-acuicultura/>

## 4.1 LA ACUACULTURA

De acuerdo a lo reportado por el INPA<sup>7</sup>, la acuicultura es el cultivo de organismos acuáticos bajo condiciones controladas por el hombre hasta su cosecha, procesamiento, comercialización y consumo. Etimológicamente significa cultivo del agua, referido al uso de métodos y técnicas para el manejo y control de los recursos vivos cuya fuente de vida es el agua. Colombia es un país que posee excelentes condiciones climáticas, topográficas e hidrológicas para desarrollar la acuicultura. Debido a la creciente contaminación del entorno y la sobre explotación de los recursos, entre ellos los piscícolas, cobra cada vez más importancia el desarrollo de la acuicultura como alternativa de producción de alimento y/o generación de recursos.

El instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales IDEAM ha realizado importantes estudios sobre las condiciones de las cuencas de ríos, manantiales y quebradas del país, así como el riesgo futuro de su abastecimiento. Además, diseñó e implementó un sistema de indicadores que permiten medir la regulación natural de las fuentes hídricas, la escasez hídrica de los municipios y la vulnerabilidad de la población colombiana respecto a las características del recurso hídrico para los próximos quince años.

Según el IDEAM<sup>8</sup>, en su estudio nacional del agua presentó indicadores y medidas que permiten acercarse al estado actual del recurso hídrico. De esa forma se tiene información relativa a la oferta y demanda de agua en Colombia, indicadores de sostenibilidad, proyectados para los años 2015 y 2025, los resultados obtenidos alertan a las zonas más vulnerables y con mayor peligro de desabastecimiento de agua. En Colombia el 60% de la demanda de agua se destina a uso de tipo agrícola, el 28% a uso de tipo doméstico, el 10% se destina para uso industrial, el 2% para el uso pecuario y el uso de empresas de servicio demanda menos del 1%. Dentro del porcentaje agrícola se encuentra la acuicultura destacando en el departamento de Nariño la actividad productiva de la truchicultura, la que ha tenido mucho auge en los últimos tiempos en la población del territorio rural, mejorando sus ingresos económicos y la seguridad alimenticia.

---

<sup>7</sup> SALAZAR ARIZA, Gustavo. Consideraciones Generales Sobre Acuicultura En: Fundamentos Generales Para Acuicultura. Instituto Nacional de Pesca y Acuicultura INPA. Bogotá D.C.: GRAFIIMPRESOS QUINTERO, 1993. p 3.

<sup>8</sup> PEREZ. Op. cit., p.73-74.

## 4.2 LA TRUCHA

**4.2.1 Clasificación taxonómica.** Según Blanco<sup>9</sup>, la Trucha Arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) tiene hoy en día una gran importancia en el mundo industrial de la piscicultura por su grado de domesticación, de acuerdo al mismo autor, presenta la clasificación taxonómica según lo indica la Tabla 1 presentada a continuación.

**Tabla 1. Clasificación taxonómica de la trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*).**

Reino	Animal
Sub Reino	Metazoos
Phylum	Chordata
Sub Phylum	Vertebrata
Orden	Salmoniformes
Sub Orden	Salmonidei
Familia	Salmonidae
Súper Clase	Gnathostomata
Clase	Osteichyes
Sub Clase	Actinopterygii
Género	<i>Oncorhynchus</i>
Especie	<i>Mykiss</i>

Fuente: Blanco (1994)

**4.2.2 Generalidades.** Para Blanco<sup>10</sup>, las truchas son peces que en la naturaleza ocupan espacios acuáticos con aguas puras y cristalinas, que discurren por cauces con notables desniveles topográficos, que originan rápidos, saltos y cascadas, típicos de los ríos de alta montaña, la trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) gusta de corrientes más moderadas y ocupa generalmente los tramos medios, donde el río se ensancha con fondo pedregoso y moderada vegetación. Estos son peces poiquiloterms, lo que significa que la temperatura del agua es la misma del pez, modificándose en el mismo sentido. Los cambios bruscos de temperatura son muy mal tolerados, por lo que a nivel industrial se necesita aguas estables, con escasa variación térmica diaria y preferiblemente temperaturas de 15°C consideradas óptimas para el engorde y crecimiento, en instalaciones industriales. Para el cultivo es necesario hacer una evaluación en conjunto teniendo en cuenta factores como calidad del agua de cultivo, y extensión de la producción. En la Tabla 2 se presentan rangos de calidad de aguas recomendados para la especie:

<sup>9</sup> BLANCO CACHAFEIRO, Carmen. La trucha Cría Industrial.: 2 ed. Madrid.: Ediciones Mundi-prensa, 1994. p. 39.

<sup>10</sup> Ibid., p.354.

**Tabla 2. Valores normales, dudosos y peligrosos de los factores físicos químicos para salmónidos.** Blanco cita a (Sabaut, 1976).

Factores	Unidad de medida	Normal	Dudoso	Peligroso
Temperatura	°C	< 20	20-22	≥22
Saturación de oxígeno al amanecer	%	≤ 80	50-70	50
pH	pH	6<pH<9	pH<6	pH<5,5
Conductividad	S/cm	20-500	500-600	>600
Alcalinidad en (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) o bicarbonato	mg/L	Débil 8 Fuerte 400 Débil 8-60		
Calcio	mg/L	Fuerte 60-200		
Sulfatos en (SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> )	mg/L	0-50	50-100	+ de 100
Ácido sulfhídrico	0 +	-	+	++
Nitritos en (NO <sub>2</sub> )	mg/L	Débil, 0-10 Fuerte, 11		
Nitratos en (NO <sub>3</sub> )	mg/L	0-indicios 0,001	0,1	≥1
Amoniaco en (NH <sub>4</sub> )	mg/L	0-indicios 0,001	0,01-0,4	≥1
Cloruros en (CL <sup>-</sup> )(sin la influencia del mar )	mg/L	Indicios-20	20-50	≥50
Materias en suspensión	mg/L	≤30	30-70	≥70
Anhídrido carbónico(CO <sub>2</sub> )	mg/L	≤20	12-20	≥20

A continuación en la Tabla 3 se muestran densidades de siembra recomendadas para la especie.

**Tabla 3. Densidades aconsejadas consideradas como prototipo en cultivo de la trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*), que corresponden a una tolerancia social bien admitida aconsejadas por Blanco<sup>11</sup>**

Características de los peces		Densidad aconsejada	
Peso individual (g)	No de unidades en kg	kg/m <sup>2</sup> estanque	No unidades/m <sup>2</sup> /est.
200	5	27 - 25	135 - 125
150	6,6	26 - 24	171 - 152
100	10	24 - 22	240 - 220
50	20	22 - 20	440 - 400
30	33	21 - 19	693 - 632
20	50	19 - 17	950 - 800
10	100	17 - 16	1700 - 1600

Fuente: Blanco (1994)

En cuanto a capacidad instalada, Pereira y Mercante<sup>12</sup>, sostienen que la instalación de unidades de piscicultura, resulta totalmente dependiente de la calidad y cantidad de agua disponible y por sí misma una actividad que causa modificaciones en la calidad del agua; además, afirman que, el impacto causado en el ambiente varía de acuerdo con el sistema de cultivo utilizado con las características del cuerpo de agua que recibe el efluente.

### 4.3 CLASIFICACIÓN DE LA ACUICULTURA

Según el INPA<sup>13</sup> la acuicultura se puede clasificar de acuerdo al tipo de producción, grado de manejo y tecnología aplicada en:

**4.3.1 Acuicultura extensiva.** Es la que se realiza con fines de repoblación y/o aprovechamiento de un cuerpo de agua determinado.

<sup>11</sup> Ibid., p. 353.

<sup>12</sup> PEREIRA y MERCANTE. A amônia nos sistemas de criação de peixes e seus efeitos sobre a qualidade da água. *En*: B. Inst. Pesca. Junio, 2005. vol. 31,, p .84.

<sup>13</sup> SALAZAR. Op cit., p. 10.

**4.3.2 Acuicultura semiintensiva.** Se practica en forma similar a la extensiva, pero en este caso ya existen por lo general estanques o reservorios construidos por el hombre y las técnicas de manejo se limitan simplemente a la siembra de los peces, abonamiento y preparación del estanque en forma incipiente y esporádica.

**4.3.3 Acuicultura intensiva.** Se efectúa básicamente con fines comerciales y para esto se necesitan estanques técnicamente construidos con entrada y salida de agua. Las cosechas y las siembras se llevan a cabo periódicamente, obedeciendo a una programación de la producción. En este tipo de piscicultura se realiza un control permanente de la calidad del agua y se practican abonamientos frecuentes con estiércol de animales o fertilizantes químicos. Se suministra alimento concentrado con niveles mayores de proteína en forma permanente y se programa la densidad de siembra, la cual varía de acuerdo a la especie y el grado de explotación. Se aplica una mayor tecnología cuya base está dada por los recambios continuos de agua y/o aireación.

**4.3.4 Acuicultura superintensiva.** Se viene practicando en los últimos años como producto de los avances tecnológicos desarrollados y consiste en aprovechar el máximo la capacidad del agua y los estanques. La programación y la atención sobre cultivo son totales, utilizando recambios de aguas continuos y aireación artificial. Con el fin de obtener altas producciones. En este sistema pierde importancia la productividad natural y en consecuencia se utilizan alimentos concentrados con un alto contenido de proteína (28 – 45%). El control permanente de los parámetros fisicoquímicos del agua es fundamental para la obtención de las producciones esperadas, ya se trabaja con elevadas densidades de siembra y por lo tanto se deben controlar parámetros vitales como el oxígeno disuelto, pH, amoníaco y nitritos entre otros.

#### **4.4 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN**

Según lo reportado por Wheaton<sup>14</sup>, los sistemas de producción se clasifican en:

**4.4.1 Sistemas abiertos.** Es la más antigua del sistema considerando que un sistema natural sin modificaciones hechas por el hombre es un sistema abierto. Las dos características que lo hacen tan popular son: bajo costo y sus limitados requerimientos para administración.

---

<sup>14</sup> WHEATON. Op. cit., p. 205.

**4.4.2 Sistemas semicerrados.** Se caracteriza por el uso de agua natural a la que se permite pasar una sola vez a través del sistema.

**4.4.3 Sistemas cerrados.** Son aquellos en los que el fluido de trabajo es colocado dentro del sistema y este es raramente cambiado con fuentes externas al sistema. Dentro del sistema el fluido es circulado por bombas u otro dispositivo. El sistema cerrado permite un preciso control de los parámetros ambientales.

#### **4.5 SISTEMAS DE RECIRCULACIÓN PARA LA ACUACULTURA (SRA).**

Timmons *et al.*<sup>15</sup>, aseguran que es la tecnología que permite el cultivo de peces a mayor intensidad. En el SRA, el ambiente es totalmente controlado. Los peces se crían en estanques en las condiciones más seguras posibles pudiendo además protegerse dentro de una instalación cerrada para controlar el ambiente aéreo. El agua circula a través del sistema y solo un pequeño porcentaje del agua es remplazado diariamente. La temperatura, salinidad, pH, alcalinidad, composición química y el oxígeno son monitoreados y continuamente controlados. Los residuos sólidos son filtrados y removidos, se incorpora oxígeno para mantener concentraciones suficientes para la densidad de peces en cultivo, y por último el efluente es tratado en un biofiltro para la conversión biológica, de los residuos causados por este tipo de producciones que se pueden tener las siguientes características:

#### **4.6 RESIDUOS QUE GENERA LA PISCICULTURA**

Para Timmons *et al.*<sup>16</sup>, comparados con los típicos sedimentos municipales los sedimentos de la piscicultura tienen un contenido bajo de sólidos y concentración de demanda química de oxígeno. El NAT es bastante bajo en los sedimentos acuícolas de agua dulce, pero puede aumentar drásticamente si los sedimentos permanecen sin movimiento por un periodo de tiempo y ocurre la mineralización bajo condiciones anaeróbicas. Los sedimentos de la acuicultura tienen contenidos de nitrógeno y fósforo más altos que los sedimentos domésticos. El valor promedio del fósforo total (PT) es 1.3% de la masa sólida seca, mientras que los sedimentos domésticos normales contienen solo un 0.7%. A continuación en la Tabla 4 se presenta una caracterización y comparación de este tipo de sedimentos:

---

<sup>15</sup> TIMMONS, *et al.* Op. cit., p. 6.

<sup>16</sup> *Ibíd.*, p. 320.

**Tabla 4. Características de los sedimentos**

Parámetro	Sedimentos de Piscicultura			Sedimentos Domésticos	
	Rango	Medio	Desv. St.	Rango	Normal
Sólidos totales (%)	1,4 - 2,6	1,8	0,35	2,0 - 8,0	5
SVT (% de TS)	74,6 - 86,6	82,2	4,1	50 - 80	65
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	1590 - 3870	2760	210	2000 - 30000	6000
NAT (mg/L)	6,8 - 25,6	18,3	6,1	100 - 800	400
PT (% de TS)	0,6 - 2,6	1,3	0,7	0,4 - 1,2	0,7
pH	6,0 - 7,2	6,7	0,4	5,0 - 8,0	6
Alcalinidad	284 - 415	334	71	500 - 1500	600
DBO <sub>20</sub> (mg/L)	3250 - 7670	5510	1210		

Fuente: Timmons *et al.* (2002)

## 4.7 CARACTERIZACIÓN DE LOS CONTAMINANTES

Según Crites y Tchobanoglous<sup>17</sup>, los contaminantes encontrados en aguas residuales pueden ser clasificados como físicos, químicos y biológicos. Dentro de los contaminantes físicos y químicos descritos por dichos autores se encuentran:

**4.7.1 Sólidos.** El agua residual tiene una variedad de materiales sólidos que varían desde materia particulada muy fina hasta materiales coloides, en la caracterización de las aguas residuales, los materiales gruesos son removidos generalmente antes de analizar sólidos en la muestra.

**4.7.2 Turbidez.** Como una medida de propiedad de dispersión de la luz de la aguas, es otro parámetro para indicar la calidad de las aguas naturales, y las aguas residuales tratadas con relación al material residual en suspensión coloidal.

**4.7.3 Color.** El color en aguas residuales es causado por sólidos suspendidos, material coloidal y sustancia en solución. El color causado por sólidos suspendidos se llama color aparente mientras que el color causado por sustancias disueltas y coloidales se denomina color verdadero.

<sup>17</sup> CRITES y TCHOBANOGLIOUS. Sistemas de Manejo de Aguas Residuales. Colombia. McGraw-Hill, 2000. p. 5.

**4.7.4 Olor.** El olor de un agua residual fresca es generalmente inofensivo, pero una gran variedad de compuestos malolientes son liberados cuando se produce la degradación biológica bajo condiciones anaerobias de aguas residuales.

**4.7.5 Temperatura.** La temperatura del agua residual por lo general es mayor que la temperatura del agua de abastecimiento como consecuencia de la incorporación de agua caliente proveniente del uso doméstico e industrial. La temperatura del agua es un parámetro muy importante porque afecta directamente las reacciones químicas y las velocidades de reacción, la vida acuática y la adecuación del agua para fines benéficos.

**4.7.6 Densidad.** Es una característica física de gran importancia a la hora de establecer la formación potencial de densidad en sedimentadores, humedales artificiales y otras unidades de tratamiento.

**4.7.7 Conductividad.** Como la corriente eléctrica es transportada por iones en solución, el aumento en la concentración de iones provoca un aumento en la conductividad. Por tanto el valor de la medida de la conductividad eléctrica es usado como un parámetro sustituto de la concentración de sólidos disueltos totales.

**4.7.8 pH.** La concentración de iones hidrogeno en el agua está íntimamente relacionada con la extensión de la reacción de disociación de las moléculas de agua. El intervalo adecuado de pH para la existencia de mayor parte de vida biológica es relativamente estrecho, generalmente entre pH 5 y 9. Las aguas residuales con pH menores a 5 o superiores a 9 son de difícil tratamiento mediante procesos biológicos. Si el pH del agua residual tratada no es ajustado antes de ser vertido, el pH de la fuente receptora puede ser alterado; por ello la mayoría de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales deben ser descargados dentro de los límites específicos de pH.

**4.7.9 Nitrógeno.** Dado que el nitrógeno y el fosforo son esenciales para el crecimiento biológico, reciben el nombre de nutrientes o bioestimulantes. Cantidades trazas de otros elementos, como el hierro, también son necesarios para el crecimiento biológico, pero el nitrógeno y el fosforo son en la mayoría de los casos los nutrientes más importantes. Debido a que el nitrógeno es esencial para la síntesis de proteínas, se necesitan conocer datos sobre la presencia de este nutriente al momento de evaluar la tratabilidad del agua residual mediante procesos biológicos.

**4.7.9 Alcalinidad.** Se define como la capacidad para neutralizar ácidos. En aguas residuales la alcalinidad se debe a la presencia de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de elementos como calcio, magnesio sodio y potasio, o de ión amonio.

**4.7.10 Cloruros.** Los cloruros en aguas naturales provienen de los cloruros lixiviados de las rocas y los suelos con los que ellas hacen contacto. Por ejemplo las heces humanas aportan aproximadamente 6g de cloruros por persona por día.

**4.7.11 Azufre.** El azufre es un elemento indispensable para la síntesis de proteínas y por eso se produce cuando hay degradación de las mismas.

**4.7.12 Metales.** Todos los organismos vivos requieren para su adecuado crecimiento elementos como hierro, cromo, cobre, cinc, cobalto en cantidades diferentes (cantidades micro y macro) aun que las cantidades micro y macro son esenciales para un normal desarrollo de la vida biológica, estos elementos pueden llegar a ser tóxicos cuando se presentan en cantidades elevadas.

**4.7.13 Gases.** La determinación de gases disueltos tales como amoniaco, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, metano y oxígeno, se realiza para ayudar en la operación de sistemas de tratamiento de aguas residuales. La medición de oxígeno disuelto y amoniaco se realiza para controlar y monitorear los procesos de tratamiento biológico aerobios. La presencia de sulfuro de hidrógeno se determina no solo por ser un gas tóxico y de mal olor, sino porque su formación puede causar corrosión en alcantarillados de concreto.

**4.7.14 Demanda bioquímica de oxígeno.** Los mismos autores afirman<sup>18</sup> que si existe suficiente oxígeno disponible, la disposición biológica aerobia de un desecho orgánico continuará hasta que el desecho se haya consumido. Tres actividades más o menos diferenciadas pueden ocurrir. Primero, una parte de los desechos se oxida a productos finales y con ello los microorganismos consiguen energía para el mantenimiento de las células y la síntesis de nuevo tejido celular. Simultáneamente, otra fracción del desecho se convierte en tejido nuevo empleando la energía liberada durante la oxidación. Por último cuando se consume la materia orgánica, las nuevas células empiezan a consumir su propio tejido celular con el fin de obtener energía para mantenimiento celular, este proceso es llamado respiración endógena.

---

<sup>18</sup> Ibid., p. 33-58.

## 4.8 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Según Metcalf y Eddy<sup>19</sup>, las operaciones y procesos unitarios se agrupan conjuntamente para constituir lo que se conoce como tratamiento primario, secundario y terciario (o avanzado). El término primario se refiere a las operaciones físicas unitarias; el secundario hace referencia a los procesos químicos y biológicos unitarios, y el terciario consiste en combinación de los tres. Debe hacerse notar que estos tratamientos son arbitrarios y en la mayoría de los casos de poco valor. Para este estudio se hace énfasis en el uso de biofiltros:

Los biofiltros corresponden a la categoría de tratamiento primario y secundario de aguas residuales por que realiza remoción de materia orgánica nitrógeno y por el proceso de nitrificación.

**4.8.1 Los Biofiltros.** Timmons *et al.*<sup>20</sup>, sostienen que hay considerables debates sobre cuál es la tecnología de filtro biológico más apropiada para aplicaciones acuícolas intensivas. El biofiltro ideal sería el que pudiese remover el 100% del amoníaco de la alimentación, no producir nitrito, requerir de poca superficie, usar un medio de soporte barato no requerir presión de agua, ni mantención para operar, y no capturar sólidos. No hay un biofiltro que cumpla con todas esas ideas, cada biofiltro tiene sus propias ventajas y desventajas y áreas de mejor aplicación. Los sistemas de recirculación grandes se han estado moviendo en la dirección del uso de biofiltros (lecho expandido, lecho fluidizado y gránulos flotantes). Sin embargo hay una gran variedad de biofiltros que se usan comúnmente en SRA intensivos: biofiltros sumergidos o inundados de lecho fijo, filtros de escurrimiento de lecho fijo (de película descendente percoladores o Trickling), Contactadores Biológicos Rotatorios (CBR), biofiltros de lecho dinámico, y biofiltros de lecho fluidizado.

Según Malone y Pfeiffer<sup>21</sup>, los biofiltros pueden estar agrupados en cuatro bloques básicos con características similares como se lo observa en la Figura 1 a continuación.

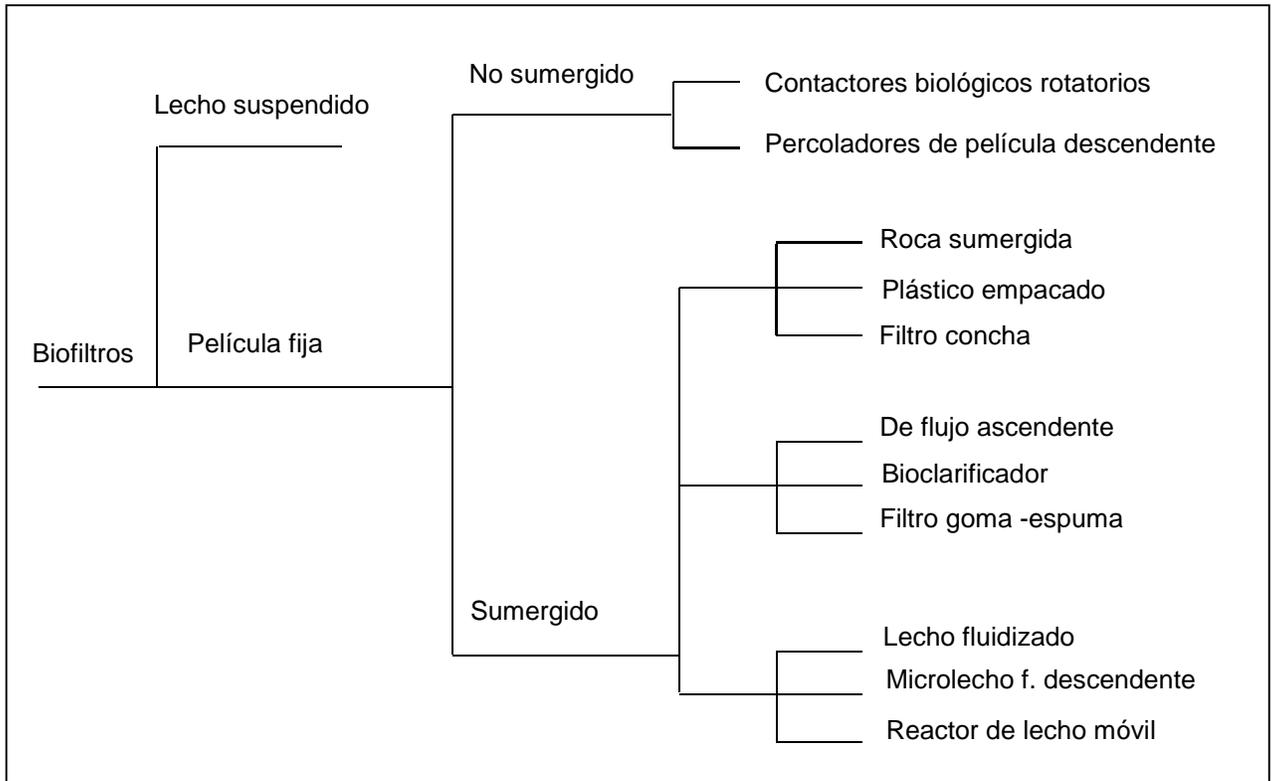
---

<sup>19</sup> METCALF y EDDY. INGENIERÍA SANITARIA Tratamiento, Evacuación y Reutilización de Aguas Residuales. vol, 2. España.: labor, S.A., 1985. p.134.

<sup>20</sup> TIMMONS, *et al.* Op. cit., p. 214.

<sup>21</sup> MALONE y PFEIFFER. Rating fixed film nitrifying biofilters used in recirculating aquaculture systems. En: aquacultural engineering. Agosto, 2006. vol. 34. p. 390.

**Figura 1. Clasificación de los biofiltros**



Fuente: Adaptado de Malone y Pfeiffer (2006).

**4.8.1.1 Biofiltros sumergidos.** Consisten en un lecho de medio de soporte sobre el cual se desarrollan bacterias nitrificantes, por el que pasa agua residual ya sea en flujo ascendente o descendente. El TRH puede ser controlado ajustando el flujo del agua a través del filtro. Los sólidos se pueden acumular dentro de filtros sumergidos, junto con la masa celular producto de las bacterias nitrificantes y heterotróficas. Este proceso puede eventualmente bloquear los espacios vacíos y entonces, en una operación de largo plazo, debe usarse algún mecanismo para desaguar los sólidos del filtro. El medio utilizado para los biofiltros sumergidos ha sido tradicionalmente de un gran tamaño, como roca partida uniformemente con 5 cm de diámetro o un medio plástico de 2,5 cm de diámetro. Para proveer grandes espacios vacíos para prevenir el atascamiento de los filtros

**4.8.1.2 Biofiltros percoladores.** Según Timmons *et al.*<sup>22</sup>, los biofiltros percoladores operan de igual modo, como los biofiltros sumergidos, excepto que el agua residual fluye hacia abajo por sobre el medio y mantiene la película

<sup>22</sup>TIMMONS, *et al.* Op. cit., p. 216-218.

bacteriana mojada, pero nunca completamente sumergida. Los filtros percoladores han sido ampliamente utilizados en acuicultura, porque son fáciles de construir y operar, son auto aireantes, muy útiles para desgasificar dióxido de carbono, y tiene un costo moderado, en tratamiento de aguas residuales municipales, los sistemas percoladores fueron tradicionalmente construidos en roca, pero hoy en día los filtros usan un medio plástico, por su bajo peso, área de superficie específica (100-300 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>) y alta fricción de hueco (>90%). De acuerdo al mismo autor se ha reportado criterios para el diseño de filtros percoladores. Los valores típicos son: tasa de carga hidráulica 100 a 250 m<sup>3</sup>/día por m<sup>2</sup>; profundidad de medio de 1 a 5 m; área de superficie específica de medio de 100-300 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>; y rangos de remoción del Nitrógeno Amoniacal Total (NAT) de 0,1 a 0,9 g/día/ m<sup>2</sup> del área de superficie.

En la Tabla 5 se muestran las ventajas y desventajas de este sistema:

**Tabla 5. Ventajas y desventajas de los biofiltros percoladores**

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• De simple diseño y construcción.</li> <li>• De uso extenso en el proceso de aguas servidas que deben mejorar disponibilidad de materiales y costos.</li> <li>• Permite aireación y remoción de CO<sub>2</sub> en corriente con biofiltración.</li> <li>• Disponibilidad amplia de rellenos y asistencia de diseño por parte de proveedores prestigiosos facilita los esfuerzos de diseño.</li> <li>• El sistema que los incluye es altamente estable.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El desprendimiento de la película es suficientemente grande como para producir problemas y requerir de filtración mecánica posterior al biofiltro.</li> <li>• En sistemas acuícolas de agua fría de alta carga, este diseño tiende a ser muy grande y caro.</li> <li>• El soporte en si puede ser muy caro debido a su reducida superficie específica.</li> </ul>

Fuente: Adaptado de Timmons *et al.* (2002)

**4.8.2 Experiencias en sistemas de tratamiento de aguas residuales mediante el uso de biofiltros.** De acuerdo con Pedreira *et al.*<sup>23</sup>, en su análisis de resultados manifestó que los biofiltros que contienen sustratos a base de concha tienden a

<sup>23</sup> PEDREIRA, *et al.* Biofiltração da água e tipos de substrato na larvicultura do pacamã. *En: Pesq. agropec.* Mayo, 2009. vol.44, no. 5., p. 511-518.

aumentar el pH del agua debido a ser una estructura calcárea que afecta este parámetro.

Greiner y Timmons<sup>24</sup> probaron dos sustratos con diferentes diámetros para el cultivo de tilapia (*Niloticus x O. aureus*) encontraron que el sustrato de mayor diámetro tiene una tasa de nitrificación de Amoniaco 7,5 veces mayor que la de menor diámetro; Sin embargo, el diámetro más pequeño eliminó del sistema aproximadamente 3,2 veces más amoníaco total por día y por unidad de volumen.

Kemmadamrong y Deesomsak<sup>25</sup>, realizaron experimentos en Tailandia sobre filtros aerobios de flujo ascendente (up-flow aerobic biofilters: UABF) donde se determinó su eficiencia en la eliminación del carbono orgánico en unidades idénticas. Para la experiencia se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones de diseño: Un biofiltro aireado de flujo ascendente, con unidades de tratamiento en acrílico con un diámetro interior de 15 cm, con una altura de llenado de 1 m de arena y tamaño efectivo de 1,49 mm. Ambos reactores se aclimataron inicialmente con una mezcla de lodos activados tomados de una planta de tratamiento de aguas residuales en Chiang Mai. Las tasas de flujo de aire fueron aproximadamente 10 veces el valor de las de aguas residuales, los reactores fueron operados hasta encontrar un comportamiento estacionario para las velocidades de carga probadas. Los autores reportaron que se requiere aproximadamente, por lo general de aproximadamente 2 semanas de operación para alcanzar dicho estado estacionario.

Los mismos autores señalan que las unidades UABF fueron utilizadas para el tratamiento de agua residual sintética cuyas concentraciones de DQO oscilaron entre 100 y 120 mg/L. Las unidades UABF se operaron con una tasa de flujo de líquido de 0.071-0.848 m<sup>3</sup>/d equivalentes a tasas de carga hidráulica (hydraulic loading rate: HLR) entre 4,0 y 48,0 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d; por su parte, las tasas de carga orgánica (organic loading rate: OLR) fueron de 0,40 a 4,57 kg DQO/(m<sup>3</sup>.d) y demostraron desempeño satisfactorio. La eficiencia de remoción de materia orgánica alcanzó el 86% sobre la base de DQO total y del 92% sobre la base de la DQO filtrada. El trabajo experimental demostró que las UABF fueron eficaces en el tratamiento de afluentes con concentraciones de 0,40 kg DQO/(m<sup>3</sup>.d) sin lavado. Para la comparación de la eficiencia de este tipo de reactor tuvieron en cuenta tres sistemas más como se muestra en la Tabla 6:

---

<sup>24</sup> GREINER y TIMMONS. En: Aquacultural Engineering. Abril, 1998. vol. 18,. p. 189.

<sup>25</sup> KEMMADAMRONG y DEESOMSAK. Performance Study Of Wastewater Treatment By Upflow Aerated Sand-Media Biofilter. EN: WISA 2000. Mayo- Junio, 2000. p. 2.

**Tabla 6. Comparación de rendimiento de UABF con otros reactores aerobios**

TIPO	Tasas de carga orgánica DQO (kg/m <sup>3</sup> )	Concentración DQO (mg/L)	%DQO removido
TF	2 - 3	95 - 100	>70
SSF	3 - 4	100 - 110	76
DABF	0,56 - 5,73	100 - 120	87 - 96
UABF	0,40 - 4,57	97 - 103	82 - 95

Fuente: Adaptado de Kemmadamrong y Deesomsak (2000)<sup>26</sup>

En la tabla se comparan algunos datos publicados para filtros percoladores (trickling filters: TF), filtro lento de arena (slow sand filters: SSF), filtro aerobio de flujo descendente (downflow aerobic biofilters DABF) y UABF en el tratamiento de aguas residuales con bajas concentraciones, donde el UABF demostró ser más eficaz para el tratamiento de este tipo de agua residual y se comparó favorablemente con otros reactores aerobios existentes; sus principales ventajas fueron: 1) diseño muy simple; 2) no requiere de un tanque de sedimentación secundario, y 3) tiene capacidad para retener los sólidos biológicos activos para bajas y altas tasas de carga orgánica.

Según lo expuesto por Pujol, Lemel y Gousailles<sup>27</sup>, quienes evaluaron durante un periodo de dos años un sistema de recirculación utilizando filtros biológicos aireados (biological aerated filters: BAF) de medio granular, donde se obtuvo la remoción más alta de demanda biológica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) y sólidos suspendidos (SS) a una velocidad del agua de 10 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/h el estudio demostró que el TRH corto (10 minutos) no influye en el rendimiento del reactor; además, la velocidad alta influye de manera positiva en esta clase de filtros y mejora la transferencia masiva entre líquido y bacterias. Este reactor fue operado bajo las siguientes condiciones: superficie de 144 m<sup>2</sup> y altura de 4 m; ubicada en una planta de hatchery, con capacidad de diseño de 25 m<sup>3</sup>/s. de lo que concluyeron:

- Los más altos valores de nitrificación se obtuvieron a mayor velocidad del agua.
- El aumento de la velocidad del agua no tuvo repercusión importante; obteniendo una eficiencia en remoción de sólidos suspendidos menor a 60% con velocidad de 10 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/h

<sup>26</sup> Ibid., p. 1-8.

<sup>27</sup> Pujol, Lemel y Gousailles. Keypoint Of Nitrification In An Upflow Biofiltration Reactor. En: Wat.Sci.Tech. 1998. vol. 38. vol.3., p 43-49.

- El TRH en el biofiltro fue bajo menor a 10 minutos sin tener consecuencias en el proceso.

Pelanda; Lemmel y Pujol<sup>28</sup>, a partir de experiencias obtenidas en la evaluación de un reactor para biofiltración de las siguientes características: medio granular con área de 0,27m<sup>2</sup>, altura de 3–4 m, tomando el agua por medio de un afluente sintético de agua subterránea al que se le adiciono NH<sub>4</sub>CL, HHCO<sub>3</sub> y H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>; además, se agregó carbono inorgánico y fósforo para conservar el pH, con un rango de T° entre 8 y 20°C. El reactor inicio su funcionamiento con concentraciones en afluente de NH<sub>4</sub><sup>+</sup>- N entre 14 y 55 mg/L; y se obtuvieron eficiencias de remoción del 90% en eliminación de NH<sub>4</sub><sup>+</sup>- N sobre un biofiltro de 3 m. La eliminación fue mantenida en 80% con una carga contaminante de 3 kg/m<sup>3</sup>/d. En la comparación de la eliminación de carga versus carga aplicada, se presentó la mayor eliminación en 2,5–2,9 kg/m<sup>3</sup>/d y un rango de temperatura entre 13 – 16°C, removiendo entre 80 y 90%, a velocidad del agua de 15–30 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> d. y TRH de 6–12 minutos. Comprobando que la velocidad del agua trae efectos positivos en la eliminación de la carga contaminante. Los mismos autores compararon los biofiltros de altura de 3 y 4 m y definieron que tienen la misma capacidad de nitrificación.

---

<sup>28</sup> Pelanda; Lemmel y Pujol. High Nitrification Rate With Upflow Biofiltration. En: Wat.Sci.Tech. Diciembre, 1996. vol. 34. no. 1-2,. p. 347-353.

## 5. DISEÑO METODOLÓGICO

### 5.1 LOCALIZACIÓN

La investigación se desarrolló en el Programa de Ingeniería en Producción Acuícola, en las instalaciones de la Universidad de Nariño, sede Torobajo, al Noroccidente de la Ciudad de San Juan de Pasto, Departamento de Nariño, con altitud de 2584 m.s.n.m., Temperatura media de 14°C, precipitación anual de 1100mm, humedad relativa del 75%, Latitud 0.1°09' Norte, Longitud 77°08' Oeste.

**Figura 2. Laboratorio de hidráulica Ingeniería en Producción Acuícola**



### 5.2 PERIODO DE ESTUDIO

La investigación se realizó en tres etapas, la primera comprendió la respectiva adecuación de las instalaciones, el transporte y aclimatación de los animales; la segunda el periodo de maduración de los biofiltros y el periodo experimental: muestreo, alimentación, toma de parámetros físico químico y la tercera etapa el procesamiento de datos, análisis de resultados e informe final.

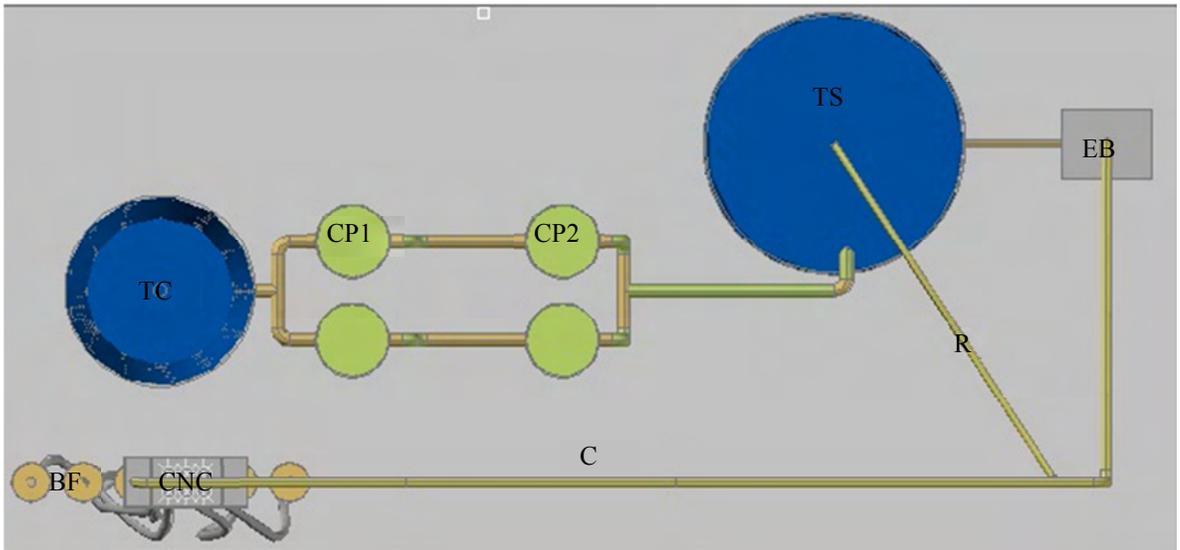
### 5.3 MATERIALES Y MÉTODOS

Los alevinos de Trucha Arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) con un peso promedio de 50 gr se iniciaron con alimentación exógena, a densidades de  $5 \text{ kg/m}^3$  en tanques de 250 L, con capacidad útil de 234 L y un fotoperiodo de 12 h de claridad y doce horas de oscuridad. El proyecto de investigación evaluó la eficiencia del sistema en términos de remoción de materia orgánica y nitrificación para los dos tratamientos con diferentes tiempos de retención hidráulica con tres réplicas cada uno.

**Figura 3. Fotografía del sistema evaluado**

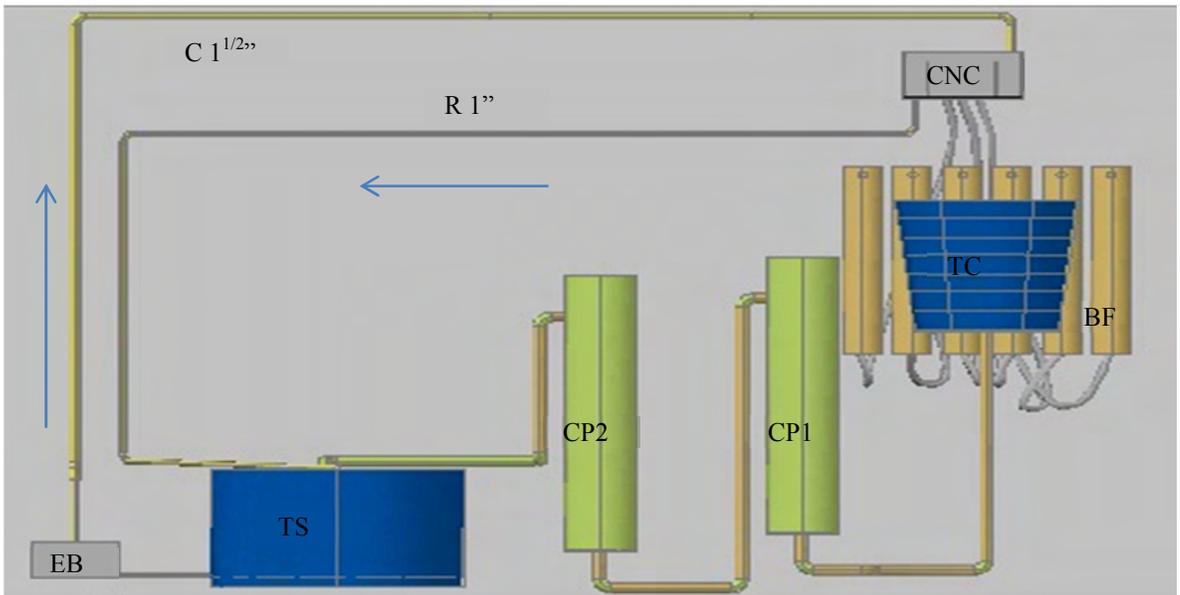


**Figura 4. Vista en planta del sistema**



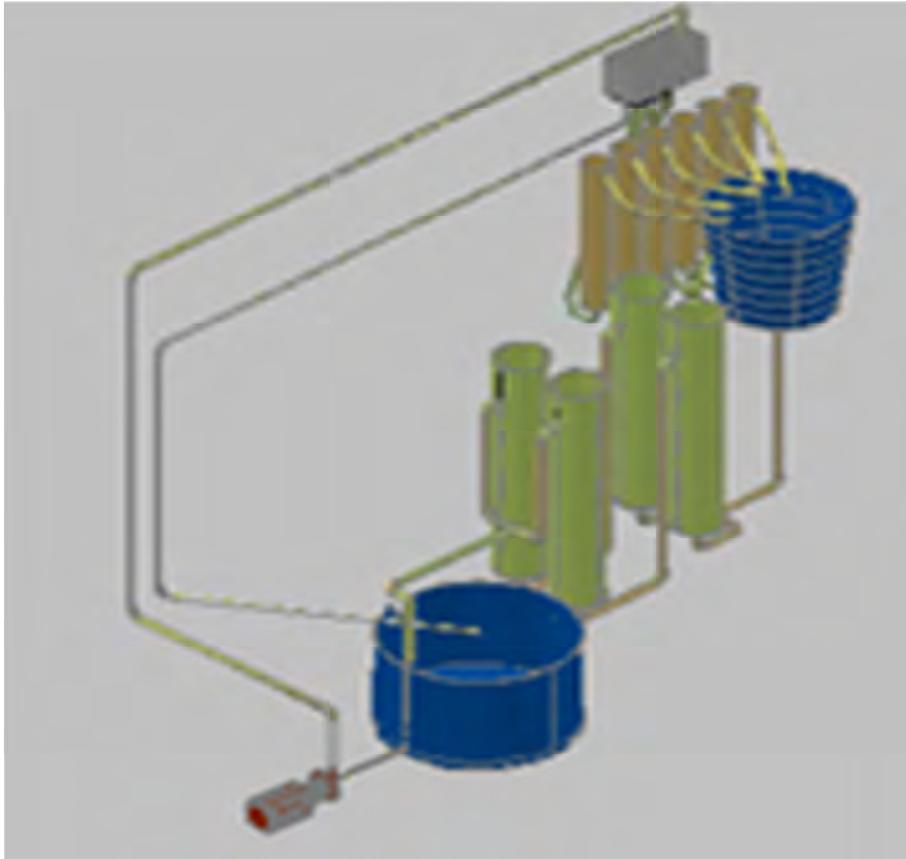
Caja de nivel constante (CNC), tanque de cultivo (TC), biofiltro (BF), columna de prefiltración 1 (CP1), columna de prefiltración 2 (CP2), tanque de succión (TS), electro bomba (EB), conducción (C), retorno (R).

**Figura 5. Vista posterior del sistema**



Caja de nivel constante (CNC), tanque de cultivo (TC), biofiltro (BF), columna de prefiltración 1 (CP1), columna de prefiltración 2 (CP2), tanque de succión (TS), electro bomba (EB), conducción (C), retorno (R).

**Figura 6. Vista isométrica sentido NorEste**



**5.3.1 Instalaciones.** El proyecto de investigación estuvo constituido por un sistema de recirculación para acuicultura conformado por dos unidades de prefiltración para remoción de partículas de gran tamaño y el segundo constituido por un sistema de biofiltración para remoción de materia orgánica, nutrientes y sólidos. A continuación se detallan la ubicación, los elementos y equipos utilizados en la evaluación:

- Un tanque plástico con capacidad de 0,250 m<sup>3</sup> destinado al cultivo de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*).
- Dos líneas de pre-filtros granulares de flujo vertical ascendente para retención de sólidos de gran tamaño contenidos en el efluente residual del tanque de cultivo, que funcionan de manera alterna e independiente. Teniendo en cuenta las recomendaciones de funcionamiento de anteriores investigaciones para estabilizar niveles de alcalinidad se incorporó granito

(material derivado de la piedra caliza) en la última capa de la segunda columna de prefiltración. Según la Coordinación General de Minería de México<sup>29</sup>, las calizas son rocas sedimentarias que contienen por lo menos 50% de minerales de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) y dolomita ( $\text{Ca, Mg (CO}_3$ )), predominando la calcita.

**Figura 7. Implementación del granito en la segunda torre de prefiltración**



A continuación en la Figura 8 se detalla la composición del lecho filtrante para esta primera parte: los materiales granulares que se utilizaron fueron seleccionados por medio de los procedimientos estipulados en la norma NTC 1522<sup>30</sup>. y para ello se utilizaron los tamices recomendada por la serie NTC 32<sup>31</sup>

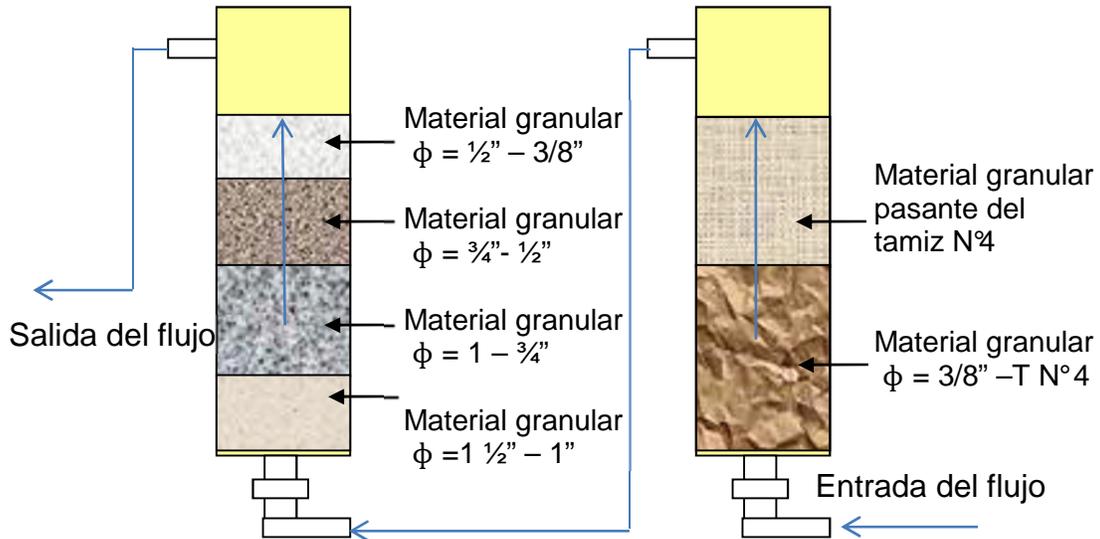
---

<sup>29</sup> Coordinación General De Minería Dirección General De Promoción Minera (México). Perfil De Mercado De La Caliza Y Sus Derivados. [en línea]. Edición Internet México: 2005. [Citado en 11 abril de 2012]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.economia.dgm.gob.mx/dgpm/perfiles/Caliza.pdf> >

<sup>30</sup> NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Ensayo Para Determinar la granulometría por Tamizado. NTC 1522. Bogotá, D.C.: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. 1999. p 1-6.

<sup>31</sup> NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Tejido de Alambre y Tamices Para propósitos de Ensayo. NTC 32. Bogotá, D.C.: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. 2002. p. 1-11.

**Figura 8. Composición granulométrica del sistema de pre-filtración**



**Tabla. 7. Composición de lecho filtrante en el sistema de prefiltración**

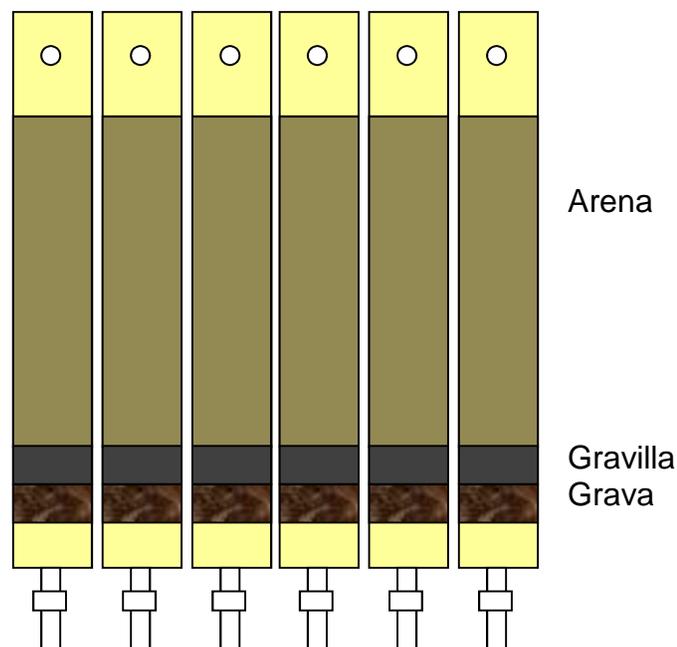
COLUMNA (C)	DIÁMETRO TAMIZ	ALTURA (cm)	PESO (kg)
1	3/8"- N° 4	22.5	7,6
	N°4	37	7
2	1 1/2" -1"	17	4,6
	1" - 3/4"	22	7,8
	3/4" - 1/2"	26	9,2
	1/2" - 3/8"	22.5	7,4

- Un tanque de recepción de los efluentes de los prefiltros que funcionó a su vez como tanque de succión para bombear el flujo hacia la caja de nivel constante y los sistemas de biofiltración
- Un sistema de mangueras para distribución del efluente desde la caja de nivel hacia cada Biofiltro que adicionalmente llevaron una serie de válvulas

necesarias para regular el tiempo de retención hidráulica en cada unidad de biofiltración.

- Un sistema de tuberías en PVC para el transporte a flujo libre como a presión, por gravedad o por bombeo, de las aguas residuales y de las aguas tratadas en el sistema de recirculación.
- Seis unidades de biofiltros aerobios de medio granular de flujo ascendente. Los biofiltros conservaron iguales características geométricas de diámetro interno y altura. Igual medio de soporte (gravilla con igual granulometría y altura de lecho), pero diferente funcionamiento hidráulico en términos de TRH y tasas de aplicación superficial.
- La unidad experimental estuvo constituida por un reactor de lecho fijo de flujo ascendente elaborado en tubería PVC sanitaria de diámetro nominal de 3" (0,075 m) y altura de 1,0 m. El ingreso de agua se realizó por la parte inferior del tubo con base en acrílico con perforación de 1/2" para acoplar adaptadores e insertos, el ingreso de agua se controló con válvulas tipo bola de PVC para regulación de caudal. A continuación se detalla la composición del lecho filtrante:

- **Figura 9. Composición granulométrica del sistema de bio-filtración**



**Tabla 8. Composición peso y altura del lecho filtrante**

Componente	Peso (kg)	Granulometría (mm)	Altura (cm)
Arena	3,500	0,45	60
Grava	0,350	2,00	5
Grava	0,165	4,76	5

- Una unidad de bombeo constituida por una electrobomba de ½ HP y sus respectivos accesorios.
- Un sistema de aeración de la unidad de cultivo, constituido por una línea de aire proveniente del blówer de 2,5 HP disponible en el laboratorio de sistemas de recirculación del programa Ingeniería en Producción Acuícola.

**5.3.2 Material biológico.** 25 ejemplares de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) de 50 gramos.

**5.3.3 Insumos.** Balanceado comercial con 45% de proteína.

**Figura 10. Alimento balanceado**



#### **5.3.4. Reactivos**

- Ácido sulfúrico H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,02 N.
- Álcali-yoduro-acida.

- Cloruro de sodio.
- EDTA 0,01 N.
- Hidróxido de sódio 0,02N, Hidróxido de sódio 5 N.
- Hiposulfito de sodio.
- Indicador de Fenolftaleína, Indicador mixto.
- Nitra Ver 6, reactivo para nitrato, Nitri Ver 3, reactivo para nitrito.
- Persulfato de potasio.
- Solución ácido sulfúrico 5,25 N.
- Solución cloruro de calcio  $\text{CaCl}_2$ .
- Solución cloruro férrico  $\text{FeCl}_3$ .
- Solución de almidón.
- Solución de Molibdato de amonio.
- Solución digestiva para DQO (0 - 1500 ppm).
- Solución reguladora de pH ( $\text{NH}_4\text{Cl-NH}_4\text{OH}$ ).
- Solución sulfato de magnesio  $\text{MgSO}_4$ .
- Sulfato manganoso  $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ .
- Tiosulfato de sodio.

**Figura 11. Reactivos utilizados**

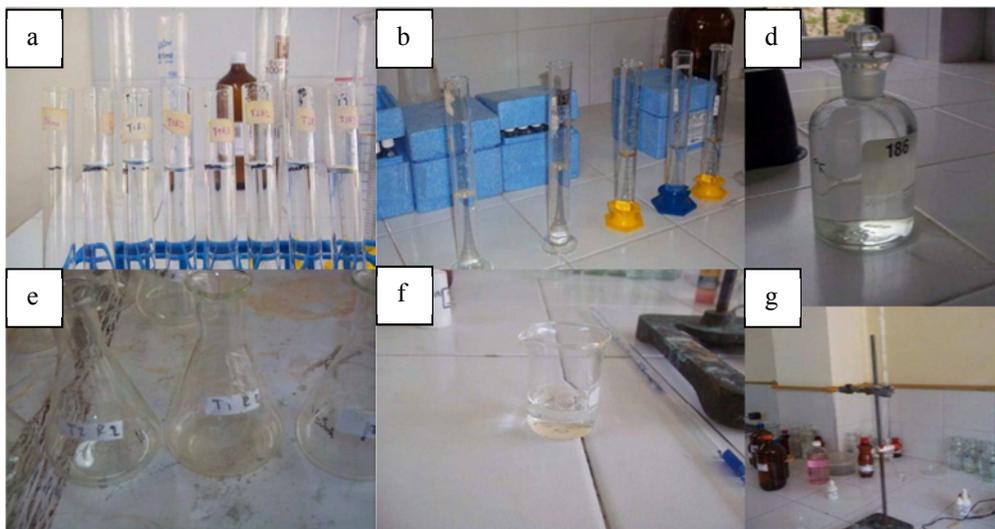


Reactivos proporcionados por la Universidad de Nariño (a), reactivo para realizar prueba DQO (b y c), presentación reactivo para DQO bajo rango (c), presentación de reactivos para Fosfato, Nitrito, Nitrato (d), presentación de reactivo en sobre (e), presentación reactivo para DQO alto rango (f)

### 5.3.5 Materiales

- Baldes plásticos de 20 L.
- Buretas de 25 mL.
- Capsulas de porcelana.
- Embudos.
- Erlenmeyer de 100, 250 y 500 mL.
- Frascos para la toma de muestras.
- Frascos Winkler 300 mL.
- Mecheros bunsen.
- Nasas plásticas.
- Papel filtro.
- Pinza para capsula de porcelana.
- Pipetas de 1,2 y 5 mL.
- Placa calorimétrica.
- Probetas de 250 mL.
- Soporte para bureta

**Figura 12. Materiales de vidriería utilizados**



Tubo de ensayo de 25 mL(a), probetas (b), Winkler (c), Erlenmeyer (e), vaso de precipitado (f), bureta y soporte (g)

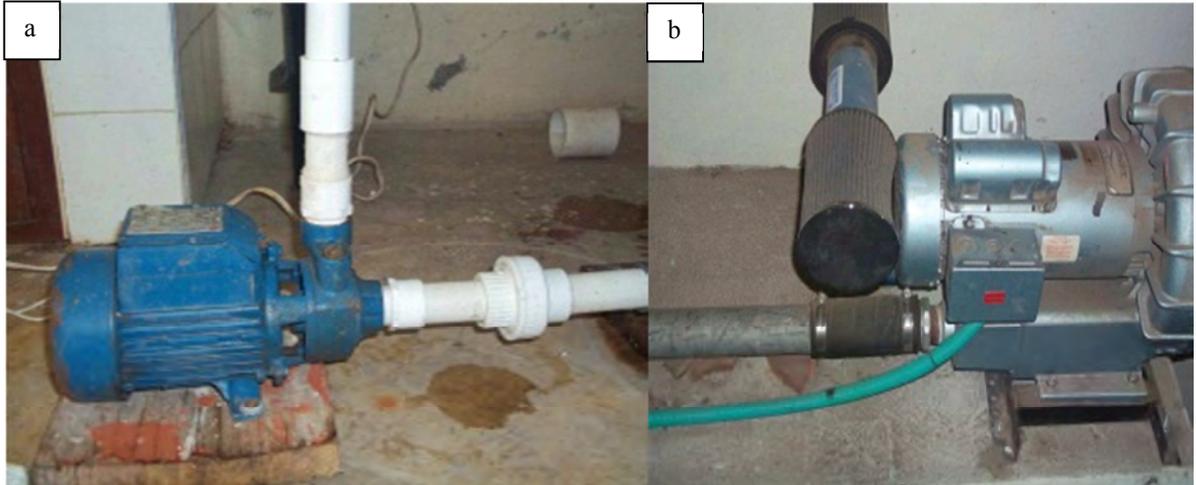
### 5.3.6 Equipos

- Balanza METTLER 160 g  $\pm$  0,01 mg, Balanza OHAUS 160 g  $\pm$  0,1 g. (Figura 13-h)
- Balanza OHAUS 4000 g  $\pm$  0,1 g. (Figura 13-d)
- Blower 2,5 HP sweet water (Figura 14-b)
- Cámara digital Canon Power Shot SD770 IS.
- Colorímetro DR/850. (Figura 13-e)
- Computador.
- Cronometro.
- Electrobomba 1/2 HP.Happy (Figura 14-a)
- Estufa eléctrica HACEB.
- Horno de secado de muestras Memmert 30 -250°C.
- Mufla Terrigeno 1000°C. (Figura 13-f)
- Oxímetro YSI 50A. (Figura 13-b)
- pH metro VWR 8010. (Figura 13-g)
- Termo Reactor Digital HACH DRB 200 100 – 155°C. (Figura 13-a)

**Figura 13. Equipos electrónicos para control de calidad del agua**



**Figura 14. Equipos eléctricos utilizados**



**5.3.7 Plan de manejo.** Se tuvo en cuenta las siguientes especificaciones:

**5.3.7.1 Adecuación de las instalaciones.** Para que el sistema funcione adecuadamente se hizo limpieza de laboratorio montaje de prefiltros, y de filtros, evaluación de filtraciones durante un periodo de 8 días, y reparación de fugas.

**5.3.7.2 Transporte y aclimatización de los animales.** Los animales fueron transportados desde las jaulas flotantes de la estación piscícola INTIYACO, hasta el laboratorio de Hidráulica del Programa de Ingeniería en Producción Acuícola de la Universidad de Nariño. Para llevar a cabo este procedimiento se optó por someter a los ejemplares a un ayuno previo de 24 horas, con el fin de evitar el aumento en el consumo de oxígeno disuelto y la eliminación de desechos los cuales disminuyen la calidad del agua en las bolsas de transporte. Posteriormente los animales se empacaron en bolsas plásticas calibre 2 mm con capacidad de 20 litros a relación 1/3 de agua, por 2/3 de oxígeno. Una vez transportadas las bolsas con los animales, se llevaron a un tanque de cultivo por 1 hora, donde se realizó la respectiva aclimatación con el fin de equilibrar la temperatura y pH. A cada bolsa se agregó 5 g/L de cloruro de sodio, como tratamiento profiláctico, De acuerdo con Kinkelin; Michel y Ghittino<sup>32</sup>, la adición de cloruro de sodio en el agua disminuirá o suprimirá la mortalidad en especies débiles sometidas a transporte, sabiendo que el estrés se manifiesta por un descenso de la tasa de cloruros en el plasma, el hecho de agregarlos al agua, parece tener un efecto preventivo o compensador.

<sup>32</sup> KINKELIN; MICHEL y GHITTINO. Tratamiento de las enfermedades de los peces. España.: Acribia, S.A. 1985. p. 276.

Los animales aclimatados se liberaron en la unidad experimental dejándolos por un periodo de adaptación de 7 días, tiempo en el cual se suministró alimento a saciedad.

**5.3.7.3 Periodo de maduración de los biofiltros.** Se mantuvo el sistema de recirculación en funcionamiento durante un periodo de tiempo mayor a 20 días recomendado por Timmons *et al.*<sup>33</sup> Periodo en el que ya existe maduración de cada uno de los tratamientos a evaluar.

**5.3.7.4 Muestreo y alimentación.** Cada quince días se realizaron muestreos de peso de los animales para determinar la biomasa y por ende la cantidad de alimento a suministrar hasta el próximo muestreo; la alimentación se realizó con alimento balanceado de 45% de proteína en relación al 2,5% de la biomasa promedio de los animales, cabe resaltar que para la temperatura manejada de 18°C promedio en el tanque de cultivo esta alimentación estaba subcalculada de acuerdo a lo recomendado por Timmons *et al.*<sup>34</sup> que es de 5,7 a 6,3% de la biomasa, teniendo en cuenta peso y temperatura.

**Figura 15. Muestreo de animales**



**5.3.7.5 Parámetros físico químicos.** Los muestreos se realizaron diaria y semanalmente en horas de la mañana, con base a los Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales,<sup>35</sup> establecidas por APHA-AWWA-WPCF.

<sup>33</sup> TIMMONS, *et al.* Op. cit., p. 209 – 210.

<sup>34</sup> Ibid., p. 501.

<sup>35</sup> APHA- AWWA- WPCF. Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Madrid.: Ediciones Días de Santos S.A., 1992. p 122.

**5.3.7.6 Toma de muestras.** Para el análisis se tomaron de cada unidad experimental 2000 mL aproximadamente de volumen de agua. Teniendo en cuenta la toma de muestras se hizo una reposición 22 L, equivalente al 4,8% del volumen total del sistema.

## 5.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para determinar la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos se utilizó la prueba t de comparación de medias. Debido a que la respuesta fue tomada a través del tiempo ésta se constituyó en una serie cronológica, para lo que se hizo necesario utilizar el suavizado según lo recomendado por Anderson; Sweeney y Williams<sup>36</sup>, quienes afirman que el objetivo de esta técnica estadística es quitar las fluctuaciones aleatorias o crestas debidas al componente irregular de la serie cronológica (o reacciones anormales del sistema). También afirman que el componente irregular explica las desviaciones determinadas por factores de tendencia y los componentes cíclicos y estacionarios los cuales se deben a factores imprevisibles y no recurrentes. Pevio a la utilización de esta se hizo necesario realizar la prueba F (prueba F es requisito para aplicar la prueba T que al no conocer las desviaciones las asumen mediante los datos obtenidos pero sin saber si son iguales o diferentes y cuando prueba F da la respuesta prueba T continua con el siguiente procedimiento para concluir el análisis estadístico) para determinar la igualdad de las varianzas.

Mediante el paquete estadístico STATGRAPHICS PLUS versión 5.1, se obtuvieron las series suavizadas y las comparaciones de medias para los diferentes parámetros

**Hipótesis.** El experimento pretendió contrastar las hipótesis

### Hipótesis nula

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

Los tratamientos no presentan diferencias estadísticas significativas.

---

<sup>36</sup> ANDERSON; SWEENEY y WILLIAMS. Estadística Para Administración y Economía. 2 ed. México.: THOMAS, 2001. p.435.

## Hipótesis Alternativa

$$H_0: \mu_1 \neq \mu_2$$

Los tratamientos presentan diferencias estadísticas significativas.

## 5.5 VARIABLES A EVALUAR.

**Eficiencia.** En la presente investigación, se determinó la eficiencia en términos de remoción de demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno amoniacal total (NAT), amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), sólidos fijos totales (SFT), color aparente y turbiedad; de acuerdo con von Sperling<sup>37</sup>, la eficiencia consiste en la medición del desempeño de una unidad de tratamiento en la remoción de un compuesto o contaminante.

$$\%E = \frac{\text{entrada} - \text{salida}}{\text{entrada}} * 100$$

Donde:

- %E : porcentaje de eficiencia
- Entrada : concentración a la entrada de cada tratamiento
- Salida : concentración a la salida de cada tratamiento

**5.6 TRATAMIENTOS.** Los tratamientos se distribuyeron de la siguiente manera:

**T1** reactor flujo ascendente con TRH: 15 a 20 min.

**T2** reactor flujo ascendente con TRH 20 a 25 min.

Cada uno se le definió un TRH, de tal manera que los 6 biofiltros fueron divididos en dos partes iguales, tres de ellos fueron operados con un TRH de 15 a 20 min con caudal de 3,8-5,066  $\text{cm}^3/\text{s}$ , tasa de aplicación superficial de 71,9-95,9  $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{día}$  y los tres restantes con TRH de 20 a 25 min con caudal de 3,04-3,8  $\text{cm}^3/\text{s}$ , tasa de aplicación superficial de 57,6-71,9  $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{día}$ . De tal manera que se tomaron 3 muestras para cada tratamiento, las cuales se agruparon para conformar una sola, obteniendo dos muestras independientes para cada uno de ellos.

---

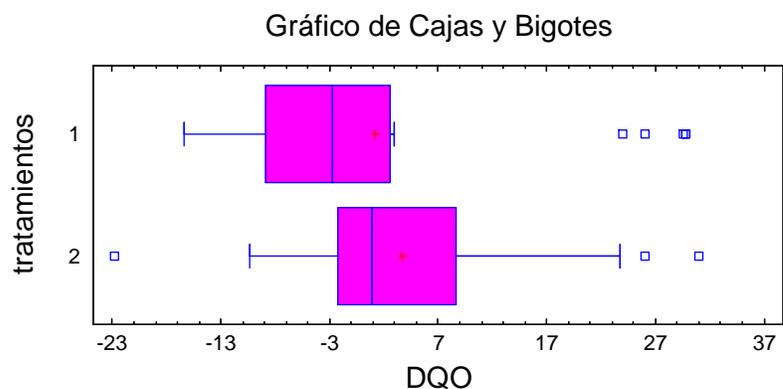
<sup>37</sup> Von Sperling. Principios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias. En: Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 3 ed. v 1. Belo Horizonte.: Universidade Federal de Minas Gerais. 2005. p. 452.

## 5. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 6.1 EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN EN LOS BIOFILTROS EN TÉRMINOS DE TRH PARA LOS PARÁMETROS EVALUADOS

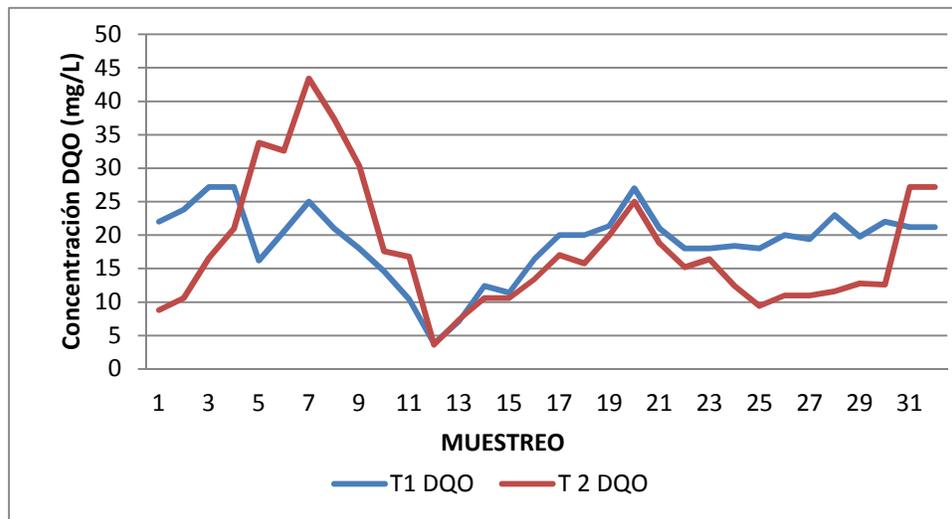
**6.1.1 Demanda química de oxígeno (DQO).** En los resultados conseguidos por comparación de medias de las concentraciones para este parámetro no se obtuvieron diferencias significativas entre los dos tratamientos con un nivel de confianza de 95% como se ilustra en la Figura 16 y el p-valor obtenido igual a 0,5128 (en el Anexo C se encuentra el resumen estadístico más detallado para todos los parámetros evaluados).

**Figura 16. Medias obtenidas para DQO en T1 y T2**



Las concentraciones medias calculadas para la caja de nivel constante (CNC), el T1 y el T2 fueron de 22,3 mg/L; 18,9 mg/L y 18,1 mg/L respectivamente; con base en lo anterior, se determinó que el valor medio de remoción por parte del T1 fue de 15% y por el T2 de 19%. La variación de las concentraciones de DQO a lo largo del periodo de estudio se presenta en la Figura 17. (Los datos de muestreo para todos los parámetros evaluados se los puede apreciar en el Anexo B)

**Figura 17. Comportamiento de la DQO en T1 y T2 en el efluente durante el periodo muestreo.**



Kemmadamrong y Deesomsak<sup>38</sup>, reportan que para los reactores de flujo ascendente obtuvieron remociones de DQO entre 82 y 95%, registrando concentraciones en el afluente del biofiltro de 100 a 120 mg/L en reactores con las siguientes características: diámetro interno de 15 cm, altura de 1m, arena con tamaño efectivo de 1,44 mm. En comparación con el sistema evaluado las eficiencias de remoción y concentración son del orden de 4,65 veces menores al reportado por los autores; además, el tamaño del sustrato reportado por la literatura fue tres veces mayor al de esta investigación y el de los reactores dos veces mayor. Resultados similares obtuvieron Timmons y Greiner<sup>39</sup>, quienes afirman que biofiltros con sustratos de mayor diámetro remueven mayor cantidad de nutrientes que los de menor.

Chen, Ling y Blancheton<sup>40</sup>, hacen referencia a diferentes estudios donde compararon el rendimiento de la nitrificación al colocar difusores en el interior y fuera de los reactores, los resultados demostraron que la turbulencia causada por la mezcla de aire tuvo un impacto significativo sobre la tasa de nitrificación en los biofiltros de película fija. De igual forma reportaron mayores tasas de nitrificación en los biofiltros con niveles de alta turbulencia, concluyendo que estos resultados son importantes para el diseño y el funcionamiento óptimo de los biofiltros,

<sup>38</sup> Ibid., p. 1-8.

<sup>39</sup> GREINER y TIMMONS. Op. cit., p. 189.

<sup>40</sup> CHEN, LING y BLANCHETON. Nitrification kinetics of biofilm as affected by water quality factors. En: Aquacultural Engineering. 2006. vol. 34.. p 189.

sugiriendo que la tasa de nitrificación puede incrementarse significativamente mediante el aumento de la turbulencia.

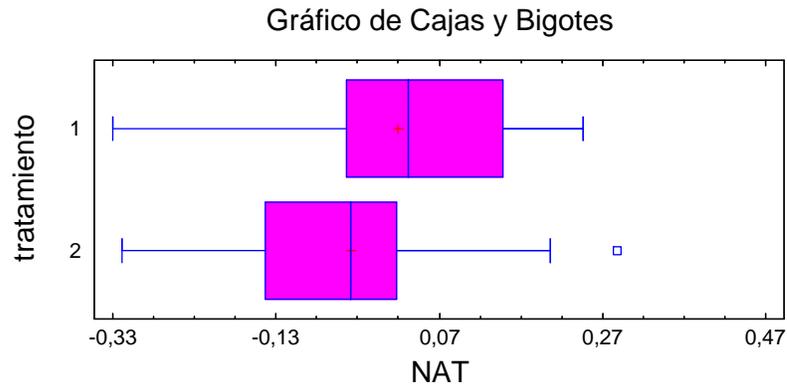
La ausencia de diferencias significativas entre tratamientos en esta investigación para este parámetro se las puede atribuir presuntivamente a las condiciones de TRH manejados fueron cercanos; sin embargo, las bajas tasas de velocidad de flujo en los reactores y la alta cantidad de sólidos en suspensión podrían ser las causas de las bajas tasas de remoción, teniendo en cuenta que estos dos factores combinados aumentan el consumo de oxígeno motivado por el aumento en la colonización de las bacterias heterotróficas más que las nitrificantes logrando zonas anóxicas lo que origina una disminución en los procesos de nitrificación como lo explica Chen, Ling y Blancheton<sup>41</sup>, quienes afirman que, mediante investigaciones realizadas en el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales correspondientes al efecto que causa la materia orgánica en el proceso de nitrificación, encontraron que, el impacto más importante en la nitrificación se debe a la contribución de la demanda de oxígeno, la materia orgánica particulada y disuelta proporciona sustratos para bacterias heterotróficas cuyo crecimiento competirá con el de las bacterias nitrificantes por oxígeno y espacio de crecimiento; además; reportan que las bacterias heterotróficas tienen una tasa de crecimiento máximo de cinco veces y los rendimientos de dos a tres veces mayor que la de las bacterias nitrificantes.

**6.1.2 Nitrógeno Amoniacal Total (NAT).** En la evaluación de los tratamientos por comparación de medias de las concentraciones para este parámetro no se obtuvieron diferencias significativas entre los dos tratamientos con un nivel de confianza de 95% como se ilustra en la Figura 18 y el p-valor obtenido igual a 0,1965.

---

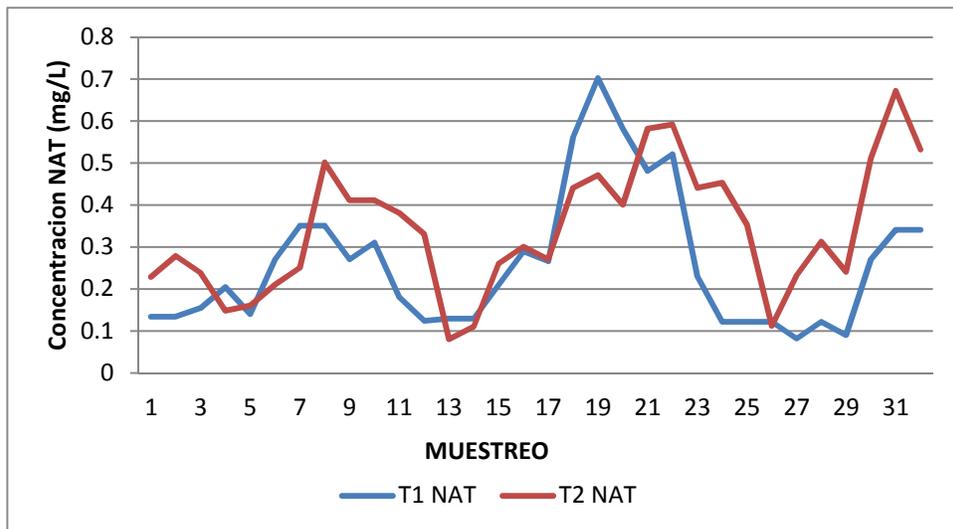
<sup>41</sup> CHEN, LING y BLANCHETON. Nitrification kinetics of biofilm as affected by water quality factors. En: Aquacultural Engineering. 2006. vol. 34.. p 188.

**Figura 18. Medias obtenidas para NAT en T1 y T2**



Las concentraciones medias calculadas fueron para la CNC de 0,27 mg/L y en los efluentes de los biofiltros de 0,26 mg/L para T1 y 0,34 mg/L para T2; De acuerdo con lo anterior, se determinó que el valor medio de remoción por parte del T1 fue de 4% y por el T2 de -25%. La variación de las concentraciones de NAT a lo largo del periodo de estudio se presenta en la Figura 19.

**Figura 19. Comportamiento del NAT en T1 y T2 en el efluente durante el periodo de muestreo**



Chen, Ling y Blancheton<sup>42</sup>, reportan que, el nivel aceptable de nitrógeno amoniacal en las aguas para el cultivo de peces es de 0,0125 mg/L. Los mismos autores aseguran que, en trabajos realizados con biofiltros de lecho fijo el número de Reynolds tuvo un impacto significativo sobre la tasa de remoción de amoníaco, el mismo estudio para NAT, no encontraron diferencias significativas en tasas de remoción para valores de Re de 1668 y 4003; sin embargo, en siguientes investigaciones donde se dispuso de una concentración constante de NAT, en Re= 66.710 la tasa de remoción fue aproximadamente cinco veces mayor que la de Re = 1668. Esto demuestra que las condiciones hidráulicas de la superficie del biofilm fue un factor importante que influyo en la tasa de remoción de NAT como de otros nutrientes.

Según Eding *et al.*<sup>43</sup>, es importante mantener la carga de los residuos orgánicos de los filtros percoladores de forma constante y baja como sea posible debido a una alta producción de bacterias heterotróficas en combinación con el desprendimiento de biopelícula, inducida cuando el biofilm pasa a realizar procesos de respiración endógena, esto se observa con frecuencia cuando se producen cambios en la carga de los residuos.

D'orbcastel; Blancheton y Belaud<sup>44</sup>, afirman que cuando a un biofiltro se le aumenta la carga orgánica y no se incrementa su área, este se vuelve semi-anaerobio, motivo por el cual los procesos nitrificantes disminuyen y por ende las eficiencias de remoción.

Para Pereira y Mercante<sup>45</sup>, los alimentos son la principal fuente de compuestos nitrogenados, el amonio total aumenta de acuerdo con el aumento de la cantidad de alimentos disponibles, en el cultivo de peces carnívoros esta situación puede ser agravada por los altos niveles de proteína en la dieta que pueden influir fuertemente en la dinámica del oxígeno disuelto en el medio. La desnitrificación se produce principalmente en condiciones anaeróbicas en los ecosistemas acuáticos, el principal sitio de su aparición es el sedimento, por lo tanto, más allá de las condiciones de oxigenación baja, se presenta por la disponibilidad de gran cantidad de sustrato orgánico.

---

<sup>42</sup> Ibid.. p. 179.

<sup>43</sup> EDING, *et al.* Design and operation of nitrifying trickling filters in recirculating aquaculture: A review. En: Aquacultural Engineering. Septiembre, 2005. vol. 34. p. 239.

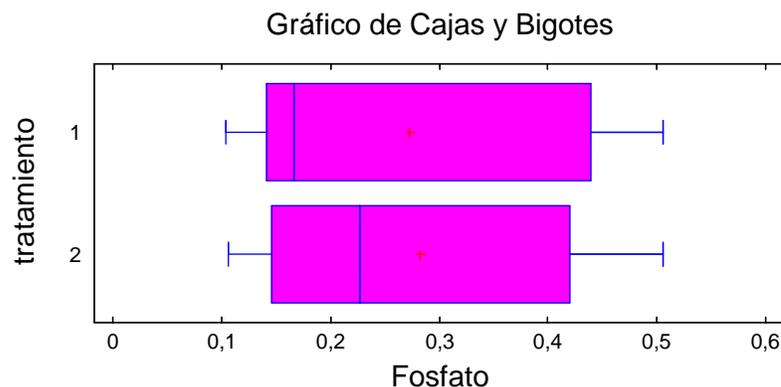
<sup>44</sup> D'orbcastel; Blancheton y Belaud. Water quality and rainbow trout performance in a Danish Model Farm recirculating system: Comparison with a flow through system. En: Aquacultural Engineering. Febrero, 2009. vol.40. p 135-143.

<sup>45</sup> PEREIRA y MERCANTE. Op. cit., p. 84.

Los resultados de igualdad entre tratamientos obtenidos en esta investigación para este parámetro se los puede atribuir a que las condiciones de TRH fueron similares; sin embargo, los rangos de remoción de este nutriente tuvieron valores bajos y negativos teniendo como posible causa la presencia de procesos de respiración endógena producidos por aumento en la carga orgánica y consumo de oxígeno también acompañado de desprendimiento de biopelícula; además se evidencia procesos de desnitrificación. De acuerdo a Timmons *et al.*<sup>46</sup>, quienes afirman que este fenómeno se da cuando el biofiltro experimenta procesos anaerobios por los cuales las bacterias quimiotróficas convierten los nitratos en nitrógeno gaseoso o amoniaco. Lo que pudo causar inestabilidad en las fases de nitrificación, que explica las eficiencias bajas y negativas, además de contar con un flujo con bajo nivel de turbulencia. Las concentraciones en el efluente de los biofiltros fueron altas para el cultivo de trucha según los valores reportados por la literatura citada anteriormente.

**6.1.3 Fosfato.** En la prueba de comparación de medias entre tratamientos realizada para este nutriente no se obtuvieron diferencias significativas con un nivel de confianza de 95% como se ilustra en la Figura 20 y el p-valor obtenido igual a 0,8264.

**Figura 20. Medias obtenidas para Fosfato en T1 y T2**



Las concentraciones medias calculadas fueron para la CNC de 0,3 mg/L y en los efluentes de los biofiltros de 0,06 mg/L para T1 y 0,03 mg/L para T2; De acuerdo con estos resultados, se determinó que el valor medio de remoción por parte del T1 fue de 80% y por el T2 de 91.

<sup>46</sup> TIMMONS, *et al.* Op. cit., p. 726.

Van Rijn y Barak<sup>47</sup>, en estudios realizados con procesos de desnitrificación en sistemas de recirculación en acuicultura, afirman que, la remoción biológica del fósforo de las aguas residuales domésticas en las plantas de lodos activados se llevó a cabo por etapas; donde se alternó el lodo y se sometió a condiciones anaeróbicas y aeróbicas respectivamente, en estas condiciones, el fósforo después de salir de la biomasa bacteriana en la fase anaeróbica el exceso de polifosfato fue asimilado por las bacterias y durante la fase aeróbica el fósforo fue removido mediante la recolección de una parte de la biomasa bacteriana rica en este nutriente; lo que ratifica Lixiang *et al.*<sup>48</sup> En experiencias con reactores biológicos integrados de flujo continuo (continuous-flow integrated biological reactor: CIBR) en la remoción de fósforo de aguas residuales municipales bajo las siguientes condiciones de operación: Temperatura 12,2°C, TRH 16 h, pH 7,6, concentraciones fósforo en el afluente de 3,14 mg/L, obteniendo remociones del orden de 68,25% y concentraciones del efluente entre 0,90 y 1,30 mg/L, manejando el principio de remoción por acumulación de fosforo en la biopelícula bacteriana.

De igual forma Van Rijn y Barak<sup>49</sup>, afirman que la desnitrificación es un proceso heterótrofo que garantiza reducción de las concentraciones de fósforo en los sistemas intensivos de cultivo de peces.

Para Crites y Tchobanoglous<sup>50</sup>, los fosfatos complejos se hidrolizan durante el tratamiento biológico a ortofosfato ( $\text{PO}_4^{-3}$ ). De la concentración total de fósforo presente en las aguas residuales cerca del 10% se retira como materia particulada durante la sedimentación primaria y otro 10 a 20% se incorpora en las células bacterianas durante el tratamiento biológico. El 70 % restante del fósforo que entra, normalmente se descarga con los efluentes del tratamiento secundario de la planta.

Los mismos autores toman en cuenta tres observaciones para la remoción del fósforo:

- Un número de bacterias son capaces de almacenar en sus células cantidades de fósforo en exceso en formas de polifosfatos.

---

<sup>47</sup> VAN RIJN y BARAK. Denitrification in Recirculating Aquaculture Systems: From Biochemistry to Biofilters. *En*: Environmental Engineering. Phoenix, Arizona Virginia. 1998. p.179-187.

<sup>48</sup> LIXIANG, *et al.* Simultaneous Removal of Nitrogen and Phosphorous from Municipal Wastewater Using Continuous-Flow Integrated Biological Reactor. *Journal of Environmental Engineering*. 2008. v 134. p 169-176.

<sup>49</sup> VAN RIJN y BARAK. *Op. cit.*, p. 179-187.

<sup>50</sup> CRITES y TCHOBANOGLOUS. *Op. cit.*, p. 435.

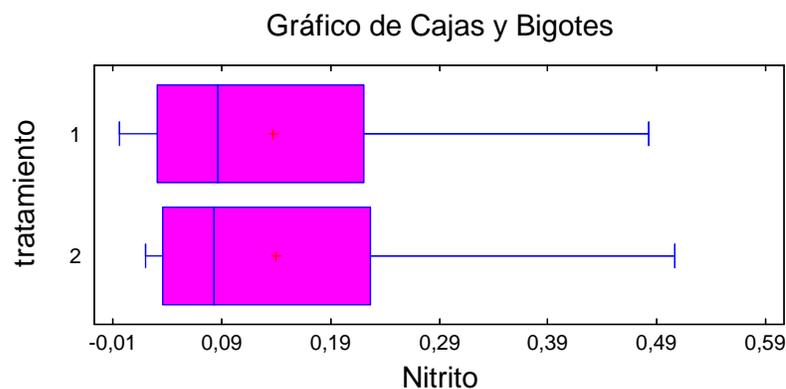
- En presencia de productos de fermentación simples generados bajo condiciones anaerobias (ej: ácidos grasos volátiles), estas bacterias los asimilan en forma de productos de almacenamiento dentro de las células con liberación concomitante de fósforo.
- Bajo condiciones aerobias, la energía producida dentro de las células se incrementa debido a la oxidación de los productos de almacenamiento y los polifosfatos

En la práctica, la remoción biológica del fósforo se logra al secuenciar y producir las condiciones ambientales apropiadas dentro de los reactores.

Los resultados de igualdad entre tratamientos obtenidos en esta investigación para este parámetro se los puede atribuir presuntamente a que las condiciones de TRH fueron cercanos; sin embargo, los rangos de remoción de este nutriente se mantuvieron altos. Esto se lo puede sustentar en base a la literatura anteriormente reportada haciendo referencia a que posiblemente se pudo haber presentado acumulación de fosfato en la comunidad biológica que conforma a la biopelícula.

**6.1.4 Nitrito.** En los resultados conseguidos por comparación de medias de las concentraciones para este parámetro no se obtuvieron diferencias significativas entre los dos tratamientos con un nivel de confianza de 95% como se ilustra en la Figura 21 y el p-valor obtenido igual a 0,9499.

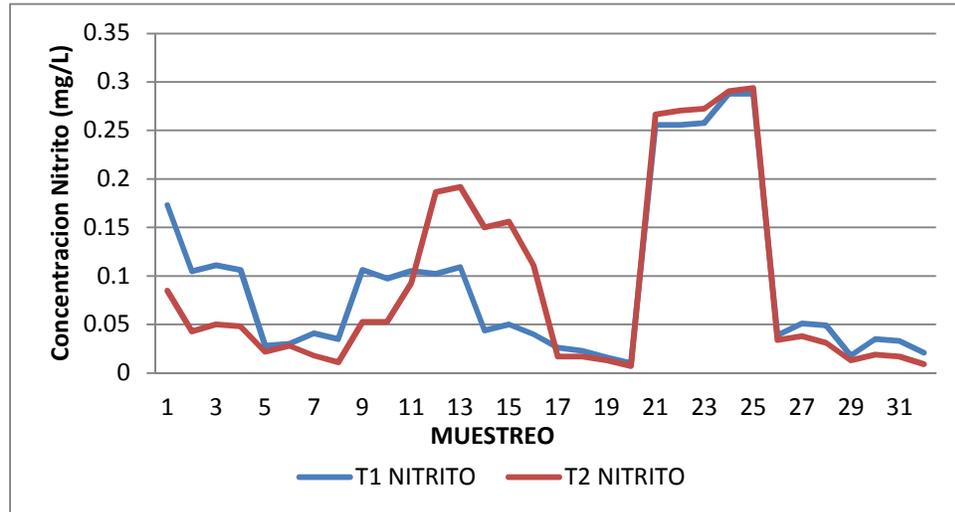
**Figura 21. Medias obtenidas para Nitrito en T1 y T2**



Las concentraciones medias calculadas para la CNC, el T1 y el T2 fueron de 0,2 mg/L; 0,09 mg/L y 0,09 mg/L respectivamente; con base en lo anterior, se determinó que el valor medio de remoción para T1 y T2 fue de 54%. La variación

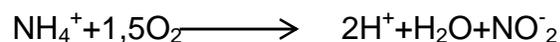
de las concentraciones de Nitrito a lo largo del periodo de estudio se presenta en la Figura 22.

**Figura 22. Comportamiento de Nitrito en T1 y T2 en el efluente durante el periodo de muestreo**



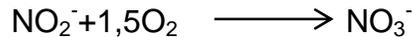
Blanco<sup>51</sup>, hace referencia a trabajos realizados en USA sobre concentración de nitritos, los cuales demostraron la toxicidad del NO<sub>2</sub><sup>-</sup> en alevines de Trucha Arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) cuando sus niveles alcanzaron 0,1 mg/L, la misma autora reporta los síntomas como son: agonía, y mueren lenta en el fondo de los estanques con gran movilidad de opérculos branquiales.

Chen, Ling y Blancheton<sup>52</sup>, afirman que en un proceso de nitrificación, el amoníaco se oxida primero en nitrito por varios géneros de bacterias autótrofas, el más importante es Nitrosomonas. El nitrito es oxidado a nitrato mucho menos tóxico por varios otros géneros de bacterias, el más importante de los cuales es Nitrobacter, las reacciones que ocurren en los procesos de nitrificación son procesos aerobios, donde se produce hidrógeno (bajando el pH) y la producción de nitrito como producto intermedio. Los mismos autores afirman que el proceso de nitrificación completo se puede expresar como:



<sup>51</sup> BLANCO. Op. cit., p. 227.

<sup>52</sup> CHEN, LING y BLANCHETON. Op. cit., p. 180.

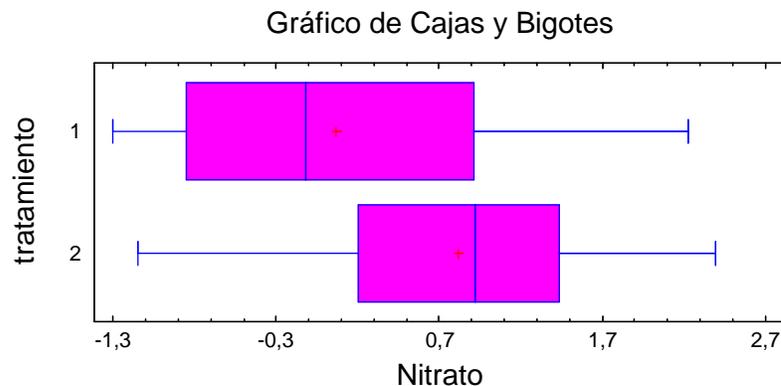


Por cada gramo de NAT oxidado a nitrógeno nítrico, se consumen aproximadamente 4,18 g de oxígeno y 7,07 g de alcalinidad (como  $\text{CaCO}_3$ ) y se producen 0,17 g de biomasa bacteriana.

Los resultados de igualdad entre tratamientos, obtenidos en esta investigación para este parámetro se los puede atribuir presuntivamente a que los rangos de TRH fueron cercanos; sin embargo, los rangos de remoción de este nutriente se mantuvieron altos y las concentraciones en el efluente de los biofiltros se encontraron dentro de los límites adecuados para el cultivo de la especie. Esto se lo puede sustentar con la literatura anteriormente reportada. En la evaluación del sistema se estimó una eficiencia del 54 % en términos de remoción de nitrito lo que en procesos biológicos se traduce a la existencia de actividad nitrificante que evidencian la presencia de bacterias Nitrosomonas encargadas de transformar el amonio ( $\text{NH}_4$ ) en iones hidrogeno y nitrito. Además, de Nitrobacter encargadas de utilizar el nitrito como sustrato orgánico para producción de tejido celular y producción de nitrato.

**6.1.5 Nitrato.** En la evaluación de los tratamientos por comparación de medias de las concentraciones para este parámetro no se obtuvieron diferencias significativas entre los dos tratamientos con un nivel de confianza de 95% como se ilustra en la Figura 23 y el p-valor obtenido igual a 0,0114.

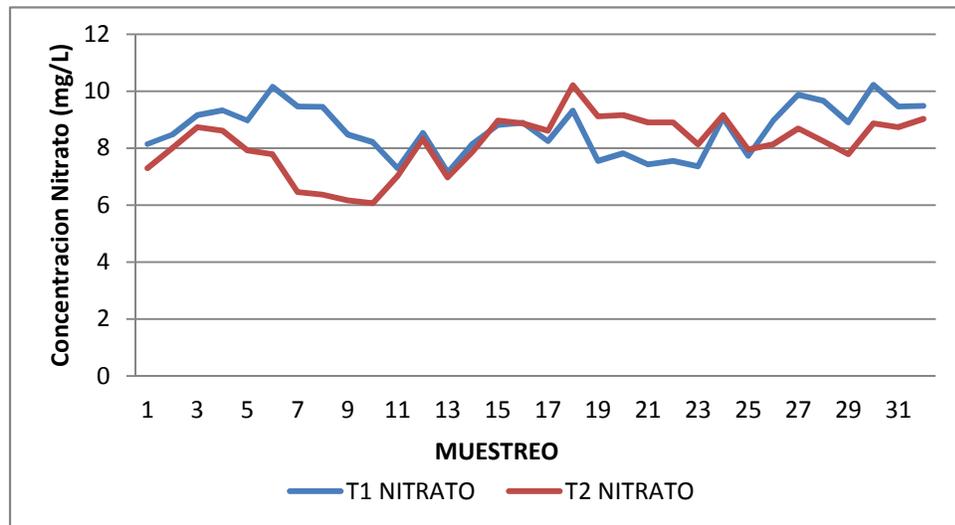
**Figura 23. Medias obtenidas para Nitrato en T1 y T2**



Las concentraciones medias calculadas para la caja CNC, el T1 y el T2 fueron de 8,96 mg/L; 8,67 mg/L y 8,16 mg/L respectivamente; con base en lo anterior, se

determinó que el valor medio de remoción por parte del T1 fue de 3% y por el T2 de 9%. La variación de las concentraciones de Nitrato a lo largo del periodo de estudio se presenta en la Figura 24.

**Figura 24. Comportamiento del Nitrato en T1 y T2 en el efluente durante el periodo de muestreo**



Timmons *et al.*<sup>53</sup>, aseguran que las velocidades bajas resultan en altos TRH en el reactor y en consecuencia porcentaje altos de remoción. Blanco<sup>54</sup>, señala que, concentraciones de 275 mg/L detienen el crecimiento de las truchas y 800 mg/L es el límite de tolerancia, observándose un rechazo de la comida y lesiones cutáneas de color gris brillante de carácter reversible.

Los procesos de nitrificación ocasionan el aumento de los niveles de nitrato, según lo reportado por Chen, Ling y Blancheton<sup>55</sup>, en un proceso de nitrificación el nitrito es oxidado a nitrato mucho menos tóxico por varios otros géneros de bacterias, la más importante es Nitrobacter, la tasa de oxidación del amoníaco o nitrito depende en gran medida de las concentraciones de los sustratos; así, dichos autores, afirman que, el amoníaco se asume como el sustrato limitante para el crecimiento de Nitrosomonas, mientras que el nitrito como sustrato limitante para Nitrobacter. Se informó que la tasa de crecimiento de Nitrobacter es mayor que la de Nitrosomonas, y la oxidación del amoníaco suele ser el factor limitante en la conversión de amonio a nitrato. En estudios realizados por los mismos autores

<sup>53</sup> TIMMONS, *et al.* Op. cit., p. 212.

<sup>54</sup> BLANCO. Op. cit., p. 227.

<sup>55</sup> CHEN, LING y BLANCHETON. Op. cit., p. 179.

reportan que, la materia orgánica particulada y disuelta proporciona sustrato para el crecimiento de bacterias heterótrofas en cuyo desarrollo competirán por oxígeno y espacio de crecimiento con las bacterias nitrificantes. Con la adición de materia orgánica, el rápido crecimiento de las bacterias heterotróficas que utilizan carbono orgánico como fuente de energía competirán con el crecimiento lento de las bacterias nitrificantes, lo que resulta en una disminución de la tasa de nitrificación, teniendo en cuenta que las bacterias heterotróficas tienen una tasa de crecimiento cinco veces mayor que las nitrificantes. Además; Van Rijn; Tal y Schreier<sup>56</sup>, afirman que la mayoría de los reactores nitrificantes empleados en experimentos en las instalaciones de acuicultura se basan en la inmovilización de organismos nitrificadores en soportes adecuados de plástico o arena, dentro de estos reactores, se crean condiciones anóxicas por el funcionamiento a tiempos de retención lo suficientemente bajos como para asegurar un completo consumo biológico de oxígeno del reactor.

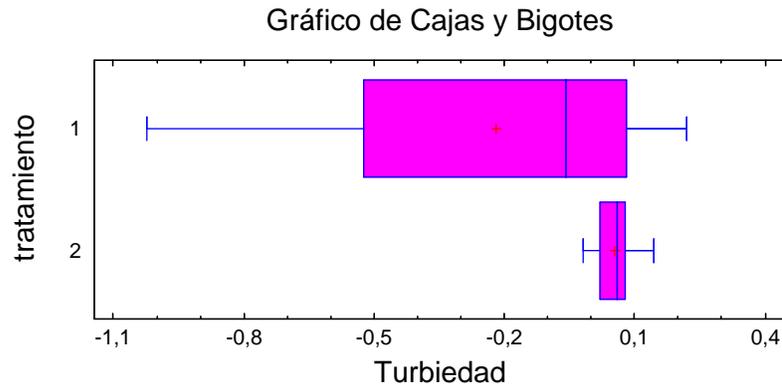
Los resultados de diferencia entre tratamientos obtenidos en esta investigación para este parámetro de acuerdo a las referencias citadas se lo pueden atribuir presuntivamente a que TRH más altos resultan mayores eficiencias de remoción de nutrientes, el comportamiento observado en el efluente de los biofiltros se presume puede haber sido causado por la falta de uniformidad en la distribución de nutrientes en la biopelícula, la acumulación de nitrito en los reactores y la baja transformación de nitrito a nitrato, explican los porcentajes bajos de remoción de  $\text{NO}_3$  y las altas remociones de  $\text{NO}_2$  lo que aparentemente puede indicar que las altas concentraciones de  $\text{NO}_2$  inhibieron el crecimiento de bacterias como Nitrobacter encargadas de transformar  $\text{NO}_2$  en  $\text{NO}_3$ , de igual forma la variación (aumento) de la carga orgánica durante el periodo de estudio pudo hacer que se incrementara la población de las bacterias heterotróficas desplazando a las bacterias nitrificantes, también pudo en cierto momento ser afectado por el aumento de los TRH en horas de la noche por procesos de colmatación lo que pudo causar un consumo biológico máximo del oxígeno disuelto.

**6.1.6 Turbiedad.** En la prueba de comparación de medias de los valores entre tratamientos realizada para este parámetro no se obtuvieron diferencias significativas con un nivel de confianza de 95% como se ilustra en la Figura 25 y el p-valor obtenido igual a 0,0057.

---

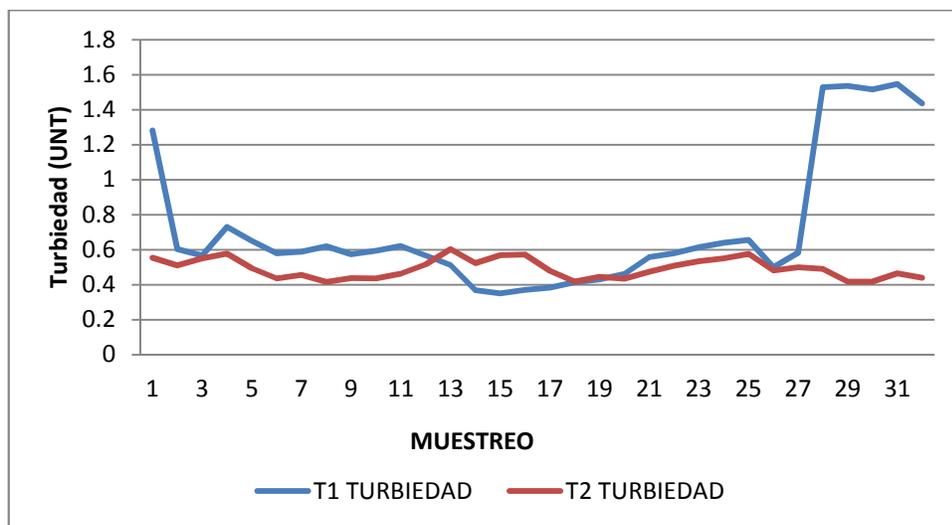
<sup>56</sup> VAN RIJN; TAL y SCHREIER. Denitrification in recirculating systems: Theory and applications. En: Aquacultural Engineering. Abril, 2005. vol. 34. p 366.

**Figura 25. Medias obtenidas para Turbiedad en T1 y T2**



Los valores medios calculados para la CNC, el T1 y el T2 fueron de 0,55 UNT; 0,72 UNT y 0,49 UNT respectivamente; con base en lo anterior, se determinó que el valor medio de remoción por parte del T1 fue de -31% y por el T2 de 10%. La variación de los valores de Turbiedad a lo largo del periodo de estudio se presenta en la Figura 26.

**Figura 26. Comportamiento de la Turbiedad en T1 y T2 en el efluente durante el periodo de muestreo**



Timmons *et al.*<sup>57</sup> Aseguran que “las velocidades bajas resultan en altos TRH en el reactor y un consecuente de porcentaje altos de remoción”. Por otra parte,

<sup>57</sup> TIMMONS, *et al.* Op. cit., p. 212.

Romero<sup>58</sup> afirma que la turbiedad constituye una medida óptica del material en suspensión en el agua, la facilidad y rapidez de lectura de la turbiedad se constituye en un buen indicador de la calidad del agua y del desempeño de un sistema de tratamiento.

Según Arboleda<sup>59</sup>, el control de la turbiedad es el método más práctico y simple para evaluar la eficiencia no solo de la filtración sino de todos los procesos de tratamiento. Las turbiedades menores a 1 UNT o preferiblemente inferiores a 0,5 UNT indican una operación cuidadosa de todo el sistema, segura desde el punto de vista bacteriológico, en la remoción de virus y protozoarios patógenos, que difícilmente son eliminados en procesos de desinfección.

American Water Works Association<sup>60</sup>, afirman que, para este tipo de biofiltros la remoción de la turbiedad a menudo va paralela a la remoción de otras partículas y es generalmente excelente a plena escala de filtración de turbidez de 0,5 UNT.

Los resultados de diferencia entre tratamientos obtenidos en esta investigación para este parámetro se lo pueden atribuir a que TRH más altos incrementan las eficiencias de remoción. En cuanto a las remociones negativas se atribuye presuntivamente a que pudieron presentarse procesos de respiración endógena causando desprendimiento de biopelícula; y en consecuencia el elevado contenido de finos, que no fueron retenidos por los reactores

**6.1.7 Color Aparente.** En los resultados conseguidos por comparación de medias de los valores para este parámetro no se obtuvieron diferencias significativas entre los dos tratamientos con un nivel de confianza de 95% como se ilustra en la Figura 27 y el p-valor obtenido igual a 0,0782; sin embargo, existen diferencias significativas para un nivel de confianza del 90%.

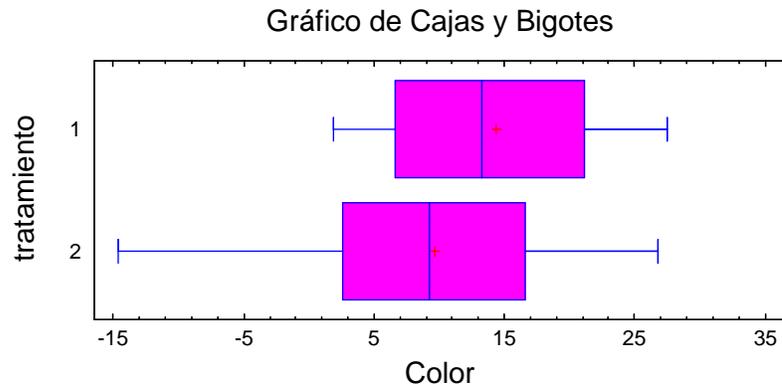
---

<sup>58</sup> ROMERO. Tratamiento de Aguas Residuales Teoría y principio del diseño. 3 ed. Colombia.: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2004.p. 530.

<sup>59</sup> ARBOLEDA VALENCIA, Jorge. Teoría y Práctica de la Purificación de Aguas. 3 ed. Bogotá D.C.: Mc GRAW-HILL. 2000. p. 607-609.

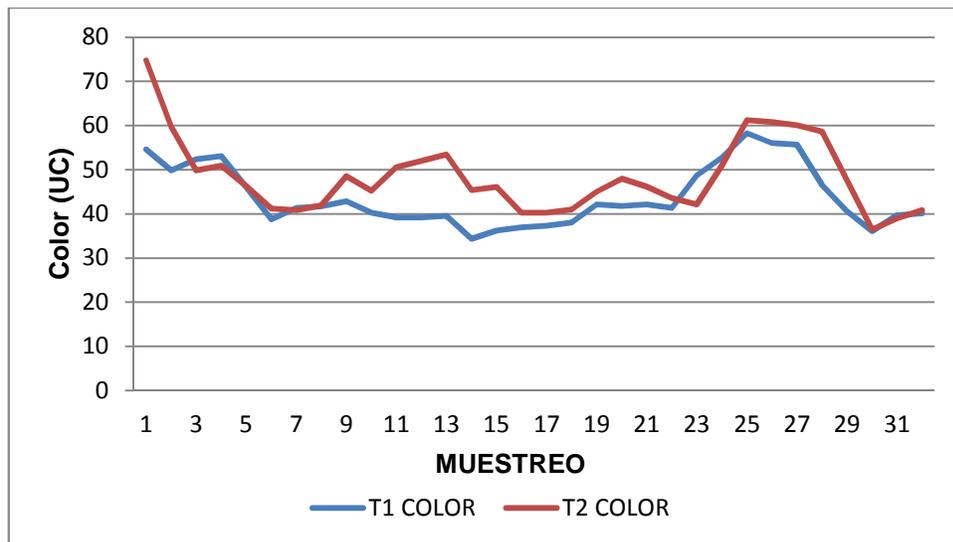
<sup>60</sup> AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. Calidad y Tratamiento del Agua. 5 ed. Madrid. McGraw-Hill. 2002. p. 432.

**Figura 27. Medias obtenidas para Color Aparente en T1 y T2**



Los valores medios calculados para la CNC, el T1 y el T2 fueron de 58,4 UC; 43,9 UC y 48,4 UC respectivamente; con base en lo anterior, se determinó que el valor medio de remoción por parte del T1 fue de 25% y por el T2 de 17%. La variación de los valores de Color Aparente a lo largo del periodo de estudio se presenta en la Figura 28.

**Figura 28. Comportamiento del Color Aparente en T1 y T2 en el efluente durante el periodo de muestreo**



Arboleda<sup>61</sup>, afirma que las razones por las cuales se suele hacer remoción de color en el agua son de orden estético, químico-sanitario e industrial: Estético porque la mayoría de la gente prefiere agua cristalina; Químico-sanitario por que interfiere en el proceso de cloración, al formar clorohalometano que se sospecha son cancerígenos dificulta los análisis colorimétricos del agua complica procesos de cloración y estabiliza el hierro y el manganeso en solución e Industriales, porque interfiere en ciertos procesos y obstaculiza el funcionamiento de resinas aniónicas de intercambio iónico. De acuerdo con la FAO<sup>62</sup>, en la actualidad en Colombia no se encuentra alguna disposición específica respecto a los efluentes de la acuicultura; sin embargo, se encuentra regulada principalmente por el decreto No.1594 de 1984, parcialmente regulada por la Ley No.9 de 1979 y el decreto Legislativo No.2811 de 1974, relacionados con los usos del agua y residuos líquidos. El Decreto establece los estándares de calidad del agua para propósito de conservación de flora y fauna, los cuales incluyen la acuicultura.

La coloración de las aguas se puede deber a diferentes factores; Margalef<sup>63</sup>, sostiene que las aguas con partículas muy pequeñas en suspensión dispersan y reflejan la luz de longitud de onda baja y se ven azuladas; las partículas mayores, especialmente las orgánicas dispersan la radiación de onda más larga y el agua que las contiene se mira siempre más amarillenta independientemente del color de las partículas. El color del agua depende de la luz dispersa y reflejada y también del color de las propias partículas. Un agua muy pura se ve negra o mejor dicho azulada por la luz difundida por las propias moléculas del agua.

Los resultados de igualdad entre tratamientos obtenidos en esta investigación para este parámetro se los puede atribuir presuntivamente a que los rangos de TRH fueron cercanos; sin embargo, los efectos en términos de eficiencia de remoción se los puede sustentar con las anteriores citas expresando el color aparente como producto de los sólidos, que a causa de estar en el SRA fueron disueltos causando la producción de finos que no fueron retenidos por el sustrato del biofiltro, estas pequeñas partículas originan la refracción de la luz obteniéndose la coloración del agua.

**6.1.8 Sólidos Totales (ST).** En la prueba de comparación de medias de las concentraciones entre tratamientos realizada para este parámetro no se obtuvieron diferencias significativas con un nivel de confianza de 95% como se

---

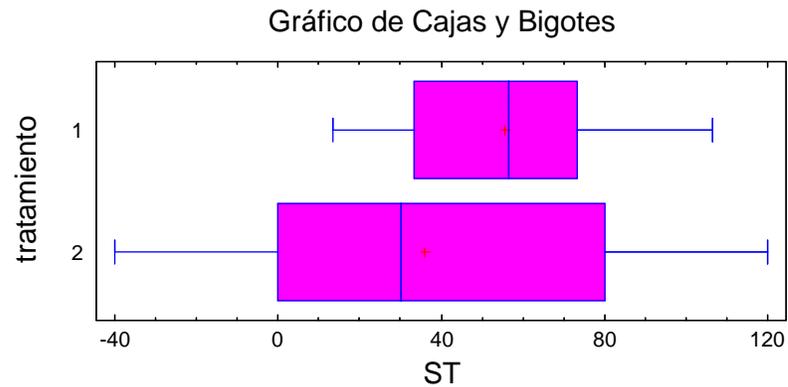
<sup>61</sup> ARBOLEDA. Op. cit., p. 43.

<sup>62</sup> OFICINA REGIONAL DE LA FAO PARA AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE (FAO). Pesca y Acuicultura [en línea]. Edición en internet. Colombia: 2012[citado el 18 de Mayo 2012]. Disponible en internet: < URL: [http://www.fao.org/fishery/legalframework/nalo\\_colombia/es](http://www.fao.org/fishery/legalframework/nalo_colombia/es)

<sup>63</sup> MARGALEF, Ramón. Limnología. Barcelona.: Omega, 1983. p 83.

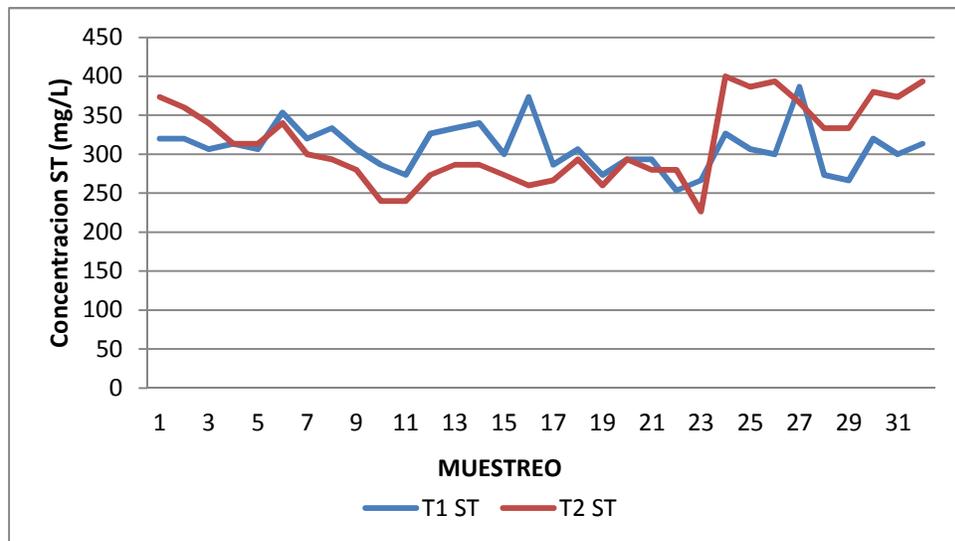
ilustra en la Figura 29 y el p-valor obtenido igual a 0,0849; sin embargo, existen diferencias significativas para un nivel de confianza del 90%.

**Figura 29. Medias obtenidas para ST en T1 y T2**



Las concentraciones medias calculadas fueron para la CNC de 361,6 mg/L y en los efluentes de los biofiltros de 308,7 mg/L para T1 y 313,5 mg/L para T2; De acuerdo con lo anterior, se determinó que el valor medio de remoción por parte del T1 fue de 15% y por el T2 de 13%. La variación de las concentraciones de ST a lo largo del periodo de estudio se presenta en la Figura 30.

**Figura 30. Comportamiento de los Sólidos Totales en T1 y T2 en el efluente durante el periodo de muestreo**



Chen, Ling y Blancheton<sup>64</sup>, afirman que el material fecal excretado por los peces y los alimentos no consumidos son de naturaleza orgánica, por lo que el agua de un SRA puede tener una cantidad significativa de materia orgánica, tanto en forma disuelta como particulada, el impacto más importante de la materia orgánica en la nitrificación se debe a la contribución de la demanda de oxígeno. La materia orgánica particulada y disuelta proporciona sustratos para bacterias heterótrofas en cuyo crecimiento competirán con las bacterias nitrificantes en la consecución de oxígeno y espacio de crecimiento. Los mismos autores reportan el impacto de la materia orgánica particulada (particulate organic matter: POM) en la eficiencia de nitrificación, cuando evaluaron un sistema de dos filtros sumergidos, a escala, conectados a un SRA de agua dulce; estos filtros, fueron llenos de un mineral pre-colonizado. Los medios se enriquecieron progresivamente con el POM, cada uno con un volumen de 8 L y el flujo de agua fijado en 2 L/min, este experimento demostró claramente que la eficiencia de nitrificación disminuyó en un 40% cuando la concentración de POM aumentó de 0,2 a 10 mg/L, lo que demuestra claramente el impacto de los compuestos orgánicos en la tasa de nitrificación.

Para Timmons *et al.*<sup>65</sup>, virtualmente todos los desperdicios generados en un sistema de recirculación provienen del alimento. Como regla general se puede asumir que sólidos suspendidos totales (SST)= 25% del alimento en base seca. Si bien las heces son la principal fuente de SST, el alimento no ingerido no es despreciable. Una vez entregado el alimento no ingerido empieza a sufrir un proceso de disgregación; sin embargo, después de horas en permanecer en el agua y de paso a través de las bombas el 97% de las partículas siguen siendo mayores a 60 µm y el 73% mayores a 500 µm. En los sistemas de reutilización del agua las partículas finas (tamaño menor a 30 µm) predominan en la columna de agua. El 90 % de la masa particulada en los SRA está compuesta por partículas individuales con tamaños menores a 30 µm. Por supuesto como las partículas grandes eventualmente se vuelven pequeñas la remoción rápida y eficiente de las partículas sedimentables (grandes >100 µm) es importante, ya que minimizará la formación de partículas pequeñas de difícil remoción. Los filtros de arena de flujo ascendente no deben utilizarse con el objetivo principal de captura de sólidos, si se utilizaran de esta manera probablemente fallarían en su función fundamental de filtración biológica, sin embargo pueden usarse para captura de sólidos finos a bajas tasas de carga hidráulica.

Los resultados de igualdad entre tratamientos obtenidos en este experimento para este parámetro se los puede atribuir a que los rangos de TRH estuvieron cercanos; sin embargo, los efectos bajos en términos de eficiencia de remoción y las altas concentraciones en el efluente del reactor se los pueden sustentar de acuerdo con

---

<sup>64</sup> CHEN, LING y BLANCHETON. Op. cit., p. 189.

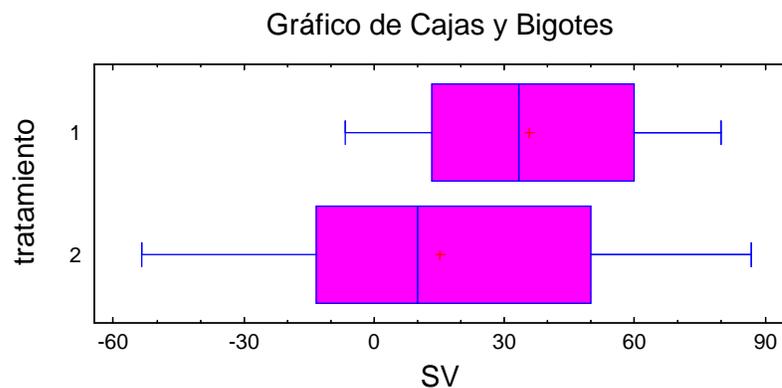
<sup>65</sup> TIMMONS, *et al.* Op. cit., p. 162.

las anteriores citasiones, atribuyéndolo posiblemente al tamaño de los sedimentos que por disgregacion, causada por estar en un SRA producen formacion de finos con dimensiones que no alcanzan a ser retenidos por el biofiltro; tambien como concecuencia de la elevada concentracion de sólidos y desprendimiento de biopelicula como se lo explico en la discusión de NAT .

A traves de las mismas afirmaciones se puede suponer que las bajas eficiencias de remocion en los parámetros DQO, NAT, Nitrato y Amonio, se pueden atribuir a una mayor colonización por parte de bacterias heterótrofas en comparación con las bacterias nitrificantes, que ganaron en competencia por oxígeno y espacio de crecimiento teniendo en cuenta que las primeras tienen tasas de crecimiento y de rendimiento mucho mayores en presencia de materia orgánica.

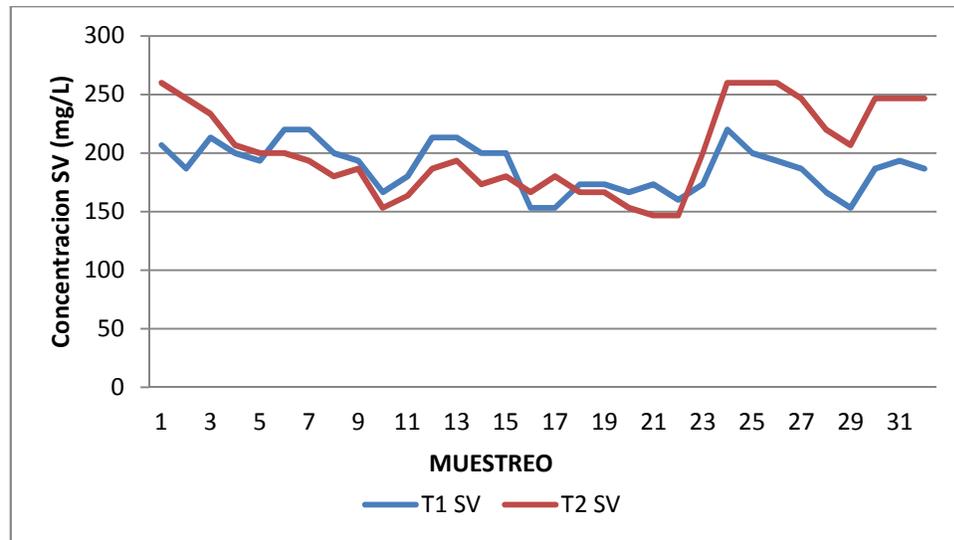
**6.1.9 Sólidos Volátiles (SV).** En los resultados conseguidos por comparación de medias de las concentraciones para este parámetro no se obtuvieron diferencias significativas entre los dos tratamientos con un nivel de confianza de 95% como se ilustra en la Figura 31 y el p-valor obtenido igual a 0,0533; sin embargo, existen diferencias significativas para un nivel de confianza del 90%.

**Figura 31. Medias obtenidas para SV en T1 y T2**



Las concentraciones medias calculadas para la CNC, el T1 y el T2 fueron de 224,96 mg/L; 188,08 mg/L y 202,37 mg/L respectivamente; con base en lo anterior, se determinó que el valor medio de remoción por parte del T1 fue de 16% y por el T2 de 10%. La variación de las concentraciones de SV a lo largo del periodo de estudio se presenta en la Figura 32.

**Figura 32. Comportamiento de los Sólidos Volátiles en T1 y T2 en el efluente durante el periodo de muestreo**



Metcalf y Eddy<sup>66</sup>, afirman que los términos sólidos suspendidos volátiles y sólidos suspendidos fijos se refieren al contenido orgánico e inorgánico (mineral) de los sólidos. Por su parte, Romero<sup>67</sup> sostiene que, en aguas residuales es normal encontrar compuestos orgánicos volátiles que al ser emitidos a la atmósfera pueden constituirse en contaminantes tóxicos o en gases orgánicos altamente reactivos, contribuyendo a la producción de ozono o de compuestos muy olorosos.

Según lo reportado por Mahamud; Gutiérrez y Sastre<sup>68</sup>, la cantidad de sólidos volátiles se utiliza comúnmente como un indicador de la cantidad de materia orgánica contenida en el lodo, pudiendo ser utilizado como medida de la efectividad de un tratamiento en la estabilización del componente orgánico del mismo. El material fecal excretado por los peces y los alimentos no consumidos son de naturaleza orgánica, por lo que el agua de un SRA puede tener una cantidad significativa de materia orgánica, tanto en forma disuelta como particulada. El impacto más importante de la materia orgánica en la nitrificación se debe a la contribución de la demanda de oxígeno. La materia orgánica particulada y disuelta proporciona sustrato para bacterias heterótrofas en cuyo crecimiento competirán por oxígeno y espacio para crecimiento con las bacterias nitrificantes. Con la adición de materia orgánica, aumenta el crecimiento de bacterias

<sup>66</sup> METCALF y EDDY. Op. cit., p. 85.

<sup>67</sup> ROMERO. Op. cit., p 37.

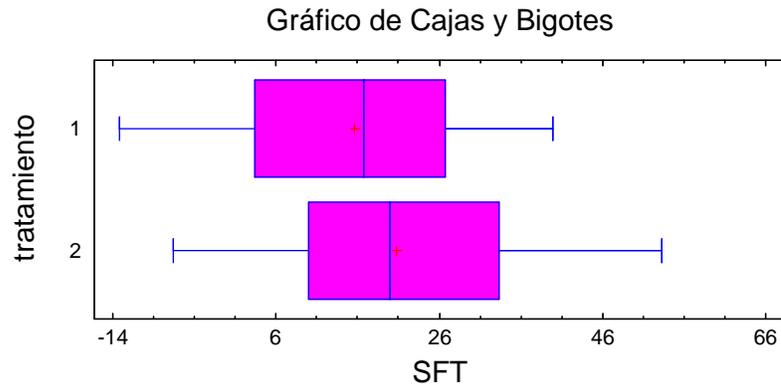
<sup>68</sup> MAHAMUD; GUTIÉRREZ y SASTRE. Biosólidos Generados en la Depuración de Aguas. En: Ingeniería del Agua. Septiembre, 1996. vol. 3 no. 3, p. 45.

heterotróficas las cuales utilizan carbono orgánico como fuente de energía, estas competirán con el crecimiento lento de las bacterias nitrificantes, lo que resulta en una disminución de la tasa de nitrificación. Las bacterias heterótrofas tienen una tasa de crecimiento y rendimientos mayor que la de las bacterias nitrificantes, los mismos autores hacen referencia a investigaciones realizadas donde se utilizó la técnica de microelectrodos y microslicing para estudiar la competencia entre organismos heterótrofos y autótrofos por el sustrato y el espacio, y se encontró que un aumento de la tasa de carga orgánica se traduciría en una disminución del oxígeno disuelto (OD) en el biofilm, a partir de entonces la inhibición de la nitrificación debido a la escasez de oxígeno, la competencia por el sustrato en el biofilm también se traduce en una estructura del biofilm estratificado, así como no uniforme distribución espacial de las poblaciones bacterianas y bacterias metabólicamente activas. Como resultado, la tasa de remoción de amoníaco disminuye cuando aumenta la carga orgánica, la presencia de materia orgánica también afecta a la composición de la población microbiana

Los resultados de igualdad obtenidos en esta investigación para este parámetro se los puede atribuir a que los rangos de TRH estuvieron cercanos, sin embargo en términos de eficiencia de remoción en este estudio se podría atribuir a la presencia de bacterias heterótrofas más que las autótrofas, las que contribuyen a la degradación de la materia orgánica resultado del incremento de la carga durante el transcurso de la investigación, esto se vio reflejado en las altas concentraciones en los efluentes de los biofiltros; además, se puede afirmar que para sistemas de recirculación para acuicultura donde se usa biofiltros de flujo ascendente de película fija con sustrato de arena es importante tener un sistema de prefiltración que asegure la retención de partículas de materia orgánica de mayor tamaño.

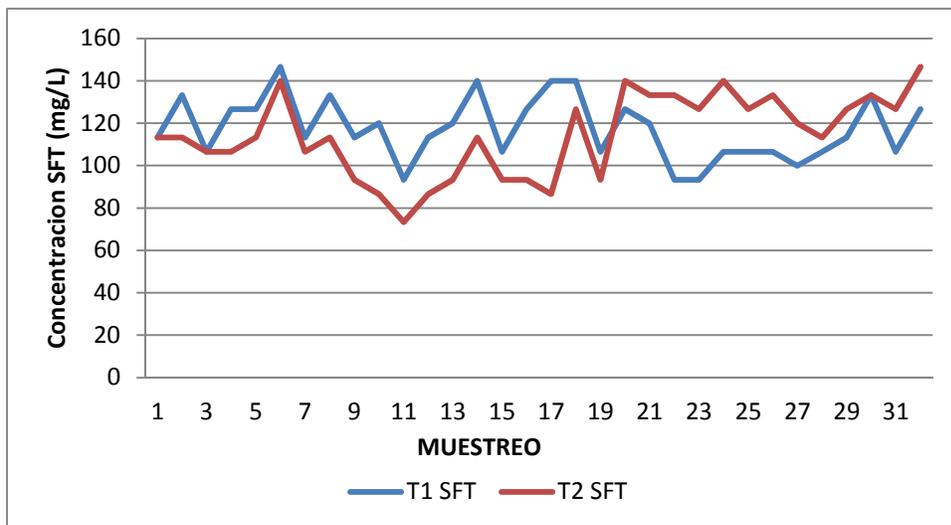
**6.1.10 Sólidos Fijos Totales (SFT).** En la evaluación de los tratamientos por comparación de medias de las concentraciones para este parámetro no se obtuvieron diferencias significativas entre los dos tratamientos con un nivel de confianza de 95% como se ilustra en la Figura 33 y el p-valor obtenido igual a 0,2454.

**Figura 33. Medias obtenidas para SFT en T1 y T2**



Las concentraciones medias calculadas fueron para la CNC de 136,6 mg/L y en los efluentes de los biofiltros de 117,4 mg/L para T1 y 114,1 mg/L para T2; De acuerdo con lo anterior, se determinó que el valor medio de remoción por parte del T1 fue de 14% y por el T2 de 16%. La variación de las concentraciones de SFT a lo largo del periodo de estudio se presenta en la Figura 34.

**Figura 34. Comportamiento de los Sólidos Fijos Totales en T1 y T2 en el efluente durante el periodo de muestreo**



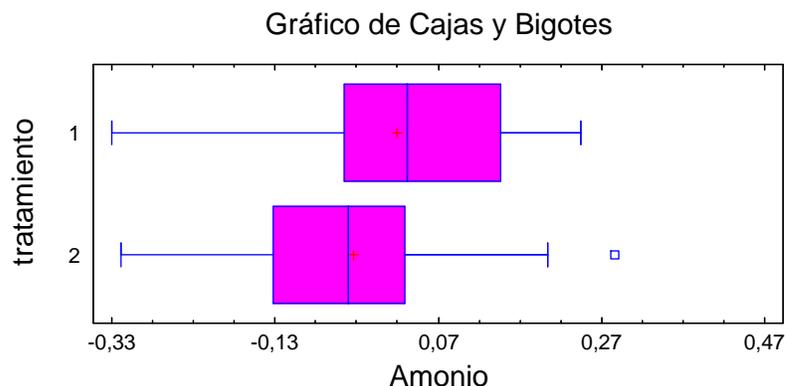
El origen común para los sólidos causados por las heces y alimento no consumido más su degradación como se lo cita en el numeral de Sólidos Totales, son los causantes del aumento en la concentración de los nutrientes en el agua; además,

también hacen parte de la formación de minerales; Margalef<sup>69</sup>, propone una relación del fosfato y los SFT, afirmando que el fósforo forma con facilidad minerales muy insolubles que dependen de la condición local del hipolimnion. Para Metcalf y eddy<sup>70</sup> el carbonato de calcio es el principal componente de las sales inorgánicas.

Los resultados de igualdad obtenidos para este parámetro en esta investigación entre los tratamientos posiblemente se los puede atribuir a que los rangos de TRH estuvieron cercanos; de igual forma los buenos procesos de remoción logrados pueden corresponder a la colonización de los biofiltros por bacterias heterótrofas capaces de almacenar y degradar la materia orgánica. Las altas concentraciones de este nutriente en el efluente de los reactores pueden tener como posible causa el alto contenido de finos producido por la disociación de la materia orgánica en SRA, anteriormente explicada.

**6.1.11 Amonio.** En la prueba de comparación de medias de las concentraciones entre tratamientos realizada para este parámetro no se obtuvieron diferencias significativas con un nivel de confianza de 95% como se ilustra en la Figura 35 y el p-valor obtenido igual a 0,2486.

**Figura 36. Medias obtenidas para Amonio en T1 y T2**



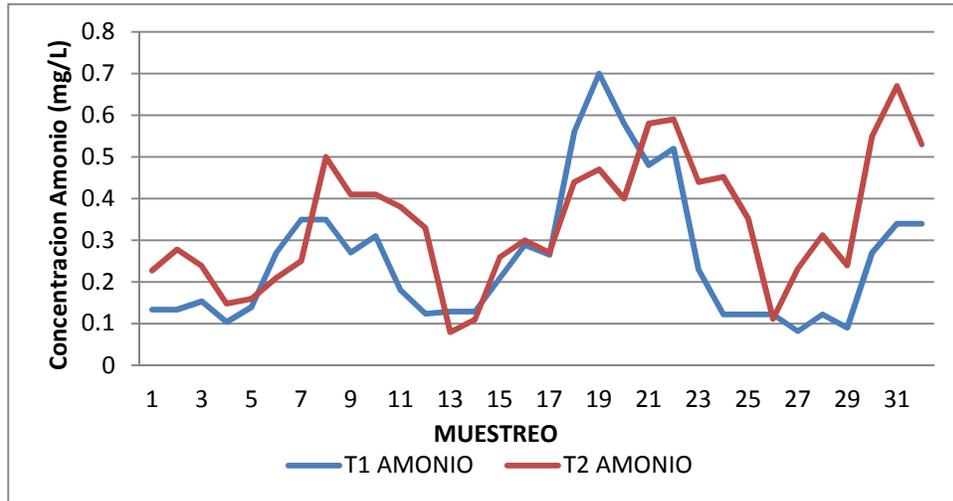
Las concentraciones medias calculadas fueron para la CNC de 0,27 mg/L y en los efluentes de los biofiltros de 0,26 mg/L para T1 y 0,34 mg/L para T2; De acuerdo con lo anterior, se determinó que el valor medio de remoción por parte del T1 fue

<sup>69</sup> MARGALEF. Op. cit., p. 69.

<sup>70</sup> METCALF y EDDY. Op. cit., p. 83.

de 6% y por el T2 de -26%. La variación de las concentraciones de Amonio a lo largo del periodo de estudio se presenta en la Figura 36.

**Figura 36. Comportamiento del Amonio en T1 y T2 en el efluente durante el periodo de muestreo**



Phillips y Love<sup>71</sup>, afirman que, la desnitrificación es la reducción de nitrato para el gas nitrógeno (N<sub>2</sub>), a través de la producción de nitrito y el óxido nítrico gaseoso (NO) y óxido nitroso intermedios óxido nitroso (N<sub>2</sub>O).NO<sub>3</sub>-NO<sub>2</sub>-NO N<sub>2</sub>O N<sub>2</sub> Este proceso se lleva a cabo por las bacterias heterótrofas en condiciones anóxicas y utiliza el nitrato como aceptor terminal de electrones. Los mismos autores afirman que los niveles admitidos de oxígeno para SRA deben ser ≥ 4,0 mg/L, si se tiene en cuenta lo reportado por Chen, Ling y Blancheton<sup>72</sup>, quienes aseguran que, por cada gramo de NAT oxidada convertido a nitrógeno nítrico, se consume aproximadamente 4,18 g de oxígeno; 7,07 g de alcalinidad (CaCO<sub>3</sub>) y 0,17 g de biomasa bacteriana, estos procesos pueden reducir los niveles hasta formar zonas anóxicas en las que pueden llevarse a cabo procesos de desnitrificación.

Pedreira, *et al.*<sup>73</sup>, concluyen que a pesar de la baja toxicidad de nitrato para especies de agua dulce, las concentraciones de oxígeno en el biofiltro deben

<sup>71</sup> PHILLIPS y LOVE. Biological Denitrification Using Upflow Biofiltration In Recirculating Aquaculture Systems: Pilot-Scale Experience and Implications For Full-Scale Environmental Engineering Phoenix, Arizona Virginia. 1998 p.171

<sup>72</sup> CHEN, LING y BLANCHETON. Op. cit., p. 180.

<sup>73</sup> PEDREIRA. Op. cit., p. 516.

mantenerse apropiadas; esto lo ratifica Van Rijn; Tal y Schreier<sup>74</sup> quienes afirman que bajo condiciones de anoxia puede ocurrir desnitrificación, donde el nitrato se reduce a amoníaco.

Los resultados de igualdad obtenidos para este parámetro entre los tratamientos en esta investigación, se los atribuye posiblemente a que los rangos de TRH fueron cercanos; sin embargo, las remociones negativas y las altas concentraciones en el efluente del reactor, se los sustenta a través de las anteriores citaciones a probables procesos de desnitrificación, acompañado de actividad anaeróbica de respiración endógena con desprendimiento de biopelícula a causa del incremento de carga orgánica, aumento del TRH en las horas de la noche durante el periodo de estudio produciendo un aumento de bacterias heterótrofas que desplazan por su mayor rendimiento a las bacterias autótrofas, motivo de mayor consumo de oxígeno y disminución de los procesos de nitrificación, acompañado de un flujo con baja turbulencia.

A continuación se presenta la Tabla 9 que da un resumen estadístico del comportamiento de cada parámetro en términos de eficiencia de remoción y valores de concentración en los biofiltros para cada tratamiento y para la caja de nivel constante, de igual forma indica las diferencias significativas y el p-valor obtenido.

**Tabla 9. Resumen estadístico resultados parámetros evaluados**

Parámetros	% remoción		P-valor	Dif. Sig. 95%(Si)	Dif. Sig. 90% (Si)	[ ] mg/L		[ ] mg/L CNC
	T1	T2				T1	T2	
DQO	15	19	0,5128			18,93	18,06	22,35
NAT	4	-25	0,1965			0,26	0,34	0,27
Fosfato	80	91	0,8264			0,06	0,03	0,3
Nitrito	54	54	0,9499			0,09	0,09	0,2
Nitrato	3	9	0,0114	X	X	8,67	8,16	8,96
Turbiedad	-31	10	0,0057	X	X	0,72	0,49	0,55
Color Aparente	25	17	0,0782		X	43,87	48,4	58,42
ST	15	13	0,0849		X	308,7	313,52	361,64
SV	16	10	0,0533		X	188	202,37	224,96
SFT	14	16	0,2454			117,4	114,13	136,63
Amonio	6	-26	0,2486			0,26	0,34	0,27

Fuente: Esta investigación

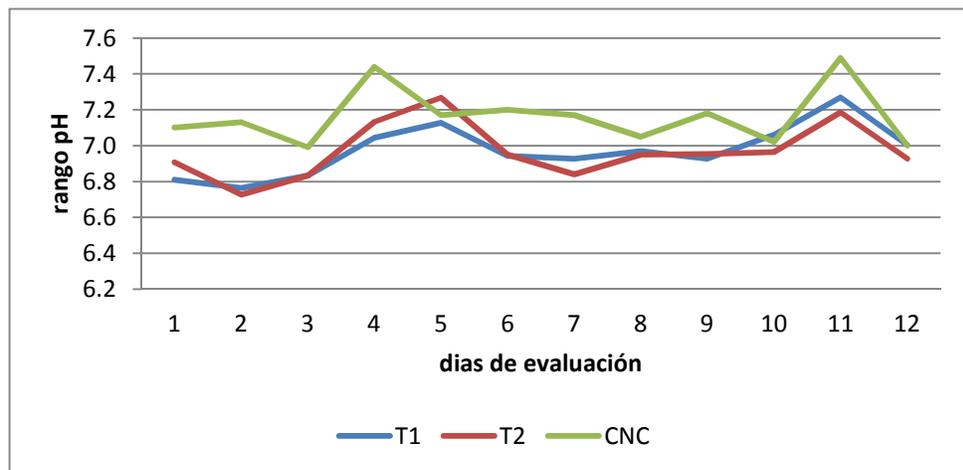
<sup>74</sup> VAN RIJN; TAL y SCHREIER. Denitrification in recirculating systems: Theory and applications. En: Aquacultural Engineering. Abril, 2005. vol. 34. p. 366.

## 6.2 DATOS OBTENIDOS PARA LOS PARÁMETROS DE CONTROL DIARIOS

A continuación, se presenta el análisis de los resultados obtenidos durante el periodo del experimento para parámetros medidos diariamente.

**6.2.1 pH.** Durante el periodo de estudio el comportamiento de este parámetro para los dos tratamientos se mantuvo dentro de los límites adecuados para la especie como se lo observa en la Figura 37, (los datos de muestreo para todos los parámetros diarios se los puede apreciar en el anexo A) sin embargo, el valor más alto siempre se mantuvo en la CNC, atribuyendo este fenómeno a la alcalinidad desprendida por el sustrato (granito) que compone el sistema de prefiltración que le antecede. Timmons *et al.*<sup>75</sup>, afirman que resultados más recientes sugieren que el rango más óptimo, es de un pH entre 7,2 a 7,8. Los mismos autores afirman que los biofiltros nitrificantes han sido operados en un rango mucho más amplio desde 6 a 9, debido a la adaptación de la población bacteriana y a las condiciones de operación reales. Probablemente es una buena idea mantener el pH cerca del límite inferior del rango óptimo para la población bacteriana nitrificante y de esta manera minimizar el estrés por amoníaco de los peces cultivados.

**Figura 37. Comportamiento del pH en T1, T2 y CNC durante el periodo de estudio**



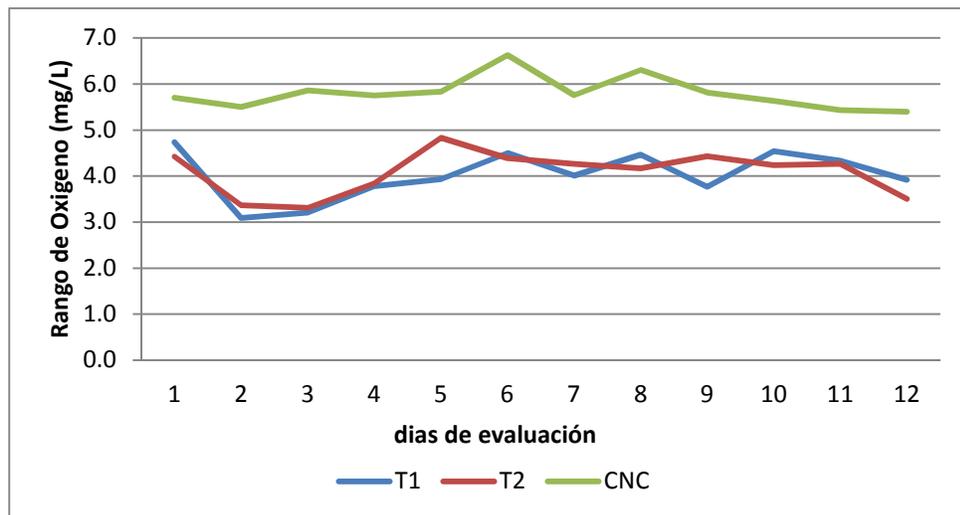
Los procesos de nitrificación producen acidez y tienden a desestabilizar el medio; la alcalinidad es el parámetro que actúa como buffer, manteniendo la concentración de iones hidrógenos dentro de los límites indicados.

<sup>75</sup> TIMMONS, *et al.* Op. cit., p. 212.

En el proceso de nitrificación, la variación del pH (aumento o disminución) en intervalos cortos de tiempo causa estrés en la biopelícula, alterando los procesos y disminuyendo considerablemente los porcentajes de remoción de amonio. Según Eding, *et al.*<sup>76</sup>, reportan dentro de sus experiencias con biofiltros percoladores que observaron inhibición en la tasa de remoción de NAT cuando el pH fue igual a 8 dentro de la biopelícula, presentándose una extracción promedio de 0,71 NAT g/m<sup>2</sup>/día.

**6.2.2 Oxígeno.** Durante el periodo de estudio el comportamiento de este parámetro para los dos tratamientos se mantuvo en los límites requeridos para la especie como se muestra en la Figura 38; sin embargo, el valor más alto prevaleció en la CNC. Para Timmons *et al.*<sup>77</sup>, el oxígeno se torna como el factor limitante en los procesos de nitrificación en los biofiltros y en la competitiva demanda de las bacterias heterótrofas. Los mismos autores, afirman que por cada gramo de nitrógeno amoniacal oxidado a nitrógeno nítrico, se requieren 4,57 g de oxígeno.

**Figura 38. Comportamiento del Oxígeno en T1, T2 y CNC durante el periodo de estudio**



Según lo reportado por Chen, Ling y Blancheton<sup>78</sup>, el rango mínimo de concentración de oxígeno requerido para alcanzar fiabilidad en los procesos de nitrificación está entre 0,6 y 3,4 mg/L de oxígeno disuelto, sugiriendo 2 mg/L como nivel mínimo de oxígeno para biofiltración en acuicultura dentro de los procesos;

<sup>76</sup> EDING, *et al.* Op. cit., p. 246-247.

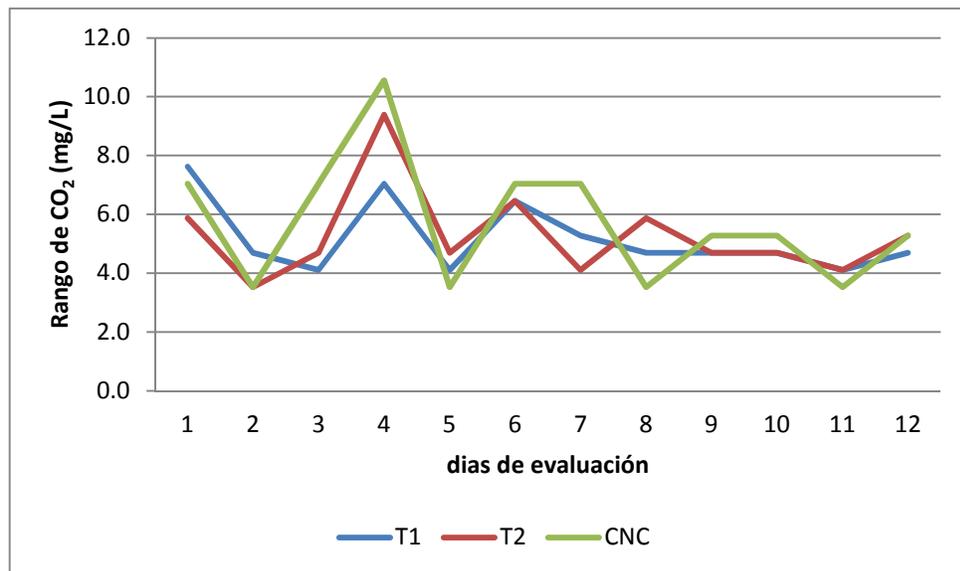
<sup>77</sup> TIMMONS, *et al.* Op. cit., p. 213.

<sup>78</sup> CHEN, LING y BLANCHETON. Op. cit., p. 184.

sin embargo, es más importante mantener suficiente oxígeno en el proceso de película fija que en los procesos de crecimiento suspendido debido a la naturaleza del transporte en la difusión de película fija. Durante el periodo de investigación los valores de oxígeno disuelto se mantuvieron dentro de los rangos recomendados por los autores.

**6.2.3 Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).** Durante el periodo de estudio el comportamiento de este parámetro para los dos tratamientos se mantuvo dentro de los límites requeridos para la especie, como se muestra en la Figura 39; hecho que posiblemente se lo puede atribuir al contenido de granito en el sistema de prefiltración que neutralizo la acción del CO<sub>2</sub> y no permitió que bajara el pH. De acuerdo con Blanco<sup>79</sup>, la neutralización de la acidez producida por el CO<sub>2</sub> se realiza por las soluciones de carbonatos y bicarbonatos de todos los metales alcalinos y alcalinotérreos existentes en el agua pues son sustancias tampón.

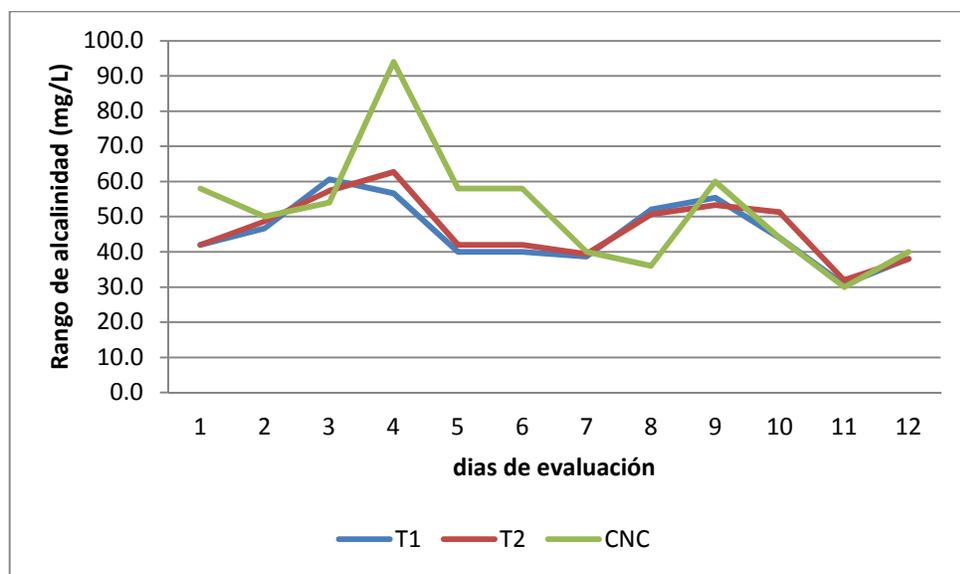
**Figura 39. Comportamiento del CO<sub>2</sub> en T1, T2 y CNC durante el periodo de estudio**



<sup>79</sup> BLANCO. Op. cit., p. 79.

**6.2.4 Alcalinidad.** Durante el periodo de estudio el comportamiento de este parámetro para los dos tratamientos se mantuvo en los límites requeridos para la especie mientras que en la CNC hubo una mayor concentración como se muestra en la Figura 40. Timmons *et al.*<sup>80</sup>, afirman que la nitrificación es un proceso de formación de ácido y si los sistemas de biofiltración están mal tamponados el pH del sistema bajará impactando el desempeño del biofiltro, motivo por el cual en esta investigación se optó por trabajar con granito (material derivado del mármol que contiene carbonatos de calcio) en el sistema de prefiltración del SRA.

**Figura 40. Comportamiento de la Alcalinidad en T1, T2 y CNC durante el periodo de estudio**



Eding *et al.*<sup>81</sup>, sostienen que la nitrificación requiere 2 moles de  $\text{HCO}_3^-$  por mol de  $\text{NH}_4^+$  oxidado y un mol de  $\text{HCO}_3^-$  en el caso de oxidar 1 mol  $\text{NH}_3$ , que es igual a dos y un equivalente de alcalinidad por mol de sustrato oxidado, respectivamente. Los mismos autores reportan datos de estudios realizados con filtros percoladores donde se evaluaron los posibles efectos de la alcalinidad en la velocidad de eliminación de NAT y observaron una reducción del 100% en la tasa de nitrificación cuando el valor de la alcalinidad del agua total se redujo de 2 mEq/L en pH 7,7 a 0,2 mEq/L pH 6,2 lo que demostró que, para la nitrificación completa se debe tener concentraciones entre 1,5 a 2,0 mEq/L, además, sugirieron que, la destrucción de alcalinidad en el proceso de nitrificación debe tener un nivel mínimo

<sup>80</sup> TIMMONS, *et al.* Op. cit., p. 212.

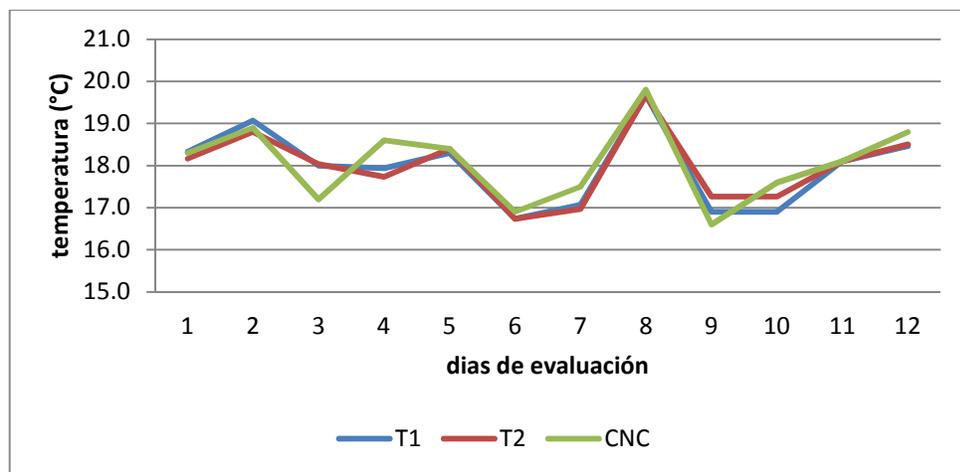
<sup>81</sup> EDING, *et al.* Op. cit., p. 246.

de 0,9 mEq/L para cubrir las necesidades inorgánicas del carbono en la oxidación del amoníaco.

**6.2.5 Temperatura.** Durante el periodo de estudio el comportamiento de este parámetro para los dos tratamientos y para CNC se mantuvo estable como se aprecia en la Figura 41. Timmons *et al.*<sup>82</sup>, afirman que la temperatura juega un rol significativo en la velocidad de reacción de la nitrificación como lo hace en toda la cinética de reacciones químicas y biológicas. Los mismos autores afirman que, las poblaciones nitrificantes son capaces de adaptarse a un amplio rango de temperatura ambiental, si se aclimatan lentamente. En la práctica la temperatura en la cual actúa el biofiltro está normalmente determinada por los requerimientos de la especie de cultivo y no por las necesidades de las bacterias del mismo.

En estudios realizados por Eding, *et al.*<sup>83</sup>, reportan que la baja temperatura para el cultivo de especies de aguas frías como la trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) es un parámetro a contemplar en el diseño del tamaño del filtro percolador, debido a la menor tasa de eliminación de NAT por m<sup>2</sup> de superficie de biofiltro.

**Figura 41. Comportamiento de la temperatura en T1, T2 y CNC durante el periodo de estudio**



<sup>82</sup> TIMMONS, *et al.* Op. cit., p. 212.

<sup>83</sup> EDING, *et al.* Op. cit., p. 238.

### 6.3 COMPORTAMIENTO DE PARÁMETROS PRODUCTIVOS

Las variables productivas evaluadas en esta investigación fueron el crecimiento en términos de ganancia de peso y conversión alimenticia detallado en la Tabla 11.

**6.3.1 Incremento de peso (IP).** Se refiere a la ganancia de peso obtenida por un individuo, en un determinado periodo y se calcula con base en la siguiente fórmula.

$$IP = Wf - Wi$$

Donde:

IP: Incremento de peso

Wf: Incremento final en gramos

Wi: Peso inicial en gramos

**6.3.2 Conversión alimenticia (CA).** Determinada por la cantidad de alimento suministrado dividido entre el incremento de peso.

$$CA = \frac{\text{cantidad de alimento}}{\text{incremento de peso}}$$

**Tabla 10. Parámetros productivos evaluados**

Ganancia de peso periodo de estudio (g)	Conversión alimenticia	Inc/W/g/día	Carga kg/m <sup>3</sup>	Densidad ind./m <sup>2</sup>	% de alimentación
62,7	1,4	1,4	Inicio 5 Final 7	Inicio 107 Final 68	2,5%

Para Guillaume, J, *et al.*<sup>84</sup> La Trucha necesita entre 250 y 300 g de oxígeno para metabolizar un kg de alimento, si encuentra dificultades para obtenerlo del medio tenderá a utilizar de forma menos eficaz su ración como consecuencia del costo

<sup>84</sup> GUILLAUME, J; KAUSHIK, S; BERGOT, P; MÉTAILLER, R. Nutrición y alimentación de peces y crustáceos. Madrid.: Mundi-Prensa, 2004. p 403.

energético que representa la toma de oxígeno. De acuerdo con Blanco<sup>85</sup>, en la trucha por cada 1000 g de alimento suministrado 400 g son eliminados en las heces sin haber aportado ningún beneficio energético, lo que genera gran polución de materia orgánica. Teniendo en cuenta estas afirmaciones factores conjuntos como los anteriores nombrados mal manejados disminuyen la rentabilidad de esta actividad.

El mismo autor presenta la curva de crecimiento de la trucha arcoíris donde hace referencia al incremento de peso de la especie durante un tiempo de 175 días alcanzando un peso de 300 g iniciando desde alevín, con un incremento de peso por día promedio de 1,71g; los valores obtenidos en esta investigación estuvieron dentro del rango reportado<sup>86</sup>.

En estudios realizados por D'orbcastel; Blancheton y Belaud<sup>87</sup> en la evaluación de un SRA para el cultivo de Trucha, montado en dos receways de volumen igual a 360 m<sup>3</sup> y área de tratamiento de aguas residuales de 127m<sup>3</sup> acompañado de un filtro de lecho móvil aireado. Manejaron capacidad de carga de 60 kg/m<sup>3</sup>, los peces fueron alimentados dos veces en el día con porcentajes de alimento entre 0,8 y 1,1% de la biomasa con porcentaje de proteína de 45%, los parámetros como oxígeno y temperatura fueron monitoreados continuamente; mientras que los demás parámetros se los controló cada dos semanas durante un periodo de 200 días. En sus resultados reportaron: que no presentaron patologías y los rendimientos en crecimiento fueron normales a los de los sistemas abiertos.

Los resultados productivos obtenidos en esta investigación se los puede atribuir al buen desempeño logrado por el sistema que mantuvo parámetros físico químicos en los rangos aceptables para el cultivo de Trucha, indicando rendimientos en incremento de peso y conversión alimenticia dentro del rango para la especie en condiciones normales de producción.

---

<sup>85</sup> BLANCO. Op. cit., p. 381.

<sup>86</sup> Ibid., p. 245.

<sup>87</sup> D'orbcastel; Blancheton y Belaud. Op. cit., p. 135-143.

## 7. CONCLUSIONES

En la evaluación de la eficiencia de biofiltros aerobios de flujo ascendente con película fija totalmente sumergida con diferentes TRH para el tratamiento de aguas residuales en el cultivo de Trucha Arcoíris en un SRA se concluyó que:

Se obtuvieron diferencias estadísticamente con el 95% de confianza para los parámetros de Turbiedad y Nitrato. El análisis estadístico demostró que el mejor tratamiento fue el T2 con TRH de 20 a 25 minutos.

El análisis estadístico demostró que para un nivel de confianza del 90% hubo diferencias significativas para cinco parámetros siendo el mejor tratamiento T2 para Turbiedad y Nitrato con TRH de 20 a 25 min y T1 para Color Aparente, Sólidos Totales y Sólidos Volátiles con TRH de 15 a 20 min.

Los rangos de porcentajes de remoción obtenidos bajo las condiciones de operación, diámetro, altura de lecho, granulometría de material filtrante y afluentes de carga contaminante anteriormente mencionados fueron:

Parámetros	% remoción		Parámetros	% remoción	
	T1	T2		T1	T2
<b>DQO</b>	15	19	Color Aparente	25	17
<b>NAT</b>	4	-25	ST	15	13
<b>Fosfato</b>	80	91	SV	16	10
<b>Nitrito</b>	54	54	SFT	14	16
<b>Nitrato</b>	3	9	Amonio	6	-26
<b>Turbiedad</b>	-31	10			

El comportamiento de los parámetros de control pH, alcalinidad y CO<sub>2</sub> se mantuvo en los límites adecuados por el uso de granito en las columnas de prefiltración. La temperatura y el oxígeno no presentaron fluctuaciones marcadas pues se trabajó a temperatura ambiente y se utilizó aireación mecánica.

Los valores medios de los parámetros de control fueron:

<b>PARÁMETRO</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>CNC</b>
<b>pH</b>	6,97	6,96	7,20
<b>Oxígeno (mg/L)</b>	4,02	4,08	5,80
<b>Alcalinidad (mg/L)</b>	35,38	46,61	51,83
<b>CO<sub>2</sub> (mg/L)</b>	5,18	5,28	5,72
<b>Temperatura</b>	17,95	17,96	18,05

## 8. RECOMENDACIONES

Evaluar el sistema con otros rangos de TRH más separados

Ensayar diferentes métodos de purga para el sistema, con el fin de evitar obstrucción de los biofiltros.

Implementar cargas de siembra más altas en el tanque de cultivo y evaluar el comportamiento de variables productivas del sistema.

Incorporar piedras difusoras dentro de los biofiltros con el propósito de asegurar la aireación y evitar procesos anóxicos.

Evaluar diferentes prototipos de prefiltración con el fin de reducir el paso de finos.

En sistemas intensivos se recomienda tener control de parámetros en horas nocturnas.

Implementar un sistema de aireación en el tanque de cultivo de forma que reduzca la turbulencia causada y no descomponga las heces para evitar la producción de finos.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. Calidad y Tratamiento del Agua. 5 ed. Madrid. Editorial McGraw-Hill. 2002. 1231 p.

ANDERSON, David. R; SWEENEY, Dennis. J; WILLIAMS, Thomas. A. Estadística Para Administración y Economía. 2 Edición. México. Editorial THOMAS. 2001. 581 p.

APHA- AWWA- WPCF. Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Madrid. Ediciones Días de Santos S.A., 1992. 1715 p.

ARBOLEDA VALENCIA, Jorge. Teoría y Práctica de la Purificación de Aguas. 3 ed. Bogotá D.C.: Mc GRAW-HILL. 2000. 739 p.

BLANCO, Carmen. La trucha Cría Industrial. 2 ed. España. Ediciones Mundiprensa, 1994. 503 p.

CHEN, Shulin; LING, Jian y BLANCHETON, Jean-Paul. Nitrification kinetics of biofilm as affected by water quality factors. En: Aquacultural Engineering. 2006. no. 34.. p 179–197

COORDINACIÓN GENERAL DE MINERÍA (México). Perfil De Mercado De La Caliza Y Sus Derivados. [en línea]. Edición Internet México: 2005. [Citado en 11 abril de 2012]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.economia.dgm.gob.mx/dgpm/perfiles/Caliza.pdf> >

CRITES, Ron. TCHOBANOGLIOUS, George. Sistemas de Manejo de Aguas Residuales. Colombia.: McGraw-Hill, 2000. 971 p.

D'ORBCASTEL, Roque; BLANCHETON, Jean-Paul y BELAUD, Alain. Water quality and rainbow trout performance in a Danish Model Farm recirculating system: Comparison with a flow through system. En: Aquacultural Engineering. Febrero, 2009. vol.40. p 135-143.

EDING, E.H.; KAMSTRA, A.; VERRETH, J.A.J.; HUISMAN, E.A.; KLAPWIJK, A. Design and operation of nitrifying trickling filters in recirculating aquaculture: A review. En: Aquacultural Engineering. Septiembre, 2005. no. 34. p. 234–260.

GUILLAUME, J; KAUSHIK, S; BERGOT, P; MÉTAILLER, R. Nutrición y alimentación de peces y crustáceos. Madrid.: Mundi-Prensa, 2004. 475 p.

GREINER, Anthony y TIMMONS, Michael. En: Aquacultural Engineering. Abril, 1998. vol. 18,. p. 189-200.

KEMMADAMRONG, Praphon y DEESOMSAK, Kanchit. Performance Study Of Wastewater Treatment By Upflow Aerated Sand-Media Biofilter. EN: WISA 2000. Mayo- Junio, 2000. p. 1-8.

KINKELIN, Pierre; MICHEL, Christian y GHITTINO, Pietro. Tratamiento de las enfermedades de los peces. Barcelona.: Acribia, S.A. 1985. 353 p.

LIXIANG, Liu; BEIPING, Zhang; XIAOHUI, Wu; GANG, Yan y XIEJUAN, Lu. Simultaneous Removal of Nitrogen and Phosphorous from Municipal Wastewater Using Continuous-Flow Integrated Biological Reactor. En: Journal of Environmental Engineering. Marzo, 2008. no.134,. p 169-176.

MAHAMUD, M; GUTIÉRREZ, A y SASTRE, H. Biosólidos Generados en la Depuración de Aguas. En: Ingeniería del Agua. Septiembre, 1996. vol. 3 no. 3,.p. 45-54.

MALONE, Ronald y PFEIFFER, Timothy. Rating fixed film nitrifying biofilters used in recirculating Aquaculture systems. En: aquacultural engineering. Agosto, 2006. vol. 34,. p. 389-402.

MARGALEF, Ramón. Limnología. Barcelona. Omega, 1983. 1010 p.

METCALF y EDDY. Ingeniería Sanitaria Tratamiento, Evacuación y Reutilización de Aguas Residuales. España.: Labor, s.a.1985. v 2. 969 p.

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Ensayo Para Determinar la granulometría por Tamizado. NTC 1522. Bogotá, D.C.: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. 1999. p 1-6.

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Tejido de Alambre y Tamices Para propósitos de Ensayo. NTC 32. Bogotá, D.C.: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. 2002. 11 p.

OFICINA REGIONAL DE LA FAO PARA AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE (FAO). Pesca y Acuicultura [en línea]. Edición en internet. Santiago de Chile: 2012[citado el 10 de abril 2012]. Disponible en internet: < URL: <http://www.rlc.fao.org/es/areas-tecnicas/pesca-acuicultura/>

OFICINA REGIONAL DE LA FAO PARA AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE (FAO). Pesca y Acuicultura [en línea]. Edición en internet. Colombia: 2012[citado el 18 de Mayo 2012]. Disponible en internet: < URL: [http://www.fao.org/fishery/legalframework/nalo\\_colombia/es](http://www.fao.org/fishery/legalframework/nalo_colombia/es)

PEDREIRA MATTOS, Marcelo: KENNEDY LUZ, Ronald: EPAMINONDAS DOS SANTOS, José Cláudio: SAMPAIO VIEIRA, Edson: Silva Sá Fortes, e Rafael. Biofiltração da água e tipos de substrato na larvicultura do pacamã. En: Pesq. agropec. Mayo, 2009. vol.44, no. 5,. p. 511-518.

PELANDA, J; LEMMEL, H y PUJOL, R. High Nitrification Rate With Upflow Biofiltration. En: Wat.Sci.Tech. Diciembre, 1996. vol. 34. no. 1-2,. p. 347-353

PEREIRA, Lilian Paula y MERCANTE, Cacilda Thais. A amônia nos sistemas de criação de peixes e seus efeitos sobre a qualidade da água. En: B. Inst. Pesca. Junio, 2005.no. 31,. p.84-88.

PEREZ ORTIZ, Volmar. Derecho Humano al agua. Bogotá, D.C.: Imprenta Nacional de Colombia. 2009. 456 p.

PHILLIPS, Jennifer y LOVE, Nancy. Biological Denitrification Using Upflow Biofiltration In Recirculating Aquaculture Systems: Pilot-Scale Experience and Implications For Full-Scale. En: Environmental Engineering. Phoenix, Arizona Virginia. 1998. p.171-178

PUJOL, R; LEMEL, H y GOUSAILLES, M. A Key point Of Nitrification In An Upflow Biofiltration Reactor. En: Wat.Sci.Tech. 1998. vol. 38. no.3., p 43-49.

ROLDÁN PÉREZ, Gabriel. Fundamentos de Limnología Neotropical. Medellín. Universidad de Antioquia. 1992. v 2. p. 439.

ROMERO, Jairo. Tratamiento de Aguas Residuales Teoría y principio del diseño. 3 ed. Bogotá. Escuela Colombiana de Ingeniería, 2004. 1248 p.

SALAZAR ARIZA, Gustavo. Consideraciones Generales Sobre Acuicultura en: Fundamentos Generales Para Acuicultura. Instituto Nacional de Pesca y Acuicultura INPA. Bogotá. 1993. 286 p.

TIMMONS, Michael. B; EBELING, James. M; WHEATON, Fred. W; SUMMERFELT, Steven. T; VINCI, Brian. J. Sistema de Recirculación para la Acuicultura. 2 ed. Santiago de Chile.: Quebecor World Chile S:A., 2002. 746 p.

VAN RIJN, J y BARAK Yoram. Denitrification in Recirculating Aquaculture Systems: From Biochemistry to Biofilters. En: Environmental Engineering. Phoenix, Arizona Virginia. 1998 p.179-187

VAN RIJN, J; TAL Yossi y SCHREIER, Harold. Denitrification in recirculating systems: Theory and applications. En: Aquacultural Engineering. Abril, 2005. vol. 34. p. 364-376.

VON SPERLING. Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias. En: Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 3 ed. v 1. Belo Horizonte. Universidad Federal de Minas Gerais. 2005. 452 p.

WHEATON, Fredrick. Acuicultura Diseño y Construcción de Sistemas. México.: AGT, 1982. 704 p.

# **ANEXOS**

**Anexo A. Registro de parámetros evaluados**  
**Registro de demanda química de oxígeno (DQO)**

Registro de DQO (mg/L)													
Numero de análisis	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
T1	R1	2	3	18	77	10	11	20	18	22	32	33	0
	R2	3	5	11	0	17	29	0	36	18	17	36	28
	R3	6	3	17	38	26	16	0	35	22	37	12	0
T2	R1	3	0	14	0	27	12	30	36	64	21	66	0
	R2	1	0	17	0	19	17	0	31	18	13	38	25
	R3	0	0	19	18	10	8	0	22	24	9	81	0
Caja de nivel constante	0	5	20	19	3	14	0	18	20	59	158	0	

**Registro de nitrógeno amoniacal total (NAT)**

Registro de NAT (mg/L)													
Numero de análisis	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
T1	R1	0,00	0,10	0,15	0,32	0,10	0,00	0,20	0,40	0,00	0,75	0,40	0,20
	R2	0,00	0,20	0,10	0,12	0,23	0,00	0,60	0,50	0,00	1,71	0,70	0,00
	R3	0,00	0,20	0,25	0,16	0,00	0,00	0,00	0,45	0,00	0,90	0,35	0,00
T2	R1	0,00	0,20	0,90	0,04	0,00	0,25	0,00	0,45	0,10	0,25	0,45	1,25
	R2	0,00	0,10	0,10	0,20	0,00	0,15	0,85	0,30	0,05	0,85	0,30	0,50
	R3	1,20	0,10	0,10	0,36	0,00	0,00	0,70	0,50	0,00	1,56	0,60	0,00
Caja de nivel constante	0,26	0,60	0,30	0,20	0,48	0,00	0,00	0,10	0,20	0,85	0,75	0,00	

**Registro de fosfato**

Registro de fosfato (mg/L)													
Numero de análisis	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
T1	R1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	R2	0,50	0,01	0,00	1,35	0,00	0,03	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
	R3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
T2	R1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	R2	0,00	0,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	R3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Caja de nivel constante	0,20	0,53	0,00	1,80	0,00	0,00	0,30	0,00	0,43	0,00	0,10	0,00	

## Registro de nitrito

Registro de nitrito (mg/L)													
Numero de análisis		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T1	R1	0,37	0,00	0,04	0,44	0,03	0,03	0,03	0,01	0,05	0,04	0,09	0,00
	R2	0,37	0,00	0,08	0,07	0,04	0,04	0,03	0,03	0,00	0,02	0,01	0,00
	R3	1,25	0,00	0,03	0,16	0,00	0,01	0,06	0,02	0,00	0,09	0,00	0,00
T2	R1	0,26	0,00	0,03	0,13	0,01	0,05	0,04	0,02	0,00	0,04	0,00	0,00
	R2	0,23	0,00	0,24	0,47	0,03	0,02	0,03	0,01	0,00	0,03	0,00	0,00
	R3	1,31	0,02	0,04	0,09	0,02	0,01	0,04	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00
Caja de nivel constante		1,62	0,18	0,27	0,85	0,05	0,10	0,10	0,08	0,01	0,04	0,03	0,00

## Registro de nitrato

Registro de nitrato (mg/L)													
Numero de análisis		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T1	R1	5,8	7,7	10,1	10,9	6,3	7,5	11,1	11,0	9,1	12,2	4,1	11,1
	R2	6,1	7,7	7,6	10,3	4,1	11,3	10,9	8,0	7,0	9,5	2,4	12,3
	R3	6,0	7,6	8,6	11,0	5,6	12,2	12,2	7,5	7,2	12,2	8,4	12,3
T2	R1	5,9	7,7	7,7	10,6	4,7	9,5	11,4	7,0	7,1	4,0	2,9	10,9
	R2	6,0	6,6	8,8	9,3	4,2	10,6	12,1	8,3	8,0	12,2	5,1	12,3
	R3	7,0	8,0	8,3	10,3	6,2	7,9	10,8	6,1	8,0	11,6	7,3	12,3
Caja de nivel constante		7,4	7,9	12,5	12,2	6,9	7,9	9,8	9,0	6,6	12,2	3,4	12,3

## Registro de turbiedad

Registro de turbiedad (UNT)													
Numero de análisis		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T1	R1	3,86	0,53	0,52	0,75	0,75	0,47	0,34	1,34	0,35	0,40	0,51	0,50
	R2	1,11	0,45	0,54	0,23	0,23	0,39	0,36	0,64	0,30	0,38	0,47	0,52
	R3	1,12	0,41	0,55	0,60	0,60	0,34	0,83	5,27	0,64	0,50	0,49	0,28
T2	R1	0,72	0,32	0,47	0,68	0,68	0,40	0,52	0,61	0,26	0,39	0,50	0,32
	R2	0,72	0,25	0,53	0,76	0,76	0,32	0,47	0,55	0,30	0,45	0,46	0,41
	R3	0,75	0,47	0,58	0,54	0,54	0,28	0,56	0,53	0,18	0,54	0,52	0,43
Caja de nivel constante		0,65	0,60	0,56	0,58	0,58	0,44	0,58	0,77	0,44	0,23	0,59	0,62

## Registro de color aparente

Registro de color aparente (UC)													
Numero de análisis		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T1	R1	50,9	23,4	41,7	78,5	78,5	27,1	36,2	45,4	43,6	41,7	39,9	38,1
	R2	50,9	30,7	36,2	39,9	39,9	25,2	39,9	39,9	41,7	43,6	45,4	38,1
	R3	41,7	38,1	80,3	65,6	65,6	30,7	36,2	34,4	36,2	42,7	49,1	38,1
T2	R1	117,0	84,0	36,2	68,4	68,4	41,7	34,4	41,7	45,4	42,7	39,9	39,9
	R2	74,8	28,9	69,3	47,3	47,3	34,4	32,6	39,9	47,3	50,9	54,6	47,3
	R3	30,7	34,4	43,6	98,6	98,6	28,9	30,7	36,2	43,6	42,7	41,7	39,9
Caja de nivel constante		43,6	49,1	47,3	80,3	80,3	38,1	49,1	45,4	50,9	68,4	85,8	87,6

## Registro de sólidos totales (ST)

Registro de sólidos totales (mg/L)													
N° análisis		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T1	R1	300,0	233,3	366,7	466,7	233,3	300,0	166,7	400,0	433,3	466,7	133,3	233,3
	R2	266,7	333,3	400,0	400,0	266,7	300,0	133,3	266,7	466,7	366,7	133,3	233,3
	R3	266,7	266,7	433,3	433,3	133,3	233,3	200,0	366,7	400,0	400,0	133,3	266,7
T2	R1	366,7	300,0	466,7	466,7	266,7	300,0	200,0	333,3	466,7	400,0	100,0	166,7
	R2	266,7	266,7	400,0	266,7	233,3	266,7	200,0	333,3	300,0	366,7	100,0	366,7
	R3	266,7	300,0	600,0	466,7	300,0	300,0	166,7	433,3	466,7	533,3	266,7	266,7
CNC		266,7	333,3	400,0	500,0	266,7	266,7	266,7	400,0	533,3	466,7	233,3	333,3

## Registro de sólidos volátiles

Registro de sólidos volátiles (mg/L)													
N° análisis		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T1	R1	200,0	100,0	266,7	333,3	133,3	100,0	233,3	200,0	300,0	266,7	100,0	133,3
	R2	166,7	166,7	333,3	266,7	133,3	100,0	166,7	100,0	266,7	233,3	100,0	133,3
	R3	133,3	200,0	300,0	333,3	33,3	100,0	166,7	200,0	266,7	200,0	133,3	133,3
T2	R1	166,7	266,7	300,0	366,7	200,0	100,0	200,0	166,7	333,3	200,0	66,7	133,3
	R2	200,0	166,7	266,7	166,7	166,7	100,0	200,0	200,0	233,3	100,0	100,0	133,3
	R3	166,7	233,3	366,7	400,0	133,3	166,7	166,7	233,3	333,3	333,3	166,7	166,7
CNC		133,3	200,0	233,3	366,7	100,0	133,3	266,7	200,0	366,7	300,0	133,3	166,7

## Registro de sólidos fijos totales

Registro de sólidos fijos totales (mg/L)													
N° análisis		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T1	R1	100,0	133,3	100,0	133,3	100,0	200,0	0,0	200,0	133,3	200,0	33,3	100,0
	R2	100,0	166,7	66,7	133,3	133,3	200,0	0,0	166,7	200,0	133,3	33,3	100,0
	R3	133,3	66,7	133,3	100,0	100,0	133,3	33,3	166,7	133,3	200,0	0,0	133,3
T2	R1	200,0	33,3	166,7	100,0	66,7	200,0	0,0	166,7	133,3	200,0	33,3	33,3
	R2	66,7	100,0	133,3	100,0	66,7	166,7	0,0	133,3	66,7	266,7	0,0	233,3
	R3	100,0	66,7	233,3	66,7	166,7	133,3	0,0	200,0	133,3	200,0	100,0	100,0
CNC		133,3	133,3	166,7	133,3	166,7	133,3	0,0	200,0	166,7	166,7	100,0	166,7

## Registro de amonio

Registro de amonio (mg/L)													
Numero de análisis		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T1	R1	0,00	0,10	0,15	0,32	0,10	0,00	0,20	0,40	0,00	0,75	0,40	0,20
	R2	0,00	0,20	0,10	0,12	0,23	0,00	0,60	0,50	0,00	1,70	0,70	0,00
	R3	0,00	0,20	0,25	0,16	0,00	0,00	0,00	0,45	0,00	0,90	0,35	0,00
T2	R1	0,00	0,20	0,90	0,04	0,00	0,25	0,00	0,45	0,10	0,25	0,45	1,25
	R2	0,00	0,10	0,10	0,20	0,00	0,15	0,85	0,30	0,05	0,85	0,30	0,50
	R3	1,20	0,10	0,10	0,36	0,00	0,00	0,70	0,50	0,00	1,55	0,60	0,00
Caja de nivel constante		0,26	0,60	0,30	0,20	0,48	0,00	0,00	0,10	0,20	0,85	0,75	0,00

## Registro diario de pH durante el periodo de estudio

Registro de pH		Días de análisis realizados											
Días		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T1	R1	6,84	6,8	6,89	7,08	7,18	6,99	6,85	6,96	6,95	7,13	7,2	6,99
	R2	6,86	6,77	6,73	7,01	7,16	6,88	7,02	7,03	6,93	7,05	7,27	6,95
	R3	6,73	6,72	6,88	7,04	7,04	6,96	6,91	6,92	6,9	7	7,34	7,07
T2	R1	6,85	6,67	6,8	7,05	7,16	6,98	6,87	6,92	6,96	7,01	7,2	7,01
	R2	6,93	6,67	6,77	7,25	7,34	6,9	6,99	7,13	6,92	6,91	7,17	6,85
	R3	6,94	6,84	6,93	7,1	7,3	6,97	6,66	6,8	6,98	6,97	7,19	6,92
CNC		7,1	7,13	6,99	7,44	7,17	7,2	7,17	7,05	7,18	7,02	7,49	7
Tanque de cultivo		6,6	6,89	6,35	6,84	7,04	6,81	7,08	6,62	6,77	6,67	6,97	6,66
Columna Prefiltracion 1		6,75	6,76	6,54	6,93	6,68	6,63	6,89	6,7	6,77	6,6	7,1	6,71

### Registro diario de oxígeno durante el periodo de estudio

Registro de Oxígeno		Días de análisis realizados											
Reactores		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T1	R1	4,55	3,71	3,22	4,62	4,1	5,36	3,85	5,4	4,13	5,08	5,1	3,96
	R2	4,2	2,61	2,9	3,27	4,2	4,05	4,51	4,1	3,9	5,15	4	3,65
	R3	5,46	2,95	3,51	3,45	3,5	4,08	3,67	3,9	3,28	3,4	3,9	4,14
T2	R1	4,65	3,26	3,08	3,13	5	4,92	3,79	4,6	4,4	5	4,2	3,61
	R2	4,85	3,1	3,4	3,75	5,5	4,83	5,44	4,7	4,66	4,13	4,7	3,5
	R3	3,76	3,74	3,46	4,65	4	3,42	3,57	3,2	4,23	3,59	3,9	3,41
CNC		5,7	5,5	5,86	5,75	5,83	6,63	5,76	6,3	5,81	5,63	5,43	5,4
Tanque de cultivo		5,9	5,81	5,75	5,91	5,7	6,1	5,56	6,83	5,47	6,03	5,64	4,2
Columna Prefiltracion 1		6,1	3,48	2,72	2,95	3,6	1,78	4,48	3	2,84	3,31	3,25	2,7
Columna Prefiltracion 2		2,18	1,68	0,52	1,12	2,81	1,18	3,46	2,3	2,35	0,8	0,9	0,7

### Registro diario de CO<sub>2</sub> durante el periodo de estudio

Registro de CO2		Días de análisis realizados											
Reactores		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T1	R1	5,28	3,52	5,28	8,8	5,28	7,04	5,28	5,28	3,52	3,52	3,52	5,28
	R2	7,04	5,28	3,52	8,8	3,52	5,28	5,28	3,52	5,28	5,28	5,28	5,28
	R3	10,56	5,28	3,52	3,52	3,52	7,04	5,28	5,28	5,28	5,28	3,52	3,52
T2	R1	7,04	3,52	5,28	8,8	5,28	3,52	5,28	7,04	3,52	3,52	5,28	5,28
	R2	7,04	3,52	5,28	8,8	3,52	7,04	3,52	5,28	5,28	3,52	3,52	3,52
	R3	3,52	3,52	3,52	10,56	5,28	8,8	3,52	5,28	5,28	7,04	3,52	7,04
CNC		7,04	3,52	7,04	10,56	3,52	7,04	7,04	3,52	5,28	5,28	3,52	5,28
Tanque de cultivo		15,84	3,52	8,8	8,8	3,52	8,8	3,52	7,04	7,04	8,8	5,28	5,28
Columna Prefiltracion 1		7,04	5,28	5,28	10,56	5,28	5,28	3,52	5,28	5,28	7,04	3,52	5,28

### Registro diario de alcalinidad durante el periodo de estudio

Registro de Alcalinidad		Días de análisis realizados											
Reactores		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T1	R1	36	48	60	70	38	38	38	52	56	42	32	40
	R2	36	46	60	72	42	42	40	50	56	44	32	36
	R3	54	46	62	28	40	40	38	54	54	46	28	38
T2	R1	58	48	58	70	42	42	40	48	52	44	36	40
	R2	34	50	56	44	42	42	40	56	56	60	30	38
	R3	34	48	58	74	42	42	38	48	52	50	30	36
	CNC	58	50	54	94	58	58	40	36	60	44	30	40
	Tanque de cultivo	70	50	70	74	48	48	44	50	58	46	30	42
	Columna Prefiltracion 1	56	50	64	4	48	48	42	52	52	44	30	40

### Registro diario de temperatura durante el periodo de estudio

Registro de Temperatura		Días de análisis realizados											
Reactores		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T1	R1	18,3	19,2	18	18,2	18,2	16,7	17,2	19,7	16,9	16,9	18,1	18,4
	R2	18,3	18,9	18	17,8	18,3	16,7	17,1	19,6	16,9	16,9	18,1	18,5
	R3	18,4	19,1	18	17,8	18,4	16,8	16,9	19,7	16,9	16,9	18,1	18,5
T2	R1	18,4	19	18,1	17,6	18,4	16,8	17,1	19,7	17,2	17,3	18,1	18,5
	R2	18,4	18,8	17,9	17,7	18,4	16,7	17,2	19,7	17,3	17,3	18,1	18,5
	R3	17,7	18,6	18,1	17,9	18,4	16,7	16,6	19,6	17,3	17,2	18,1	18,5
	CNC	18,3	18,9	17,2	18,6	18,4	16,9	17,5	19,8	16,6	17,6	18,1	18,8
	Tanque de cultivo	18,4	18,2	17,1	17,2	17,6	16,6	16,7	19,5	16,8	16,7	17,9	17,8
	Columna Prefiltracion 1	18,4	17,8	17,3	17,2	17,5	16,4	16,6	19,6	16,7	16,7	18,1	17,7

## Anexo B. Parámetros evaluados

### Registro de parámetros semanales datos suavizados para DQO, NAT, Fosfato en (mg/L)

T1 DQO	T 2 DQO	CNC DQO	T1 NAT	T2 NAT	CNC NAT	T1 FOSFATO	T2 FOSFATO	CNC FOSFATO
22	8,8	9,4	0,1344	0,2287	0,3682	0	0	0,506
23,8	10,6	12,2	0,1344	0,2789	0,316	0	0	0,466
27,2	16,6	11,2	0,1545	0,2388	0,1956	0	0	0,42
27,2	21	10,8	0,2046	0,1485	0,1555	0	0	0,42
16,2	33,8	11	0,1404	0,1605	0,1555	0	0	0,146
20,6	32,6	22,2	0,2709	0,2107	0,2307	0	0	0,146
25	43,4	51	0,3511	0,2508	0,3812	0	0	0,166
21	37,4	51	0,3511	0,5017	0,3812	0	0	0,106
18	30,4		0,2709	0,4113		0,1	0	
14,6	17,6		0,311	0,4113		0,102	0,178	
10,4	16,8		0,1806	0,3812		0,102	0,178	
3,8	3,6		0,1244	0,3311		0,372	0,178	
7,2	7,4		0,1294	0,0802		0,372	0,178	
12,4	10,6		0,1294	0,1103		0,278	0,178	
11,4	10,6		0,2097	0,2608		0,276	0	
16,4	13,4		0,2899	0,301		0,276	0	
20	17		0,2659	0,2709		0,008	0	
20	15,8		0,5619	0,4414		0,008	0	
21,4	20		0,7023	0,4715		0,002	0	
27	25		0,5819	0,4013		0,002	0	
21	18,8		0,4816	0,5819		0,002	0	
18	15,2		0,5217	0,592		0	0	
18	16,4		0,2307	0,4414		0	0	
18,4	12,4		0,1224	0,4535		0	0	
18	9,4		0,1224	0,3531		0	0	
20	11		0,1224	0,1123		0	0	
19,4	11		0,0822	0,2327		0	0	
23	11,6		0,1224	0,313		0	0	
19,8	12,8		0,0903	0,2408		0	0	
22	12,6		0,2709	0,5118		0	0	
21,2	27,2		0,3411	0,6722		0	0	
21,2	27,2		0,3411	0,5318		0	0	
18,93	18,06	22,35	0,26	0,34	0,27	0,06	0,03	0,30
Promedios								

**Registro de parámetros semanales datos suavizados para nitrito, nitrato, turbiedad en (mg/L)**

T1 NITRITO	T2 NITRITO	CNC NITRITO	T1 NITRATO	T2 NITRATO	CNC NITRATO	T1 TURBIEDA D	T2 TURBIEDA D	CNC TURBIEDAD
0,173	0,085	0,592	8,14	7,29	9,37	1,282	0,554	0,594
0,105	0,043	0,288	8,48	8,01	9,46	0,604	0,51	0,552
0,111	0,05	0,271	9,16	8,74	9,83	0,566	0,55	0,548
0,106	0,048	0,233	9,33	8,61	9,13	0,73	0,578	0,59
0,028	0,022	0,0642	8,97	7,92	8,01	0,65	0,494	0,562
0,03	0,028	0,0632	10,15	7,79	9,06	0,58	0,436	0,492
0,041	0,018	0,0492	9,46	6,46	8,16	0,588	0,456	0,522
0,035	0,011	0,0302	9,45	6,37	8,66	0,62	0,416	0,53
0,1062	0,0526		8,48	6,17		0,574	0,438	
0,0972	0,0526		8,21	6,07		0,594	0,436	
0,1052	0,0926		7,29	7,03		0,622	0,464	
0,1022	0,1866		8,53	8,32		0,566	0,516	
0,1092	0,1916		7,14	6,97		0,512	0,604	
0,044	0,15		8,17	7,88		0,368	0,524	
0,05	0,156		8,81	8,97		0,35	0,568	
0,04	0,111		8,89	8,87		0,37	0,572	
0,026	0,017		8,24	8,61		0,384	0,48	
0,023	0,017		9,32	10,21		0,414	0,418	
0,016	0,013		7,55	9,12		0,43	0,446	
0,01	0,007		7,82	9,16		0,462	0,434	
0,2558	0,2666		7,43	8,9		0,558	0,474	
0,2558	0,2706		7,55	8,9		0,58	0,508	
0,2578	0,2726		7,36	8,13		0,614	0,534	
0,2878	0,2906		9,07	9,16		0,64	0,55	
0,2878	0,2936		7,73	7,95		0,656	0,576	
0,039	0,034		8,96	8,13		0,5	0,482	
0,051	0,038		9,87	8,69		0,584	0,5	
0,049	0,031		9,66	8,24		1,528	0,49	
0,018	0,013		8,9	7,79		1,536	0,418	
0,035	0,019		10,22	8,87		1,516	0,418	
0,033	0,017		9,46	8,74		1,546	0,466	
0,021	0,009		9,48	9,03		1,436	0,44	
0,09	0,09	0,20	8,67	8,16	8,96	0,72	0,49	0,55
promed								

**Registro de parámetros semanales datos suavizados para color aparente, ST, SV en (mg/L)**

T1 COLOR	T2 COLOR	CNC COLOR	T1 ST	T2 ST	CNC ST	T1 SV	T2 SV	CNC SV
54,59	74,78	60,1	320	373,3	353,3	206,6	260	206,6
49,82	59,73	58,99	320	360	353,3	186,6	246,6	206,6
52,39	49,82	58,99	306,6	340	340	213,3	233,3	220
53,12	50,92	58,63	313,3	313,3	340	199,9	206,6	213,3
46,14	46,33	52,75	306,6	313,3	346,6	193,3	200	213,3
38,79	41,2	50,37	353,3	340	386,6	220	200	253,3
41,36	40,83	59,92	320	300	380	220	193,3	253,3
41,73	41,93	67,62	333,3	293,3	393,3	200	180	233,3
42,84	48,54		306,6	280		193,3	186,6	
40,27	45,23		286,6	240		166,6	153,3	
39,17	50,55		273,3	240		180	163,6	
39,17	52,02		326,6	273,3		213,3	186,6	
39,54	53,49		333,3	286,6		213,3	193,3	
34,4	45,41		340	286,6		200	173,3	
36,23	46,14		300	273,3		200	180	
36,97	40,27		373,33	260		153,3	166,6	
37,33	40,27		286,66	266,6		153,3	180	
38,07	41		306,6	293,3		173,3	166,6	
42,11	45,04		273,3	260		173,3	166,6	
41,75	47,99		293,3	293,3		166,6	153,3	
42,11	46,15		293,3	280		173,3	146,6	
41,38	43,58		253,3	280		159,9	146,6	
48,72	42,12		266,6	226,6		173,3	200	
52,76	50,93		326,6	400		219,9	260	
58,26	61,2		306,6	386,6		199,9	260	
56,06	60,83		300	393,3		193,3	260	
55,69	60,1		386,6	366,6		186,6	246,6	
46,51	58,63		273,3	333,3		166,6	220	
40,64	47,61		266,6	333,3		153,3	206,6	
36,06	36,42		320	380		186,6	246,6	
39,73	38,98		300	373,3		193,3	246,6	
40,1	40,82		313,3	393,3		186,6	246,6	
43,87	48,40	58,42	308,72	313,52	361,64	188,08	202,37	224,96
promedios								

**Registro de parámetros semanales datos suavizados para SFT, Amonio en (mg/L)**

T1 SFT	T2 SFT	CNC SFT	T1 AMONIO	T2 AMONIO	CNC AMONIO
113,3	113,3	146,6	0,134	0,228	0,367
133,3	113,3	146,6	0,134	0,278	0,315
106,6	106,6	120	0,154	0,238	0,195
126,6	106,6	126,6	0,104	0,148	0,155
126,6	113,3	133,3	0,14	0,16	0,155
146,6	140	133,3	0,27	0,21	0,23
113,3	106,6	126,6	0,35	0,25	0,38
133,3	113,3	160	0,35	0,5	0,38
113,3	93,3		0,27	0,41	
120	86,6		0,31	0,41	
93,3	73,3		0,18	0,38	
113,3	86,6		0,124	0,33	
120	93,3		0,129	0,08	
140	113,3		0,129	0,11	
106,6	93,3		0,209	0,26	
126,6	93,3		0,289	0,3	
140	86,6		0,265	0,27	
140	126,6		0,56	0,44	
106,6	93,3		0,7	0,47	
126,6	140		0,58	0,4	
119,9	133,3		0,48	0,58	
93,3	133,3		0,52	0,59	
93,3	126,6		0,23	0,44	
106,6	140		0,122	0,452	
106,6	126,6		0,122	0,352	
106,6	133,3		0,122	0,112	
99,9	120		0,082	0,232	
106,6	113,3		0,122	0,312	
113,3	126,6		0,09	0,24	
133,3	133,3		0,27	0,55	
106,6	126,6		0,34	0,67	
126,6	146,6		0,34	0,53	
117,45	114,13	136,63	0,26	0,34	0,27
promedios					

## Anexo C. Análisis estadísticos (datos en términos de concentración)

### DQO

#### Comparación de Medias

-----  
95,0% intervalo de confianza para la media de T1 DQO: 1,08333+/-6,39997

[-5,31664, 7,48331]

95,0% intervalo de confianza para la media de T2 DQO: 3,73333 +/- 5,30513

[-1,57179, 9,03846]

95,0% intervalos de confianza para la diferencia de medias:

Suponiendo varianzas iguales: -2,65 +/- 8,0888 [-10,7388, 5,4388]

Contrastes t de comparación de medias

Hipótesis nula:  $\mu_1 = \mu_2$

Hipótesis alterna.:  $\mu_1 <> \mu_2$

Suponiendo varianzas iguales:  $t = -0,659453$  P-Valor = 0,512893

#### Prueba de F

Comparación de Desviaciones Típicas

-----

	T1 DQO	T2 DQO
Desv Típica	15,1563	12,5635
Varianza	229,714	157,842
GL	23	23

Cociente de varianzas = 1,45534

95,0% Intervalos de Confianza

Desviación Típica de T1 DQO: [11,7797,21,2607]

Desviación Típica de T2 DQO: [9,76455,17,6236]

Cociente de varianzas: [0,629571,3,36423]

Contrastes F para comparar varianzas

Hipótesis nula:  $\sigma_1 = \sigma_2$

(1) Hipótesis alt.:  $\sigma_1 <> \sigma_2$

$F = 1,45534$  P-Valor = 0,374805

## Resumen Estadístico

	T1 DQO	T2 DQO
Frecuencia	24	24
Media	1,08333	3,73333
Varianza	229,714	157,842
Desv. Típica	15,1563	12,5635
Mínimo	-16,4	22,8
Máximo	29,8	31,0
Rango	46,2	53,8
Asimetría típica	2,06635	1,05739
Curtosis típificada	-0,225763	0,478

## NAT

### Comparación de Medias

95,0% intervalo de confianza para la media de T1 NAT: 0,019 +/- 0,0671243 [-0,0481243, 0,0861243]

95,0% intervalo de confianza para la media de T2 NAT: -0,0392083 +/- 0,0627598 [-0,101968, 0,0235515]

95,0% intervalos de confianza para la diferencia de medias:

Suponiendo varianzas iguales: 0,0582083 +/- 0,0894167 [-0,0312084, 0,147625]

Contrastes t de comparación de medias

Hipótesis nula:  $media1 = media2$

Hipótesis alterna.:  $media1 <> media2$

Suponiendo varianzas iguales:  $t = 1,31035$  P-Valor = 0,196582

## Prueba de F

### Comparación de Desviaciones Típicas

---

	T1 NAT	T2 NAT
Desv Típica	0,158963	0,148627
Varianza	0,0252692	0,02209
GL	23	23

---

Cociente de varianzas = 1,14392

### 95,0% Intervalos de Confianza

Desviación Típica de T1 NAT:

[0,123548,0,222987]

Desviación Típica de T2 NAT:

[0,115515,0,208488]

Cociente de varianzas: [0,494853,2,64433]

### Contrastes F para comparar varianzas

Hipótesis nula:  $\sigma_1 = \sigma_2$

(1) Hipótesis alt.:  $\sigma_1 \neq \sigma_2$

F = 1,14392 P-Valor = 0,749859

## Resumen Estadístico

---

	T1 NAT	T2 NAT
Frecuencia	24	24
Media	0,019	-0,0392083
Varianza	0,0252692	0,02209
Desviación típica	0,158963	0,148627
Mínimo	-0,33	-0,32
Máximo	0,246	0,288
Rango	0,576	0,608
Asimetría tipi.	-1,2035	0,639678
Curtosis tipificada	0,1741	0,190797

---

## Fosfato

### Comparación de Medias

-----

95,0% intervalo de confianza para la media de T1 fosfato: 0,27225+/-0,0674641  
[0,204786,0,339714]

95,0% intervalo de confianza para la media de T2 fosfato: 0,282167 +/- 0,0640244  
[0,218142,0,346191]

95,0% intervalos de confianza para la diferencia de medias:

Suponiendo varianzas iguales: -0,00991667 +/- 0,0905011 [-  
0,100418,0,0805844]

Contrastes t de comparación de medias

Hipótesis nula: media1 = media2

Hipótesis alterna.: media1 <> media2

Suponiendo varianzas iguales: t = -0,220564 P-Valor = 0,826408

### Prueba de F

Comparación de Desviaciones Típicas

-----

	T1 fosfato	T2 fosfato
Desv Típica	0,159768	0,151622
Varianza	0,0255257	0,0229892
GL	23	23

Cociente de varianzas = 1,11033

95,0% Intervalos de Confianza

Desviación Típica de T1 fosfato: [0,124174,0,224116]

Desviación Típica de T2 fosfato: [0,117843,0,212689]

Cociente de varianzas: [0,480323,2,56669]

Contrastes F para comparar varianzas

Hipótesis nula: sigma1 = sigma2

(1) Hipótesis alt.: sigma1 <> sigma2

F = 1,11033 P-Valor = 0,80398

## Resumen Estadístico

	T1 fosfato	T2 fosfato
Frecuencia	24	24
Media	0,27225	0,282167
Varianza	0,0255257	0,0229892
Desviación típica	0,159768	0,151622
Mínimo	0,104	0,106
Máximo	0,506	0,506
Rango	0,402	0,4
Asimetría tipi.	0,75097	0,39213
Curtosis tipificada	-1,87373	-1,83536

## Nitrito

### Comparación de Medias

95,0% intervalo de confianza para la media de T1 nitrito: 0,137142 +/- 0,0574187  
[0,0797229,0,19456]

95,0% intervalo de confianza para la media de T2 nitrito: 0,139592 +/- 0,05605  
[0,0835417,0,195642]

95,0% intervalos de confianza para la diferencia de medias:

Suponiendo varianzas iguales: -0,00245 +/- 0,0780774 [-0,0805274,0,0756274]

### Contrastes t de comparación de medias

Hipótesis nula: media1 = media2

Hipótesis alt.: media1 <> media2

Suponiendo varianzas iguales: t = -0,063163 P-Valor = 0,94991

## Prueba de F

### Comparación de Desviaciones Típicas

	T1 nitrito	T2 nitrito
Desv Típica	0,135978	0,132737
Varianza	0,0184901	0,0176191
GL	23	23

Cociente de varianzas = 1,04944

### 95,0% Intervalos de Confianza

Desviación Típica de T1 nitrito: [0,105684,0,190745]

Desviación Típica de T2 nitrito: [0,103165,0,186198]

Cociente de varianzas: [0,453979,2,42592]

### Contrastes F para comparar varianzas

Hipótesis nula:  $\sigma_1 = \sigma_2$

(1) Hipótesis alt.:  $\sigma_1 \neq \sigma_2$

F = 1,04944 P-Valor = 0,90888

## Resumen Estadístico

	T1 nitrito	T2 nitrito
Frecuencia	24	24
Media	0,137142	0,139592
Varianza	0,0184901	0,0176191
Desviación típica	0,135978	0,132737
Mínimo	-0,0048	0,0192
Máximo	0,4828	0,507
Rango	0,4876	0,4878
Asimetría tipi.	2,06951	2,50912
Curtosis tipificada	0,504036	1,18437

## Nitrato

### Comparación de Medias

-----

95,0% intervalo de confianza para la media de T1 nitrato: 0,07 +/- 0,430661 [-0,360661,0,500661]

95,0% intervalo de confianza para la media de T2 nitrato: 0,814167 +/- 0,394611 [0,419556,1,20878]

95,0% intervalos de confianza para la diferencia de medias:

Suponiendo varianzas iguales: -0,744167 +/- 0,568366 [-1,31253,-0,175801]

Contrastes t de comparación de medias

Hipótesis nula: media1 = media2

Hipótesis alterna.: media1 <> media2

Suponiendo varianzas iguales: t = -2,63551 P-Valor = 0,0114131

### Prueba de F

Comparación de Desviaciones Típicas

-----

	T1 nitrato	T2 nitrato
Desv Típica	1,01988	0,934512
Varianza	1,04017	0,873312
GL	23	23

Cociente de varianzas = 1,19106

95,0% Intervalos de Confianza

Desviación Típica de T1 nitrato:  
[0,792668,1,43065]

Desviación Típica de T2 nitrato:  
[0,726315,1,3109]

Cociente de varianzas: [0,515243,2,7533]

## Contrastes F para comparar varianzas

Hipótesis nula:  $\sigma_1 = \sigma_2$

(1) Hipótesis alt.:  $\sigma_1 \neq \sigma_2$

F = 1,19106 P-Valor = 0,678535

## Resumen Estadístico

	T1 nitrato	T2 nitrato
Frecuencia	24	24
Media	0,07	0,814167
Varianza	1,04017	0,873312
Desviación típica	1,01988	0,934512
Mínimo	-1,3	-1,15
Máximo	2,23	2,4
Rango	3,53	3,55
Asimetría tipi.	0,685568	-0,545103
Curtosis típificada	-0,908071	-0,450234

## Turbiedad

### Comparación de Medias

95,0% intervalo de confianza para la media de T1 turbiedad: -0,218333 +/- 0,185155 [-0,403489,-0,033178]

95,0% intervalo de confianza para la media de T2 turbiedad: 0,055 +/- 0,0172987 [0,0377013,0,0722987]

95,0% intervalos de confianza para la diferencia de medias:

Sin suponer varianzas iguales: -0,273333 +/- 0,185785 [-0,459119,-0,087548]

## Contrastes t de comparación de medias

Hipótesis nula:  $\mu_1 = \mu_2$

Hipótesis alterna.:  $\mu_1 \neq \mu_2$

Sin suponer varianzas iguales: t = -3,0406 P-Valor = 0,00573608

## Prueba de F

### Comparación de Desviaciones Típicas

	T1 turbiedad	T2 turbiedad
Desv Típica	0,438483	0,0409666
Varianza	0,192267	0,00167826
GL	23	23

Cociente de varianzas = 114,563

### 95,0% Intervalos de Confianza

Desviación Típica de T1 turbiedad: [0,340795,0,615086]

Desviación Típica de T2 turbiedad: [0,0318398,0,0574663]

Cociente de varianzas: [49,5593,264,829]

### Contrastes F para comparar varianzas

Hipótesis nula:  $\sigma_1 = \sigma_2$

(1) Hipótesis alt.:  $\sigma_1 \neq \sigma_2$

F = 114,563 P-Valor = 0,0

## Resumen Estadístico

	T1 turbiedad	T2 turbiedad
Frecuencia	24	24
Media	-0,218333	0,055
Varianza	0,192267	0,00167826
Desviación típica	0,438483	0,0409666
Mínimo	-1,024	-0,02
Máximo	0,22	0,144
Rango	1,244	0,164
Asimetría tipi.	-2,06669	0,0486115
Curtosis tipificada	-0,577502	-0,354862

## Color Aparente

### Comparación de Medias

-----

95,0% intervalo de confianza para la media de T1 Color Aparente: 14,3656 +/- 3,41645 [10,9491, 17,782]

95,0% intervalo de confianza para la media de T2 Color Aparente: 9,68483 +/- 4,15147 [5,53336, 13,8363]

95,0% intervalos de confianza para la diferencia de medias:

Suponiendo varianzas iguales: 4,68075 +/- 5,23158 [-0,550833, 9,91233]

Contrastes t de comparación de medias

Hipótesis nula: media1 = media2

Hipótesis alterna.: media1 <> media2

Suponiendo varianzas iguales: t = 1,80096 P-Valor = 0,0782667

### Prueba de F

Comparación de Desviaciones Típicas

-----

	T1 color	T2 color
Desv Típica	8,09079	9,83147
Varianza	65,4609	96,6578
GL	23	23

Cociente de varianzas = 0,677244

95,0% Intervalos de Confianza

Desviación Típica de T1 color: [6,28827, 11,3494]

Desviación Típica de T2 color: [7,64115, 13,7912]

Cociente de varianzas: [0,292971, 1,56554]

Contrastes F para comparar varianzas

Hipótesis nula:  $\sigma_1 = \sigma_2$   
 (1) Hipótesis alt.:  $\sigma_1 \neq \sigma_2$   
 $F = 0,677244$   $P\text{-Valor} = 0,35676$

### Resumen Estadístico

	T1 Color Aparente	T2 Color Aparente
Frecuencia	24	24
Media	14,3656	9,68483
Varianza	65,4609	96,6578
Desviación típica	8,09079	9,83147
Mínimo	1,838	-14,668
Máximo	27,52	26,804
Rango	25,682	41,472
Asimetría tipi.	0,10865	-0,732791
Curtosis típificada	-1,27403	0,251819

### ST

### Comparación de Medias

95,0% intervalo de confianza para la media de T1 ST: 55,5642 +/- 10,3551  
 [45,209,65,9193]

95,0% intervalo de confianza para la media de T2 ST: 36,1117 +/- 20,1798  
 [15,9318,56,2915]

95,0% intervalos de confianza para la diferencia de medias:

Sin suponer varianzas iguales: 19,4525 +/- 22,2745 [-2,82202,41,727]

### Contrastes t de comparación de medias

Hipótesis nula:  $\mu_1 = \mu_2$

Hipótesis alterna.:  $\mu_1 \neq \mu_2$

Sin suponer varianzas iguales:  $t = 1,77415$   $P\text{-Valor} = 0,0849086$

## Prueba de F

### Comparación de Desviaciones Típicas

---

	T1 ST	T2 ST
Desv Típica	24,5229	47,7896
Varianza	601,373	2283,85
GL	23	23

---

Cociente de varianzas = 0,263316

### 95,0% Intervalos de Confianza

Desviación Típica de T1 ST: [19,0595,34,3998]

Desviación Típica de T2 ST: [37,1428,67,0374]

Cociente de varianzas: [0,113909,0,608692]

### Contrastes F para comparar varianzas

Hipótesis nula:  $\sigma_1 = \sigma_2$

(1) Hipótesis alt.:  $\sigma_1 \neq \sigma_2$

F = 0,263316 P-Valor = 0,00221751

## Resumen Estadístico

---

	T1 ST	T2 ST
Frecuencia	24	24
Media	55,5642	36,1117
Varianza	601,373	2283,85
Desviación típica	24,5229	47,7896
Mínimo	13,34	-40,0
Máximo	106,66	120,0
Rango	93,32	160,0
Asimetría tipi.	0,561382	0,15427
Curtosis típicada	-0,506876	-1,28225

---

## SV

### Comparación de Medias

-----  
95,0% intervalo de confianza para la media de T1 SV: 35,8383 +/- 11,069  
[24,7694,46,9073]

95,0% intervalo de confianza para la media de T2 SV: 15,2758 +/- 18,2367 [-  
2,96091,33,5126]

95,0% intervalos de confianza para la diferencia de medias:

Sin suponer varianzas iguales: 20,5625 +/- 20,878 [-0,315547,41,4405]

Contrastes t de comparación de medias

Hipótesis nula: media1 = media2

Hipótesis alterna.: media1 <> media2

Sin suponer varianzas iguales: t = 1,99394 P-Valor = 0,0533866

### Prueba de F

Comparación de Desviaciones Típicas

-----

	T1 SV	T2 SV
Desv Típica	26,2134	43,188
Varianza	687,141	1865,21
GL	23	23

Cociente de varianzas = 0,368399

95,0% Intervalos de Confianza

Desviación Típica de T1 SV: [20,3734,36,7711]

Desviación Típica de T2 SV: [33,5663,60,5825]

Cociente de varianzas: [0,159367,0,851607]

Contrastes F para comparar varianzas

Hipótesis nula: sigma1 = sigma2

(1) Hipótesis alt.: sigma1 <> sigma2

F = 0,368399 P-Valor =  
0,0202039

### Resumen Estadístico

	T1 SV	T2 SV
Frecuencia	24	24
Media	35,8383	15,2758
Varianza	687,141	1865,21
Desviación típica	26,2134	43,188
Mínimo	-6,68	-53,36
Máximo	80,0	86,68
Rango	86,68	140,04
Asimetría tipi.	0,304448	-0,018004
Curtosis típificada	-1,21149	-0,840132

### SFT

#### Comparación de Medias

-----  
95,0% intervalo de confianza para la media de T1 SFT: 15,5553 +/- 6,35843  
[9,1969,21,9138]

95,0% intervalo de confianza para la media de T2 SFT: 20,833 +/- 6,75987  
[14,0731,27,5929]

95,0% intervalos de confianza para la diferencia de medias:

Suponiendo varianzas iguales: -5,27767 +/- 9,03023 [-14,3079,3,75256]

#### Contrastes t de comparación de medias

Hipótesis nula: media1 = media2

Hipótesis alterna.: media1 <> media2

Suponiendo varianzas iguales: t = -1,17643 P-Valor = 0,245476

## Prueba de F

### Comparación de Desviaciones Típicas

	T1 SFT	T2 SFT
Desviación Típica	15,058	16,0087
Varianza	226,742	256,277
GL	23	23

Cociente de varianzas = 0,884755

### 95,0% Intervalos de Confianza

Desviación Típica de T1 SFT: [11,7033,21,1227]

Desviación Típica de T2 SFT: [12,4421,22,4563]

Cociente de varianzas: [0,382739,2,04523]

### Contrastes F para comparar varianzas

Hipótesis nula:  $\sigma_1 = \sigma_2$

(1) Hipótesis alt.:  $\sigma_1 \neq \sigma_2$

F = 0,884755 P-Valor = 0,771548

## Resumen Estadístico

	T1 SFT	T2 SFT
Frecuencia	24	24
Media	15,5553	20,833
Varianza	226,742	256,277
Desviación típica	15,058	16,0087
Mínimo	-13,334	-6,668
Máximo	40,0	53,332
Rango	53,334	60,0
Asimetría tipi.	-0,265363	0,542707
Curtosis típificada	-0,778449	-0,546474

## Amonio

### Comparación de Medias

-----

95,0% intervalo de confianza para la media de T1 amonio: 0,0185833 +/- 0,0670218 [-0,0484384,0,0856051]

95,0% intervalo de confianza para la media de T2 amonio: -0,0337083 +/- 0,0638691 [-0,0975774,0,0301608]

95,0% intervalos de confianza para la diferencia de medias:

Suponiendo varianzas iguales: 0,0522917 +/- 0,0900851 [-0,0377934,0,142377]

Contrastes t de comparación de medias

Hipótesis nula: media1 = media2

Hipótesis alterna.: media1 <> media2

Suponiendo varianzas iguales: t = 1,16843 P-Valor = 0,248654

### Prueba de F

Comparación de Desviaciones Típicas

-----

	T1 amonio	T2 amonio
Desv Típica	0,15872	0,151254
Varianza	0,0251921	0,0228778
GL	23	23

Cociente de varianzas = 1,10116

95,0% Intervalos de Confianza

Desviación Típica de T1 amonio: [0,123359,0,222646]

Desviación Típica de T2 amonio: [0,117557,0,212173]

Cociente de varianzas: [0,476354,2,54548]

Contrastes F para comparar varianzas

Hipótesis nula:  $\sigma_1 = \sigma_2$

(1) Hipótesis alt.:  $\sigma_1 \neq \sigma_2$

F = 1,10116 P-Valor = 0,819234

### Resumen Estadístico

	T1 amonio	T2 amonio
Frecuencia	24	24
Media	0,0185833	-0,0337083
Varianza	0,0251921	0,0228778
Desviación típica	0,15872	0,151254
Mínimo	-0,33	-0,32
Máximo	0,245	0,287
Rango	0,575	0,607
Asimetría tipi.	-1,20399	0,492876
Curtosis típicada	0,17736	-0,0584882