

EVALUACIÓN DE DOS TIEMPOS DE RETENCIÓN HIDRÁULICA, EN UN SISTEMA DE RECIRCULACIÓN VS AIREACIÓN CONVENCIONAL Y SU EFECTO EN LAS VARIABLES PRODUCTIVAS Y BIENESTAR DE EJEMPLARES DE TRUCHA ARCOIRIS (*Oncorhynchus mykiss*)

**DANNY YARNEL CASANOVA DÍAZ
ELDAR DARIO MEJÍA MORÁN**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE CIENCIAS PECUARIAS
DEPARTAMENTO DE RECURSOS HIDROBIOLÓGICOS
PROGRAMA DE INGENIERÍA EN PRODUCCIÓN ACUÍCOLA
PASTO, COLOMBIA
2013**

EVALUACIÓN DE DOS TIEMPOS DE RETENCIÓN HIDRÁULICA, EN UN SISTEMA DE RECIRCULACIÓN VS AIREACIÓN CONVENCIONAL Y SU EFECTO EN LAS VARIABLES PRODUCTIVAS Y BIENESTAR DE EJEMPLARES DE TRUCHA ARCOIRIS (*Oncorhynchus mykiss*)

**DANNY YARNEL CASANOVA DÍAZ
ELDAR DARÍO MEJÍA MORÁN**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero en Producción Acuícola.**

**Director
RUTH DAYANA LUCERO SALCEDO
Ingeniera en Producción Acuícola. M.Sc.**

**Codirector
ROBERTO GARCÍA CRIOLLO
Ingeniero en Producción Acuícola**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE CIENCIAS PECUARIAS
DEPARTAMENTO DE RECURSOS HIDROBIOLÓGICOS
PROGRAMA DE INGENIERÍA EN PRODUCCIÓN ACUÍCOLA
PASTO, COLOMBIA
2013**

“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 Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

NOTA DE ACEPTACIÓN

RUTH DAYANA LUCERO SALCEDO
Presidente de Tesis

ROBERTO GARCÍA CRIOLLO
Copresidente de Tesis

IVÁN ANDRÉS SÁNCHEZ ORTIZ
Jurado Delegado

JORGE NELSON LÓPEZ MACÍAS
Jurado

San Juan de Pasto, 2013.

Dedico a Dios por brindarme la capacidad para superarme y día a día ser una mejor persona.

Dedico a la memoria de mi padre Reinel, quién me dejó el valioso ejemplo que con trabajo y esfuerzo constantes se pueden alcanzar muchas metas; quién me enseñó que valores tan importantes como la honradez, la humildad, el agradecimiento, la generosidad son los pilares fundamentales de una persona de bien. Muchas gracias papá, donde quiera que te encuentres.

Dedico a mi madre Carmen Alicia y a mi hermana Magdaly, por estar junto a mí en los momentos difíciles, por brindarme su apoyo, su compañía y su respaldo. A mis abuelos Parménides y Felisa por sus innumerables bendiciones durante cada etapa de mi vida.

Dedico a mis profesores y compañeros, por su valiosa enseñanza y por ayudarme a fortalecerme profesionalmente.

Danny Yarnel Casanova Díaz

“Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como una oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber”

Albert Einstein

Dedico a: mis queridos padres Aurora Moran y Silvio Mejía, a mis hermanos y a toda mi familia en general, por el apoyo, consejo y recomendaciones brindados, en los momentos que necesite de ellos, para llegar al final de esta meta profesional.

Eldar Darío Mejía Moran

Es más libre el dinero que la gente.
La gente, está al servicio de las cosas.
(Eduardo Galeano. El Sistema).

AGRADECIMIENTOS

Expresamos los más sinceros agradecimientos a:

JORGE NELSON LÓPEZ MACÍAS	D.M.V.Z., Esp., M.Sc., Ph.D Docente Profesor de la Facultad de Ciencias Pecuarias de la Universidad de Nariño
IVÁN ANDRÉS SÁNCHEZ ORTIZ	Ingeniero Civil, Esp., M.Sc. Docente Profesor de la Facultad de Ciencias Pecuarias de la Universidad de Nariño
RUTH DAYANA LUCERO SALCEDO	Ingeniera en Producción Acuícola, M.Sc.
ROBERTO GARCÍA CRIOLLO	Ingeniero en Producción Acuícola Docente 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 y Exactas y Naturales de la Universidad de Nariño
GLORIA LUCÍA CÁRDENAS CALVACHI	Ingeniera Química. Docente de la Facultad de Ciencias Pecuarias de la Universidad de Nariño
LUIS ALFONSO SOLARTE PORTILLA	Zootecnista, Esp. Secretario académico de la Facultad de Ciencias Pecuarias. Universidad de Nariño.
CAMILO LENIN GUERRERO ROMERO	Ingeniero en Producción Acuícola. Técnico de laboratorio.
MARTÍN MONCAYO	Técnico de laboratorio. Universidad Mariana.
ADRIANA SOLARTE VASQUEZ	Ingeniera Ambiental. Universidad Mariana.

JHON MAYA GONZALEZ	Ingeniero Ambiental.	Universidad Mariana.
RAY ESTEBAN VELASQUEZ	Ingeniero Ambiental.	Universidad Mariana.
ROBERTH DARÍO SILVA	Ingeniero Ambiental.	Universidad Mariana.
SEGURIDAD DEL SUR: Iván Cabrera, Delio Morales, Robert Rojas, Jaime Timarán, Edwin Tupaz, Deryan Vergara y Giovanni Villareal.	Empresa de vigilancia	Universidad Mariana.
PERSONAL SERVICIOS GENERALES	Universidad Mariana	
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.	
MAURICIO ALEXANDER CHAMORRO ARÉVALO	Ingeniero en Producción Acuícola.	Universidad de Nariño

Y a todas las personas que de alguna u otra manera contribuyeron en el desarrollo de este proyecto.

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	22
2. OBJETIVOS	24
5.4. OBJETIVO GENERAL	24
5.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
3. MARCO REFERENCIAL	25
5.6. REQUERIMIENTOS DE CALIDAD DE AGUA EN EL CULTIVO DE TRUCHA ARCOÍRIS BAJO CONDICIONES CONTROLADAS	25
5.7. SISTEMAS DE RECIRCULACIÓN ACUÍCOLA.	26
5.8. TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE AGUAS	27
3.1.1. Biofiltración.	28
3.1.2. Nitrificación.	29
3.1.3. Tipos de biofiltros	31
5.9. VARIABLES PRODUCTIVAS	33
5.10. FACTORES QUE AFECTAN LA PRODUCCIÓN	34
3.1.4. Factores que afectan al pez	34
3.1.5. Factores que afectan al agua	34
3.1.6. Factores que afectan al confinamiento	34
3.1.7. Factores que afectan la nutrición	35
3.1.8. Factores que afectan al manejo	35
5.11. ENFERMEDADES EN PECES	35
3.1.9. Causas físicas	35
3.1.10. Estrés	35
3.1.11. Causas químicas	36
3.1.12. Causas biológicas	37
5.12. MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DEL BIENESTAR DE LOS PECES	37
3.1.13. Histopatología.	37
3.1.14. Estado de las aletas	38
4. MATERIALES Y MÉTODOS	40
4.3.1. Caja de nivel constante	41

4.3.2.	Sistema de transporte de flujo.	41
4.3.3.	Unidades experimentales	41
4.3.4.	Digestor anóxico de flujo ascendente (DAFA).	42
4.3.5.	Sistema de tratamiento primario (prefiltración)	46
4.3.6.	Sistema de postfiltración	48
4.3.7.	Reactor aerobio de lecho fluidizado trifásico con circulación en tubos concéntricos (RALFTCC) de flujo ascendente.	48
4.3.8.	Tanque de succión	51
4.3.9.	Motobombas	51
4.3.10.	Controlador de motobombas (Timer)	51
4.3.11.	Unidad de desinfección U.V.	51
4.3.12.	Unidad de aireación	52
4.3.13.	Unidad de generación de aire comprimido (Compresor)	52
4.3.14.	Tanque de aclimatación	52
4.3.15.	Tanques para almacenamiento de agua	52
4.3.16.	Balanza	52
4.3.17.	Oxímetro	53
4.3.18.	Material biológico	53
4.3.19.	Insumos	53
4.4.	MÉTODOS	53
4.4.1.	Selección de materiales para el RALFTCC.	53
4.4.5.	Realización pre-ensayo	65
4.4.8.	Diseño Experimental	66
4.4.6.	Variables a evaluar	67
4.4.6	Bienestar animal	68
4.4.7	Análisis macroscópico de las aletas pectorales, dorsal y caudal	68
4.4.8	Toma de parámetros físico-químicos de la calidad del agua	68
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	69
5.1.	MONITOREO Y CONTROL DE LOS TIEMPOS DE RETENCIÓN HIDRÁULICA (TRH) DURANTE LA INVESTIGACIÓN	69
5.1.1.	Monitoreo y control del TRH en el tratamiento 1	69
5.1.2.	Monitoreo y control del TRH en el tratamiento 2	70

5.2.	VARIABLES PRODUCTIVAS	71
5.2.1.	Incremento de peso	71
5.2.2.	Cargas obtenidas.	76
5.2.3.	Tasa crecimiento específico (TCE).	79
5.3.	BIENESTAR ANIMAL	82
5.3.1.	Sobrevivencia	82
5.3.2.	Necrosis de las aletas	83
5.4.	MONITOREO DE PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DE LA CALIDAD DEL AGUA	92
5.4.1.	Oxígeno disuelto	93
5.4.2.	Temperatura	95
5.4.3.	Potencial de hidrógeno (pH).	97
5.4.4.	Conductividad	99
5.4.5.	Nitrógeno amoniacal total (NAT).	100
5.4.6.	Compuestos nitrogenados.	101
5.4.7.	Materia orgánica en el SRA vs aireación convencional, demanda biológica de oxígeno (DBO ₅) y demanda química de oxígeno (DQO)	107
5.4.8.	Alcalinidad.	110
5.4.9.	Sólidos suspendidos, disueltos y totales	112
5.5.	ANÁLISIS PARCIAL DE RELACIÓN BENEFICIO/COSTO EN EL T1 Y T2	116
5.5.1.	Ecuaciones para el cálculo de potencia requerida en la bomba.	117
5.5.2.	Ecuaciones para el cálculo de potencia requerida en el compresor.	118
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	120
6.1.	CONCLUSIONES	120
6.2.	RECOMENDACIONES	121
7.	BIBLIOGRAFÍA	122
	ANEXOS	136

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Parámetros de calidad de agua para trucha arcoíris (<i>O. mykiss</i>) bajo condiciones controladas	25
Tabla 2. Tipos de material granular utilizado en los sistemas de filtración.	48
Tabla 3. Cálculo de caudal con coeficiente de descarga teórico para el tratamiento 1.	56
Tabla 4. Cálculo de caudal con coeficiente de descarga teórico para el tratamiento 2.	56
Tabla 5. Cálculo de coeficiente de descarga real tratamiento 1	57
Tabla 6. Cálculo de coeficiente de descarga real tratamiento 2.	57
Tabla 7. Cálculo de caudales con coeficiente de descarga real para el tratamiento 1.	58
Tabla 8. Cálculo de caudales con coeficiente de descarga real en el tratamiento 2.	58
Tabla 9. Verificación caudales tratamiento 1	59
Tabla 10. Verificación caudales tratamiento 2	59
Tabla 11. Monitoreo parámetros físico-químicos, en las unidades experimentales	63
Tabla 12. Métodos de determinación de parámetros fisicoquímicos	64
Tabla 13. Talla inicial y final de los tratamientos.	72
Tabla 14. Peso inicial y final de los tratamientos.	72
Tabla 15. Incremento de peso periodo, en el SRA vs aireación convencional.	73
Tabla 16. Cargas obtenidas en SRA vs aireación convencional.	77
Tabla 17. Parámetros fisicoquímicos promedio obtenidos para los tratamientos durante el período de estudio.	93
Tabla 18. Costos de consumo de electricidad	116
Tabla 19. Costos de alimento y semilla	117

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Niveles de necrosis de la aleta pectoral y dorsal.	39
Figura 2. Unidades experimentales	42
Figura 3. Esquema del sistema de recirculación para el cultivo intensivo de trucha arcoíris (vista planta)	43
Figura 4. Esquema del sistema de recirculación para el cultivo intensivo de trucha arcoíris (vista frontal)	44
Figura 5. Montaje del sistema de recirculación para el cultivo intensivo de trucha arcoíris	45
Figura 6. Elaboración y montaje caja de nivel constante	46
Figura 7. Digestor anóxico de flujo ascendente (DAFA) vista superior	47
Figura 8. Distribución del medio granular en el sistema de pre y postfiltración	49
Figura 9. Características y montaje del RALFTCC.	50
Figura 10. Resultados análisis granulométricos de piedra pómez	54
Figura 11. Resultados análisis granulométricos de zeolita	54
Figura 12. Recepción del material biológico y siembra en unidades experimentales.	61
Figura 13. Comportamiento del caudal en el T1 con TRH de 1 hora.	70
Figura 14. Comportamiento del caudal en el T2 TRH de 0,5 horas.	71
Figura 15. Incremento de peso, en el SRA vs aireación convencional.	72
Figura 16. Gráfica de medias para incremento de peso periodo en SRA vs aireación convencional.	73
Figura 17. Tanques de cultivo inicio y final de la investigación en el SRA.	77
Figura 18. Incremento de la carga en kg/m^3 en SRA vs aireación convencional.	79
Figura 19. Gráfica de medias para tasa de crecimiento específica (TCE), en SRA vs aireación convencional.	80
Figura 20. Supervivencia (%) en el SRA vs aireación convencional.	82
Figura 21. Niveles de necrosis de la aleta dorsal (%), en trucha arcoíris, en el SRA vs aireación convencional	85
Figura 22. Niveles de necrosis de la aleta pectoral (%), en trucha arcoíris, en SRA vs aireación convencional	86
Figura 23. Niveles de necrosis de la aleta dorsal.	87
Figura 24. Niveles de necrosis de la aleta pectoral.	88
Figura 25. Niveles de necrosis de la aleta caudal	89
Figura 26. Niveles de necrosis de la aleta caudal (%), en trucha arcoíris, en SRA vs aireación convencional.	90
Figura 27. Comportamiento del oxígeno disuelto en el SRA vs aireación convencional	94

Figura 28. Comportamiento de la temperatura en el SRA vs aireación convencional	96
Figura 29. Comportamiento del pH en el SRA vs aireación convencional	98
Figura 30. Comportamiento de la conductividad en el SRA vs aireación convencional.	99
Figura 31. Comportamiento del nitrógeno amoniacal total en el SRA vs aireación convencional	100
Figura 32. Comportamiento del amonio en el SRA vs aireación convencional	102
Figura 33. Comportamiento de los nitritos en el SRA vs aireación convencional	104
Figura 34. Comportamiento de los nitratos en el SRA vs aireación convencional	106
Figura 35. Comportamiento de la DBO ₅ (mg/L) en el SRA vs aireación convencional.	108
Figura 36. Comportamiento de la DQO (mg/L) en el SRA vs aireación convencional	110
Figura 37. Alcalinidad CaCO ₃ en mg/L en un el SRA vs aireación convencional.	111
Figura 38. Comportamiento de los sólidos suspendidos en el SRA vs aireación convencional.	113
Figura 39. Comportamiento de los sólidos disueltos en el SRA vs aireación convencional.	114
Figura 40. Comportamiento de los sólidos totales en el SRA vs aireación convencional.	115

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Datos promedios peso inicial y final (g), en los tratamientos.	137
Anexo 2. Datos promedios incremento de peso en gramos, y análisis de varianza y Tukey.	137
Anexo 3. Datos promedios longitud inicial y final (mm), en los tratamientos.	138
Anexo 4. Datos promedios carga kg/m ³ inicial y final, y análisis de varianza y Tukey.	138
Anexo 5. Datos promedios y análisis de varianza y Tukey, para tasa de crecimiento específico (TCE).	139
Anexo 6. Datos promedios, bienestar animal medido por medio de la necrosis de la aleta dorsal (%).	140
Anexo 7. Análisis de varianza y Tukey de aleta dorsal para grado de necrosis 0.	140
Anexo 8. Análisis de varianza y Tukey de aleta dorsal para grado de necrosis 1.	141
Anexo 9. Análisis de varianza y Tukey de aleta dorsal para grado de necrosis 2.	141
Anexo 10. Análisis de varianza y Tukey de aleta dorsal para grado de necrosis 3.	142
Anexo 11. Análisis de varianza y Tukey de aleta dorsal para grado de necrosis 4.	142
Anexo 12. Datos promedios del bienestar animal por medio de necrosis de la aleta pectoral (%).	143
Anexo 13. Análisis de varianza y Tukey de aleta pectoral para grado de necrosis 0.	143
Anexo 14. Análisis de varianza y Tukey de aleta pectoral para grado de necrosis 1.	144
Anexo 15. Análisis de varianza y Tukey de aleta pectoral para grado de necrosis 2.	144
Anexo 16. Análisis de varianza y Tukey de aleta pectoral para grado de necrosis 3.	145
Anexo 17. Análisis de varianza y Tukey de aleta pectoral para grado de necrosis 4.	145

Anexo 18. Datos promedios del bienestar animal por medio de índice de mercado de aleta caudal (%).	145
Anexo 19. Análisis de varianza y Tukey de aleta dorsal para análisis de mercado A.	146
Anexo 20. Análisis de varianza y Tukey de aleta dorsal para análisis de mercado B.	146
Anexo 21. Datos promedios oxígeno disuelto, y análisis de varianza y Tukey.	146
Anexo 22. Datos promedios de temperatura, y análisis de varianza y Tukey.	147
Anexo 23. Datos promedios de pH, y análisis de varianza y Tukey.	148
Anexo 24. Datos promedios de conductividad, y análisis de varianza y Tukey.	149
Anexo 25. Datos promedios de nitrógeno amoniacal total, y análisis de varianza y Tukey.	149
Anexo 26. Datos promedios de amonio, y análisis de varianza y Tukey.	150
Anexo 27. Datos promedios de nitritos, y análisis de varianza y Tukey.	151
Anexo 28. Datos promedios de nitratos, y análisis de varianza y Tukey.	152
Anexo 29. Datos promedios de DQO (mg/L) y DBO ₅ (mg/L)	152
Anexo 30. Análisis de varianza y Tukey para DBO ₅ (mg/L)	153
Anexo 31. Análisis de varianza y Tukey para DQO (mg/L)	153
Anexo 32. Datos promedios de alcalinidad CaCO ₃ en mg/L, y análisis de varianza y Tukey.	154
Anexo 33. Datos promedios de sólidos suspendidos en mg/L, y análisis de varianza y Tukey.	154
Anexo 34. Datos promedios de sólidos disueltos en mg/L, y análisis de varianza y Tukey.	155
Anexo 35. Datos promedios de sólidos totales en mg/L, y análisis de varianza y Tukey.	156

GLOSARIO

AFLUENTE: flujo de agua residual que ingresa a un reservorio, estanque o sistema de tratamiento.

AGUAS RESIDUALES: desecho líquido proveniente del consumo humano y su utilización para fines domésticos, agrícolas, pecuarios o industriales mediante sistemas de tratamiento.

AIREACIÓN: proceso mediante el cual se adiciona aire al agua con el propósito de incrementar los niveles de oxígeno disuelto.

ALIMENTO BALANCEADO: mezcla de alimentos que contienen todos los elementos nutricionales necesarios para cada especie.

ALIMENTOS EXTRUÍDOS: alimentos con ciertas propiedades nutricionales las cuales son comprimidas a altas temperaturas y altas presiones, para que mantengan por un tiempo determinado su estado inicial.

ANAERÓBICA: respiración que se lleva a cabo en ausencia de oxígeno.

ANOXIA: reducción de la disponibilidad de oxígeno disuelto en los tejidos corporales de la especie en cultivo por debajo de sus niveles fisiológicos. Ausencia de oxígeno.

BACTERIAS NITRIFICANTES: son las bacterias benéficas llamadas nitrosomonas y nitrobacter encargadas de transformar el amoníaco y el amonio en nitritos y nitratos

BIOFILTRO: Conocidos también como filtros biológicos, son dispositivos utilizados para la eliminación de compuestos contaminantes generados por una actividad acuícola y tratados en un proceso biológico.

CARGA SUPERFICIAL: relación existente entre el caudal y el área superficial de una determinada estructura hidráulica ($\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{día}$).

CARGA: cantidad sembrada en kg por unidad de volumen dentro de una unidad de cultivo.

CONVERSIÓN ALIMENTICIA: Es la cantidad de alimento utilizado para producir un kg de biomasa.

DBO₅: es la cantidad de oxígeno disuelto consumido en cinco días por las bacterias que realizan la degradación biológica de la materia orgánica.

DENSIDAD DE SIEMBRA: número de animales sembrados por unidad de área o volumen dentro de una unidad de cultivo.

DESNITRIFICACIÓN: es el proceso biológico por el cual una bacteria quimiotrófica convierte nitratos (NO_3^-) a nitrógeno gaseoso (N_2), N_2O o amoníaco (NH_3).

DIGESTOR ANÓXICO DE FLUJO ASCENDENTE (DAFA): es un reactor de flujo ascendente donde tiene lugar el proceso de nitrificación. Como medio filtrante posee material cilíndrico (rulos) no degradables biológicamente.

DQO: determina la contaminación orgánica del agua que se mide a partir de la cantidad de oxígeno disuelto necesario para la degradación química de los contaminantes orgánicos que contiene.

EFLUENTE: flujo proveniente de un sistema hidráulico.

EUGENOL: es un líquido extraído de aceites esenciales como el clavo de olor, la nuez moscada y la canela. Es usado en acuicultura experimental como anestésico.

FILTRACIÓN: proceso de remoción de partículas suspendidas del agua proveniente de un sistema acuícola y que pasa a través de un medio poroso (material granular).

GRANULOMETRÍA: clasificación del tamaño de los granos o partículas que constituyen un suelo o un medio poroso y su distribución dentro de un medio filtrante.

LECHO FILTRANTE: medio constituido por el material granular poroso por el cual se hace percolar un flujo.

MATERIA ORGÁNICA: materia compuesta de derivados del carbono.

NITRIFICACIÓN: proceso aeróbico por el cual las bacterias convierten el amonio (NH_4^+) a nitrato (NO_3^-).

REACTOR AEROBIO DE LECHO FLUIDIZADO TRIFÁSICO CON CIRCULACIÓN EN TUBOS CONCÉNTRICOS (RALFTCC): reactor de lecho fluidizado compuesto por material granular (zeolita) donde ocurre la degradación de materia orgánica por la acción de bacterias nitrificantes. Posee un medio sólido, líquido y gaseoso.

SEDIMENTACIÓN: proceso en el cual los sólidos suspendidos presentes en un cuerpo de agua se decantan por gravedad.

SEDIMENTO: material que después de haber estado suspendido dentro del cuerpo de agua, se deposita en el fondo.

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

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue evaluar dos tiempos de retención hidráulica (TRH) en un sistema de recirculación acuícola (SRA) vs aireación convencional, y el efecto sobre las variables productivas y el bienestar animal de juveniles de trucha arcoíris (*O. mykiss*). Se emplearon 3 unidades experimentales con volumen neto de 125 L cada una. Las unidades de tratamiento del SRA fueron: un digestor anóxico de flujo ascendente (DAFA), un prefiltro y un postfiltro (diferentes medios granulares), un reactor aerobio de lecho fluidizado trifásico con circulación (RALFTCC) con tubos concéntricos utilizando zeolita como medio soporte y un sistema de desinfección UV. La unidad experimental de aireación convencional estuvo aislada del SRA.

Se utilizó un diseño en bloques completos aleatorizados (DBCA), se manejaron tres tratamientos y tres bloques durante un periodo de 21 días por cada bloque. Los peces se sembraron con un peso de $31\pm 0,27$ g y talla de $140,98\pm 0,84$ mm, correspondiente a una carga de $10,17\pm 0,09$ kg/m³; los tratamientos evaluados fueron: T0: Sin recambio, T1: TRH=1 h y T2: TRH=0,5 h. Las variables evaluadas fueron: incremento de peso (IP), tasa de crecimiento específico (TCE), carga final (CF), porcentaje de sobrevivencia (%) y necrosis de las aletas dorsal, pectorales y caudal. Igualmente, se determinaron los siguientes parámetros físico-químicos: oxígeno disuelto (mg/L), temperatura (°C), pH y conductividad (μ S/cm); amonio, nitrógeno amoniacal total, nitritos, nitratos (mg/L), alcalinidad (CaCO₃ mg/L), DBO₅, DQO y sólidos suspendidos, disueltos y totales (mg/L).

Se demostró que no existieron diferencias significativas entre los TRH (T1 y T2), los cuales tuvieron un efecto positivo sobre las variables productivas IP, CF y TCE con respecto al T0 que reportó los más bajos parámetros productivos. En relación al bienestar animal, la sobrevivencia fue del 100% en el T1 y T2, y del 8,13% para el T0. La mayor prevalencia de necrosis de las aletas, ocurrió en el T1 y T2 ocasionada por las altas densidades. Los parámetros de calidad de agua se mantuvieron dentro de los límites soportados por la especie en los T1 y T2 con respecto al T0, donde se mantuvo condiciones adversas, y por ende se presentó el mayor índice de mortalidad. Por consiguiente, los SRA representan una buena alternativa para realizar un aprovechamiento optimizado del recurso hídrico, mediante el reúso del agua y mitigar los impactos ambientales, al reducir las cargas contaminantes de los eventuales vertimientos, e incrementar la producción de trucha, gracias al diseño y mantenimiento de eficientes unidades de tratamiento utilizadas, frente al sistema de aireación convencional.

ABSTRACT

The purpose of this research was to evaluate two hydraulic detention times (HDT) in a recirculation aquaculture system (RAS) vs. the conventional aeration system and their effect over productive and animal's welfare variables of fry rainbow trout (*O. mykiss*). 3 experimental units of 125 L each were used. The RAS treatment units were: an ascending fluid biodigester (AFBD), a pre-filter and a post-filter (different granular layers), an aerobic three phase airlift fluidized bed reactor with concentric pipes (AAFBR) using zeolite as a supporting means and a UV sterilization system. The experimental unit of conventional aeration was isolated from the RAS.

A complete randomized block design (CRBD) was used. Three treatments and three blocks were handled for a 21-day period for each block. The fish with a weight of 31 ± 0.27 g and a size of 140.98 ± 0.84 mm corresponding to a stocking of 10.17 ± 0.09 kg/m³ were raised. It is also important to mention that T0: without water exchange, T1: TRH=1 h y T2: TRH=0.5 h were the evaluated treatments and weight gain, (WG), specific growth rate (SGR), final stocking (FS), survival percentage (%) and dorsal, pectoral and caudal fins necrosis were the evaluated variables. The following physicochemical parameters were also determined: dissolved oxygen (mg/l), temperature (°C), pH and conductivity (μ S/cm), ammonium, total ammonia nitrogen, nitrites, nitrates (mg/L), alkalinity (CaCO₃ mg/L), BOD₅, COD and suspended, dissolved and total solids (mg/l).

It was possible to demonstrate the lack of meaningful differences between the HDT (T1 and T2), which had a positive effect over the WG, FS, and SGR productive variables in relation to the T0 which showed the lowest productive parameters. In relation to animal welfare, there was a 100% surviving rate in T1 and T2, and an 8.13% for T0. The greatest fins necrosis prevalence caused by high densities was found in T1 and T2. The water quality parameters were kept within the limits for T1 and T2 in relation to T0 which maintained the adverse conditions, leading to the highest index of mortality. Therefore, the RAS represent a good alternative to carry out an optimized use of hydric resources through water reuse in order to mitigate environmental impacts by reducing the pollutant loads from eventual dumping and increasing the trout production thanks to the design, maintenance and use of efficient treatment units vs. the conventional aeration systems.

1. INTRODUCCIÓN

Según la FAO¹, la acuicultura desempeña un papel fundamental para la llamada seguridad alimentaria mundial, y proporciona más del 15% del suministro total de proteínas animales, debido a que los productos acuáticos poseen un alto valor nutricional por sus contenidos proteínico y mineral, además de ser altamente digestibles, características por las cuales, también pueden ser incluidos dentro del grupo de alimentos para el hombre moderno. “Actualmente el 50% del pescado consumido en el mundo es producido por la acuicultura”². Así mismo, la actividad se perfila como la alternativa más viable frente a la fuerte disminución en las pesquerías en los últimos años. Según la FAO³, la acuicultura ha tenido un crecimiento anual de 8,9% desde 1970. Este valor genera una idea de las dimensiones que tiene esta actividad en el sector productivo, por ello, es necesario interesarse en el posible impacto ambiental ocasionado por las prácticas acuícolas en este medio de vital importancia tanto para cultivo como para consumo.

Es una prioridad la preservación de los recursos naturales; el agua como elemento esencial para la vida ha sido la temática central de numerosos encuentros en pro de su preservación. De hecho, es uno de los derechos fundamentales de la humanidad dado que es indispensable para la supervivencia, el bienestar, la salud, la producción de alimentos y para todas las actividades económicas, además de ser reconocida su importancia en la preservación del medio ambiente.

La acuicultura actualmente se enfrenta a un problema potencial de reducción en cuanto a su cantidad y calidad se refiere, para el primer caso, dicha agua es insuficiente e inadecuada para abastecer los diferentes tipos de cultivos, y para el segundo caso, el deterioro de la calidad del líquido de las fuentes naturales es cada vez mayor debido a los numerosos sucesos de polución. Según Timmons *et al.*⁴, los sistemas de recirculación ofrecen la oportunidad de tener control de las características físicas, químicas y microbiológicas de la calidad del agua, y es la única fuente hacia el futuro para el cultivo de peces. La rentabilidad se vuelve atractiva si se optimiza el uso del espacio (altas densidades) para dividir los costos de inversión; lo anterior genera como consecuencia factores de estrés, que se

¹ FAO. El estado mundial de la pesca y la acuicultura. En: Parte 1. Examen mundial de la pesca y la acuicultura. 2002. p.22. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/005/y7300s/y7300s00.htm>

² FAO. El estado de la inseguridad alimentaria en el mundo, La erradicación de hambre en el mundo: evaluación de la situación 10 años después de la cumbre mundial de la alimentación. Depósitos de documentos de la FAO. 2006.

³ FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture. Rome, Italy 2004. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/007/y5600e/y5600e00.htm>.

⁴ TIMMONS, M; EBELING, J; WHEATON, F; SUMMERFELT, S y VINCI, B. Sistemas de recirculación para la acuicultura. Santiago: Fundación Chile. 2002. p. 207.

observarán en el potencial productivo (gasto energético, mala conversión alimenticia, disminución de la ingesta de alimento, bajos índices productivos y aumento de la susceptibilidad a enfermedades de la especie cultivada). La acuicultura, al igual que cualquier actividad humana, no está exenta de generar impactos ambientales negativos en el sitio donde se practica, ello ha conllevado a que las acciones por convertir esta práctica en una alternativa amigable para el medio ambiente se incrementen, teniendo en cuenta que en algunos mercados internacionales, esto se ha convertido en una exigencia.

La realización de investigaciones en sistemas de recirculación acuícola (SRA) pretenden desarrollar conocimientos aplicables a escala productiva, debido a que la acuicultura debe contribuir benéficamente con el medio ambiente. No obstante, dichas técnicas de producción intensivas y superintensivas ocasionan alta carga contaminante, por lo que es necesario aplicar tecnologías limpias, y que no generen impactos negativos en los recursos naturales.

Se hace necesario optimizar el proceso de producción acuícola, mediante dos objetivos: por una parte, intensificar la producción para aumentar la rentabilidad y por otra, implementar SRA que minimicen el gasto excesivo de agua y disminuyan la contaminación. Para lograrlo, es necesario desarrollar tecnologías cada vez más eficientes de tratamiento de las aguas residuales generadas en el SRA, de forma que los contaminantes se inactiven, eliminen o reduzcan hasta valores tolerables para la especie cultivada y así minimizar la necesidad de incorporación de agua fresca en el sistema. En la presente investigación se utilizó un sistema de tratamiento dentro de un SRA que estuvo compuesto por sistemas de pre y post filtración y dos biorreactores: uno aerobio de lecho fluidizado trifásico de tubos concéntricos (RALFTCC) con medio de soporte a base de zeolita y el otro un digestor anóxico de flujo ascendente (DAFA). El propósito fue evaluar las variables productivas y el bienestar de ejemplares de trucha arcoíris.

2. OBJETIVOS

5.4.OBJETIVO GENERAL

Evaluar dos tiempos de retención hidráulica en un sistema de recirculación vs aireación convencional y su efecto en las variables productivas y el bienestar de ejemplares de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*).

5.5.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Calcular las diferentes variables productivas, incremento de peso, tasa de crecimiento específico y carga final alcanzada.
- Determinar el bienestar de los ejemplares mediante sobrevivencia y análisis macroscópicos de las aletas.
- Realizar monitoreo de calidad de aguas.

3. MARCO REFERENCIAL

5.6.REQUERIMIENTOS DE CALIDAD DE AGUA EN EL CULTIVO DE TRUCHA ARCOÍRIS BAJO CONDICIONES CONTROLADAS

La trucha arcoíris se desarrolla eficazmente en condiciones controladas bajo las siguientes características (Tabla 1).

Tabla 1. Parámetros de calidad de agua para trucha arcoíris (*O. mykiss*) bajo condiciones controladas

Parámetro	Rango óptimo
Temperatura (°C)	9 – 18
Oxígeno disuelto (mg/L)	> 5,5
pH	6 – 9,5
Conductividad (µS/cm)	20 – 500
Alcalinidad (HCO ₃). (mg/L)	8 – 400
Calcio (mg/L)	60 – 200
Sulfatos (SO ₄) (mg/L)	0 – 50
Nitratos (NO ₃) (mg/L)	0 – 11
Nitritos (NO ₂) (mg/L)	0 – 0,001
Amoniaco (NH ₄ ⁺) (mg/L)	0 – 0,001
Amonio (NH ₃)	< 1
Fósforo (mg/L)	< 3
Cloruros (Cl ⁻) (mg/L)	< 20
Materia en suspensión (mg/L)	< 30
DBO ₅	<5
Anhídrido carbónico (CO ₂)	< 20
Carbono orgánico total (mg/L)	<7,9
Carbono orgánico disuelto (mg/L)	6,93
Color aparente (Pt-Co unidades)	32

Fuente: Timmons *et al.*, (2002), Blanco., (1995), Davidson *et al.*, (2009). y Davidson *et al.* (2011).

5.7.SISTEMAS DE RECIRCULACIÓN ACUÍCOLA.

Según Timmons *et al*⁵, en los sistemas de recirculación el agua circula a través del SRA con poco intercambio con fuentes externas al mismo, dentro del sistema el agua se impulsa mediante bombas, permitiendo un control de los parámetros ambientales y la temperatura del agua, considerada como un parámetro crítico para la mayoría de los organismos poiquiloterms, puede ser controlada más económicamente debido a que se limita el intercambio de calor con el medio, pues los requerimientos energéticos de un sistema cerrado, son menores que los de un sistema abierto. Esta tecnología permite el cultivo de peces con mayor intensidad en un ambiente totalmente controlado.

De acuerdo con Parada⁶, es importante recircular el agua con el fin de: controlar la escasez de agua disponible y de calidad variable, evitar temperaturas no apropiadas, disminuir el riesgo sanitario en la naturaleza, ahorrar energía, y controlar la producción y las emisiones.

García-Criollo *et al*⁷, comprobaron que los sistemas de recirculación disminuyen los efectos negativos sobre el medio ambiente, regulan el consumo de agua, proporcionan mayores índices de crecimiento que en la naturaleza o en sistemas de agua corriente, se mantiene un clima controlado, se manejan mejores condiciones de trabajo, lo cual generará un suministro constante del mercado con productos de alta calidad.

Según los mismos autores, los parámetros a tener en cuenta para un buen sistema de recirculación acuícola están dados por un buen manejo de la unidad de tratamiento (purificación) de agua bien diseñada y correcta disposición para el transporte del líquido, una auto limpieza de los depósitos de los peces para un óptimo flujo del agua y un adecuado suministro de aire.

⁵ TIMMONS M., *et al.*, Op. cit., p. 6 – 15.

⁶ PARADA, G. Sistemas de recirculación para acuicultura, Instalaciones acuícolas. Fundación Chile. 2004. p. 1- 65. En: Revista electrónica de Ingeniería en Producción Acuícola. Año I. Vol. I del 2004. Disponible en: http://akane.udenar.edu.co/siweb/acuicola/revista/m_cnf1.html.

⁷ GARCÍA-CRIOLLO, R., GÓMEZ-CERÓN, A., SÁNCHEZ-ORTÍZ, I., SALAZAR-CANO, R., SANGUINO-ORTÍZ, W. Evaluación de un sistema de recirculación de agua para el levante de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) en el laboratorio de organismos vivos y productividad primaria del Programa de Ingeniería en Producción Acuícola de la Universidad de Nariño. En: Revista electrónica de Ingeniería en Producción Acuícola. Año IV. Vol. 4 del 2009. p. 2- 4.

5.8. TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE AGUAS

Timmons *et al*⁸, aseguran que para el apropiado funcionamiento de un sistema de recirculación acuícola, éste debe disponer de un sistema de tratamiento de las aguas residuales para su posterior reutilización; por su origen las aguas residuales presentan en su composición diferentes elementos que se pueden resumir como: componentes suspendidos, tanto gruesos, finos y componentes disueltos (inorgánicos y orgánicos).

Pedreira⁹, menciona que en un sistema de recirculación, se utilizan los biofiltros para reducir las concentraciones de amoníaco a través de la oxidación a nitrato por acción de las bacterias nitrificantes. “Se utilizan los biofiltros con el fin de minimizar la eutrofización del tanque de cultivo, y tiene que ver con la eliminación de materia orgánica e inorgánica principalmente en relación con el nitrógeno, además mantener la calidad del agua”¹⁰.

Arredondo *et al*¹¹, afirman que un sistema cerrado requiere de un periodo de estabilización previo a la introducción de organismos, una vez alcanzado el sistema operativo aceptable se espera un cambio en el comportamiento de las variables abióticas cuando se introducen los organismos, se realizan recambios de agua y en ocasiones que se efectúa el recambio o lavado de filtros, altera el comportamiento de los compuestos nitrogenados y el pH del sistema.

La contaminación proviene de los peces y el alimento no consumido, la cantidad de desechos producidos son diferentes, están en función de la temperatura del agua, debido a que los peces aumentan su metabolismo cuando esta incrementa, por ejemplo, el amoníaco es de 2 a 3% de la alimentación por día¹².

⁸ TIMMONS, M., *et al.*, Op. cit., p. 19 – 47.

⁹ PEDREIRA, M., KENNEDY, R, DOS SANTOS, E., SAMPAIO, J., VIERA, E. y SÁ FORTES, R. Biofiltração da água e tipos de substrato na larvicultura do pacamã. *En: Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v.44, n.5, mayo 2009 p. 511-518. Disponible en: <http://www.scielo.br/pdf/pab/v44n5/v44n5a11.pdf>.

¹⁰ SIPAÚBA-TAVARES H. Qualidade da água em aquicultura. Centro de Aquicultura, Laboratório de Limnologia e Produção e Plâncton (LLPP), Jaboticabal, UNESP. p. 3. *En: Revista electrónica de Ingeniería en Producción Acuícola*. ISSN 1909 – 8138, Año 1, Vol. I del 2004. Disponible en: http://akane.udenar.edu.co/siweb/acuicola/revista/m_cnf1.html

¹¹ ARREDONDO, L., VALDIVIA, H., HERNÁNDEZ, L. y CAMPOS, R. Evaluación del crecimiento, factor de conversión de alimento y calidad del agua del cultivo de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) en un sistema cerrado. *Hidrobiológica* 6 (1-2). Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa. D.F. México. 1996 p. 59 – 65.

¹² WHEATON, F. Recirculating Aquaculture Systems: An Overview of Waste Management. Department of Biological Resources Engineering. University of Maryland. p. 57- 68.

3.1.1. Biofiltración. De acuerdo con Wheaton¹³, para el área ambiental de la acuicultura, el nitrógeno es de central preocupación como componente de los residuos generados en la crianza de peces. En particular, los peces excretan varios productos nitrogenados residuales por difusión e intercambio iónico a través de las branquias, orina y heces. “La descomposición de estos compuestos nitrogenados es especialmente importante en sistemas de recirculación de acuicultura debido a la toxicidad del amoníaco, nitrito y en algún grado el nitrato”¹⁴.

El proceso de la remoción de nitrógeno amoniacal en un filtro biológico se denomina nitrificación, y consiste en la sucesiva oxidación del amoníaco primero a nitrito y finalmente a nitrato. También existe un proceso de reducción anaeróbica de nitrato a nitrógeno molecular gaseoso denominado desnitrificación. El nitrógeno amoniacal puede estar presente de las siguientes formas en el agua: NH_4^+ forma ionizada (no tóxica) o NH_3 , forma no ionizada, la cual es tóxica.

Por su parte Galli-Merino y Miguel-Sal¹⁵, afirman que la filtración biológica puede ser una medida efectiva para controlar el amoníaco; en comparación con el recambio del agua para controlar sus niveles. Existen dos tipos de bacterias las que colectivamente ejecutan la nitrificación. Estas son generalmente catalogadas como bacterias quimioautótrofas, ya que obtienen la energía de la oxidación de compuestos inorgánicos a diferencia de las bacterias heterótrofas que obtienen energía oxidando compuestos orgánicos. Las bacterias de oxidación del amoníaco obtienen su energía oxidando amoníaco no ionizado a nitrito como: **Nitrosomonas**, *Nitrosococcus*, *Nitrospira*, *Nitrosolobus* y *Nitrosovibrio*. Las bacterias de oxidación del nitrito al nitrato son: **Nitrobacter**, *Nitrococcus*, *Nitrospira* y *Nitrospina*. Las bacterias nitrificantes son principalmente autotróficas obligadas, que consumen dióxido de carbono, y aeróbicas obligadas, que requieren oxígeno para desarrollarse. Las bacterias heterotróficas crecen significativamente más rápido que las bacterias nitrificantes y prevalecen sobre estas compitiendo por espacio y oxígeno en los biofiltros, cuando las concentraciones de materia orgánica disuelta y particulada son altas. Por ese motivo, es imperativo que la fuente de agua para los biofiltros se mantenga tan limpia como sea posible con la mínima concentración de sólidos totales.

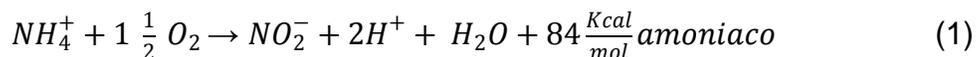
¹³ WHEATON, F. Acuicultura “Diseño y construcción de sistemas”. Ed AGT editor, SA. DF México 1993. p. 460-675.

¹⁴ GUTIERREZ, M. y MALONE, R. Biological filters in aquaculture: Trends and research directions for freshwater and marine applications. 2006 p. 163–171 En: Aquacultural Engineering. Disponible en: <http://sciencedirect.com> o <http://www.elsevier.com/locate/aqua-online>.

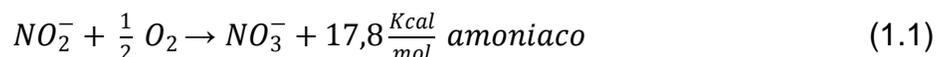
¹⁵ GALLI-MERINO, O. y MIGUEL-SAL, O.; Sistemas de Recirculación y Tratamiento de agua (SENEDAC); Argentina-Santa Ana; 2007. p. 18- 20. Disponible en: <http://www.minagri.gob.ar>

Pereira y Mercante¹⁶, afirman que en la transformación de amonio a nitrato (nitrificación) participan dos tipos de bacterias:

Nitrosomonas: el amoniaco es transformado a nitritos.

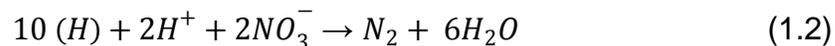


Nitrobacter: que oxidan nitrito a nitrato.



Según los mismos autores, en la formación de nitrato existen dos variantes:

En primer lugar la desnitrificación, que consiste en la reducción de nitrato a nitrógeno molecular:



Amonificación de nitrato, aparece en la reducción de nitrato a amonio



La desnitrificación se produce principalmente en condiciones anaerobias, en los ecosistemas acuáticos el lugar principal de su presencia son los sedimentos, donde no existe oxígeno disponible. La concentración de las formas de nitrógeno amoniacal depende del pH, es así que “si el valor es menor a 8,5 predomina el NH_4^+ , mientras que cuando el pH se encuentra por encima de 10, prevalece el NH_3 ·(agua es alcalina)”¹⁷.

3.1.2.Nitrificación. Pereira y Mercante¹⁸, sostienen que el amoniaco es el principal producto final del catabolismo de la proteína y es excretado por los peces como amoniaco NH_3 a través de las branquias. El amoniaco, nitrito y nitrato son

¹⁶ PEREIRA, L. y MERCANTE, C. A amônia nos sistemas de criação de peixes e seus efeitos sobre a qualidade da água. uma revisão. En: Inst. Pesca, São Paulo, 31(1). 2005 p. 81 – 88.

¹⁷ Ibid., p. 81 – 88.

¹⁸ Ibid., p. 81 -88

todos altamente solubles en agua. El amoníaco existe en dos formas: ionizado y no ionizado, la suma de las dos formas se denomina nitrógeno amoniacal total (NAT). Un aumento del pH o la temperatura aumenta la proporción de la forma no ionizada del NAT. Para exposiciones de largo plazo, las concentraciones permisibles de NH_3 dependen de la especie y de la temperatura del agua del cultivo.

El nitrito es un producto intermedio en el proceso de nitrificación del amoníaco a nitrato, a pesar que es usualmente convertido en nitrato tan pronto como se produce, la falta de oxidación biológica del nitrito resultará en niveles elevados de este que pueden ser tóxicos para los peces; debe ser constantemente monitoreado ya que las altas concentraciones podrían indicar una inminente falla del biofiltro.

El nitrato es el producto final de la nitrificación y es el menos tóxico de los compuestos. En sistemas de recirculación, los niveles de este son corrientemente controlados por recambios diarios de agua. En sistemas con bajo recambio o altas tasas de retención hidráulica, la desnitrificación se ha tornado cada vez más en una medida importante de control.

La velocidad de la nitrificación se ve afectada por los siguientes factores:

• **Potencial de hidrógeno (pH).** Según Galli y Miguel¹⁹, este afecta tanto la velocidad de nitrificación como la relación entre las formas de nitrógeno amoniacal ionizado y no ionizado. Los resultados más recientes sugieren que el rango óptimo es de un pH desde 7,2 a 7,8. Los cambios rápidos en el pH también tienen efectos sobre el comportamiento de los biofiltros, si estos son de más de 0,5 a 1 unidades de pH en un minuto las poblaciones bacterianas del filtro se estresarán y requerirán un tiempo para la adaptación a las nuevas condiciones ambientales.

• **Alcalinidad.** De acuerdo con Guerdat²⁰, es una medida de la capacidad de amortiguación de pH (tampón o buffer) de un sistema acuático. Y argumenta que para cada gramo de nitrógeno amoniacal reducido a nitrógeno de nitrato, se

¹⁹ GALLI-MERINO, y MIGUEL-SAL., Op. cit., p. 22.

²⁰ GUERDAT, C. A Large Scale Evaluation of Commercially Available Biological Filters for Recirculating Aquaculture Systems, A thesis submitted to the Graduate Faculty of North Carolina State University In partial fulfillment of the Requirements for the degree of Master of Science. Raleigh, North Carolina. 2008. p. 18 – 19. Disponible en: <http://www.repository.lib.ncsu.edu/ir/bitstream/1840.16/2903/1/etd.pdf>.

consumen 7,14 gramos de alcalinidad, ésta pérdida se puede remplazar fácilmente por la adición de bicarbonato de sodio u otro suplemento de bicarbonato. La nitrificación es un proceso de formación de ácido, y si los sistemas de biofiltro están mal tamponados el pH del sistema bajará impactando el desempeño de este.

•**Temperatura.** Guedart²¹, demuestra que ésta tiene un rol significativo en la velocidad de reacción de la nitrificación como lo hace en todas las cinéticas de reacciones químicas y biológicas. En general, las tasas de reacción de la nitrificación siguen una relación que por ejemplo una disminución de 10°C en la temperatura de operación, resulta en un 50% de reducción de tasa de remoción. En la aplicación práctica, la temperatura en la cual opera un biofiltro, está normalmente determinada por los requerimientos de las especies en cultivo, y no por las necesidades de las bacterias del mismo.

•**Oxígeno.** Es un factor limitante de la tasa de nitrificación de los biofiltros debido a los bajos niveles de entrada y por la competitiva demanda de las bacterias heterotróficas. Por cada gramo de nitrógeno amoniacal oxidado a nitrógeno nítrico, se requieren 4,57 gramos de oxígeno y mencionan que probablemente niveles de 2 ppm de oxígeno en el efluente del biofiltro es adecuado para mantener a un máximo la tasa de nitrificación²².

•**Amoníaco.** Según Timmons *et al*²³, La concentración del amoníaco puede afectar directamente la tasa de nitrificación, en general la capacidad del biofiltro para oxidar nitrógeno aumenta proporcionalmente con el aumento de la concentración del amoníaco en un rango limitado de concentraciones. Se asume que la relación proporcional existe en el rango de 0 hasta al menos 3 ppm.

3.1.3. Tipos de biofiltros. De acuerdo con Timmons *et al*²⁴, los sistemas de recirculación a gran escala se han estado innovando hacia el uso de diversos tipos de biofiltros, sumergidos, percoladores, contactadores biológicos rotatorios, filtros de gránulos sintéticos y biofiltros de lecho fluidizado. Los más importantes son:

•**Biofiltros de gránulos.** El más utilizado para caudales menores que 1.000 – 2.000 L/min, son filtros de relleno expandibles que poseen un compartimiento de

²¹ Ibid. p. 19 – 21.

²² WHEATON, F. Op cit., p. 460 - 675.

²³ TIMMONS, M. Op. cit., p. 224.

²⁴ Ibid., p. 214 - 225.

bioclarificación similar a los filtros de arena. “Estos funcionan como un dispositivo físico de filtración o clarificador extrayendo los sólidos, simultáneamente ofrece un sustrato para el crecimiento de bacterias, por tanto también remueve los residuos del agua a través de biofiltración”²⁵. El agua pasa a través del lecho fijo en una dirección hacia abajo (flujo descendente) o hacia arriba (flujo ascendente), el tamaño del medio granular seleccionado está en función del caudal y las características de los residuos (aproximadamente 30 micras); estos funcionan bien en aguas claras, en caso contrario es necesario realizar mantenimientos periódicamente²⁶.

•**Biofiltro de Lecho Fluidizado.** Utiliza la degradación aeróbica de microorganismos adheridos a partículas de soporte a través del cual fluye el agua residual ya sea previamente oxigenada o conjuntamente con una corriente de aire. Este reactor tiene grandes ventajas con relación a los tratamientos convencionales, entre las que se destacan el menor tiempo de retención hidráulica y el pequeño tamaño necesario, dado que es posible lograr una alta concentración de biomasa en función de las condiciones operativas del proceso y el tipo de soporte, además de que se puede remover en el mismo reactor materia carbonácea y nitrogenada^{27 y28}.

Se emplean para caudales de 15 m³/min a 159 m³/min, 400 a 4.000 g.p.m. Su medio de soporte tiene una superficie específica muy alta, normalmente arena calibrada o gránulos de plástico muy pequeños²⁹. De acuerdo con Eding *et al*³⁰, al evaluar un material para biofiltro se debe tener en cuenta, a) determinación de la producción de residuos, por medio de balance de masas para cada especie, b) exigencias de calidad de agua, efectos crónicos de los valores medios diarios y efectos de fluctuación de calidad de agua durante un ciclo de 24 horas.

²⁵ Ibid. p. 214 – 223.

²⁶ WHEATON, F. Op. cit., p. 57- 68.

²⁷ SOUZA, R., BRESOLIN, I., BIONI, T., GIMENES, M., y DIAS-FILHO, B. The performance of a three-phase fluidized bed reactor in treatment of wastewater with high organic load. En: Revista Brasileña de Ingeniería Química. No. 02. Vol. 21. Junio 2004. p. 219 – 227. Disponible en: <http://www.scielo.br/pdf/bjce/v21n2/a11v21n2.pdf>

²⁸ SÁNCHEZ, I., TEIXEIRA, G., SANTOS DE ARAÚJO, L., GEBARA, D., DALL’AGLIO, M., y MATSUMOTO, T. Reactores aeróbicos de lecho fluidizado trifásico con circulación interna: caracterización hidrodinámica y del soporte. En: Revista Facultad de Ingeniería – Universidad de Antioquia N.º 56. Diciembre, 2010. p. 68-77. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/rfiua/n56/n56a07.pdf>

²⁹ TIMMONS, *et al.* Op. cit., p. 223 – 225.

³⁰ EDING, E.H., KAMSTRA, A., VERRETH, J., HUISMAN, E. y KLAPWIJK A. Design and operation of nitrifying trickling filters in recirculating aquaculture: A review. *Aquacultural Engineering* 34 2006 p. 234 –260. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/aqua-online>.

Timmons *et al*³¹, recomiendan que en el diseño de sistemas de biofiltración se deben tener en cuenta las siguientes características:

- **Espacio vacío.** Es el volumen no ocupado por el medio del biofiltro y fracción de hueco, es aquel volumen dividido por el volumen total del biofiltro.

- **Área de corte transversal.** Se refiere al área del lecho del filtro que mira en dirección del flujo de agua.

- **Tasa de carga hidráulica.** Volumen de agua bombeada a través del biofiltro por unidad de área de corte transversal del filtro por unidad de tiempo.

- **Área específica de superficie.** Es la superficie del medio de soporte por unidad volumétrica.

5.9.VARIABLES PRODUCTIVAS

3.4.1. Crecimiento. Timmons *et al*³², establecen que en un cultivo de peces la tasa de crecimiento define la cantidad de alimento a suministrar, basándose en el método de unidades térmicas para generar una tasa de crecimiento unitaria, ejemplo pulgadas al mes.

$$\text{Crecimiento} = \frac{T - T_{base}}{UT_{base}} = \frac{plg}{mes} \quad (2)$$

Los términos T_{base} ($32^{\circ}F$) y UT_{base} ($28^{\circ}F$) están determinados sobre la base de observaciones históricas y análisis de registros de cultivo, en producciones de trucha, a una temperatura máxima de T_{max} ($72^{\circ}F$).

• **Cálculo de alimento.** Es la cantidad de alimento que es suministrado a una determinada cantidad de peces, está en función de la temperatura del agua y crecimiento del ejemplar³³.

³¹ TIMMONS, *et al*. Op. cit., p. 214-216.

³² *Ibid.*, p. 214 – 223.

³³ *Ibid.*, p. 103-106.

•**Factor de condición (FC).** El peso de los peces puede ser relacionado matemáticamente con su longitud usando un término llamado factor de condición (FC); mientras más grande el FC, habrá más peso por unidad de longitud. Cada especie de pez tiene un valor asociado a FC para describir su condición corporal normal o esperada, esta es una buena herramienta para calibrar protocolos de alimentación³⁴.

$$WT \text{ (libras)} = FCx \frac{(L \text{ pul})^3}{10^6} \quad (3)$$

Los mismos autores establecen factores de condición para trucha 400, tilapia 760 y para perca 490.

5.10.FACTORES QUE AFECTAN LA PRODUCCIÓN

El CEDEP y ANTAMINA³⁵., describen los siguientes factores asociados a:

3.1.4.Factores que afectan al pez: Comportamiento del animal según estadio biológico, requerimiento nutricional, exigencia medio ambiental, tasa de crecimiento, asimilación de alimento, historial sanitario, factor de condición, canibalismo, captación de oxígeno, generación de sólidos fecales, stress, adaptación a elevadas densidades de carga, entre otros.

3.1.5.Factores que afectan al agua: Oxígeno disuelto, nitrito, nitratos, alcalinidad total, pH, caudal, amonio, sólidos suspendidos, sedimentables, temperatura, transparencia, contaminantes, DBO, viscosidad.

3.1.6.Factores que afectan al confinamiento: Volumen de agua, velocidad de agua, profundidad del estanque, recambio de agua, diseño de salidas, forma del estanque, entre otros.

³⁴ Ibid., p. 104.

³⁵CENTRO DE ESTUDIOS PARA EL DESARROLLO Y LA PARTICIPACIÓN (CEDEP). y ANTAMINA. Manual de Crianza de la Trucha (*Oncorhynchus mykiss*), Municipalidad distrital Ragash. Perú, 2009. p.1 -25. Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/45639651/Manual-Crianza-de-Truchas>.

3.1.7. Factores que afectan la nutrición: Tasa de alimentación, forma de alimentación, calidad nutricional del alimento, almacenamiento de alimento, entre otros.

3.1.8. Factores que afectan al manejo: Técnicas y frecuencia de muestreos, alimentación, densidad de carga, mantenimiento y limpieza de los estanques, clasificación de tallas, manipulación de reproductores, planificación de la producción, entre otros.

5.11. ENFERMEDADES EN PECES

El estado de enfermedad se traduce en los peces, por la aparición de anomalías en el comportamiento (síntomas) y/o de la integridad corporal (lesiones), lo que supone un descenso de los rendimientos y, a menudo, la muerte de los sujetos afectados³⁶. Estas manifestaciones son debidas a las siguientes causas:

3.1.9. Causas físicas. Están constituidas por propiedades físicas del agua como temperatura, contenido de materias en suspensión, y también se incluyen las agresiones que resultan de la actividad de los animales y las prácticas piscícolas. Además la temperatura hará variar la toxicidad de numerosos contaminantes, su transformación en su forma tóxica (caso del amoníaco), o bien facilitando su absorción branquial por elevación del ritmo respiratorio³⁷.

3.1.10. Estrés. Según Padrós³⁸, el estrés que sufren los peces durante un trabajo rutinario, como un movimiento brusco o a la hora del transporte, muchas veces va a desencadenar un problema patológico debido a la inmunodepresión consecuente; es importante destacar que cuanto más severa es una situación estresante, más tardarán los peces en recuperarse (de 1 a 3 semanas); durante todo ese periodo la población será más susceptible de padecer infecciones y enfermedades.

³⁶ KINKELIN, P., MICHEL, C., y GHITTINO, P. Tratado de las enfermedades de los peces, Ed. Acribia S.A. Zaragoza – España 1991. p. 1.

³⁷ *Ibíd.*, p. 3 – 5.

³⁸ PADRÓS, F. Manual de técnicas básicas de diagnóstico patológico en peces. V Curso de Ictiopatología Práctica para Piscicultores Situación Sanitaria Actual del Cultivo de la Dorada y Lubina. Universidad Autónoma de Barcelona. España 2005. p. 29-30.

De acuerdo con Craven *et al*³⁹, las posibles fuentes de estrés ocasionadas en las distintas explotaciones acuícolas, pueden ser muchas y variadas, el efecto se amplifica a medida que el factor de estrés es de origen antropogénico y el pez es incapaz de escapar a dicho factor. Aunque los factores de estrés en una instalación acuícola son inevitables, como lo son los ruidos que pueden catalogarse como agudos (transitorio) y crónico (continuo); los sistemas de cultivo producen ruido de múltiples fuentes, pueden ser continuas, como el sonido producido por las motobombas y aireadores, y los sonidos que se originan en las actividades del personal de la instalación como lo reportan Wysocki *et al*⁴⁰.

3.1.11.Causas químicas. Son principalmente las propiedades y composición del agua (pH, alcalinidad, contenido de gases disueltos, en materias nitrogenadas, en toxinas segregadas por algas o en diversos contaminantes tales como cloruros sulfatos, mercurio, ácidos, clorofenoles, detergentes, hidrocarburos, entre otros)⁴¹. La presencia de amoníaco en el agua está asociada a la presencia de nitritos debido a procesos de nitrificación bacterianos realizados a partir del amoníaco, el nitrito así como el amoníaco incrementa la susceptibilidad de los peces ante eventos de hipoxia, debido a la oxidación de la hemoglobina a metahemoglobina y al inducir daños estructurales de los eritrocitos⁴².

Auro y Ocampo⁴³, afirman que muchos investigadores han demostrado que la toxicidad está determinada por la cantidad de amonio no ionizado (NH₃, NH₄OH) en solución en el agua, más que por la forma ionizada (NH₄⁺), y que el grado de disociación está controlado primeramente por el pH y la temperatura del agua, con lo anterior se presenta una constante hiperplasia del epitelio branquial, así como cambios degenerativos y hemorragia en hígado cuando se expone a los peces a estrés crónico por amonio.

³⁹ CRAVEN, A., CARTON A., McPHERSON C., McPHERSON G. Determining and quantifying components of an aquaculture soundscape. *Aquacultural Engineering* 41. 2009. p. 158–165. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/aqua-online>.

⁴⁰ WYSOCKI, L., DAVIDSON, J., SMITH, M., FRANKEL, A., ELLISON, T., MAZIK, P., POPPER, A. y BEBAK, J. Effects of aquaculture production noise on hearing, growth, and disease resistance of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*. *En: Aquaculture* 272 2007 p.687–697. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/aqua-online>.

⁴¹ KINKELIN, *et al.*, Op. cit., p.3.

⁴² ESLAVA-MOCHA, P. Una aproximación sistemática a los peces dulceacuícolas de Colombia. p. 21. En: XIV Jornada de Acuicultura. Jornada internacional de Sanidad y producción de peces. Universidad de los Llanos, instituto de acuicultura. Villavicencio octubre 10 del 2008. p.59 Disponible en: <http://www.patobiologiveterinaria.unal.edu.co/html/publicaciones.html>

⁴³ AURO, A y OCAMPO, L. Diagnóstico del Estrés en Peces; Departamento de Especies Productivas no Tradicionales: Peces, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Nacional Autónoma de México, D.F., 30(4) 1999. p. 337-344.

David-Rúales y Vásquez-Torres⁴⁴, aseguran que las concentraciones de amonio en el medio se pueden incrementar por la degradación de materia orgánica presente en los sedimentos y puede ser especialmente pronunciada cuando la nitrificación es impedida como resultado de bajas concentraciones de oxígeno. Otras condiciones que se suman a este aumento son las altas densidades de siembra y las actividades del hombre en sus procesos agroindustriales. Estas concentraciones elevadas y/o crónicas de amonio causan daños en el epitelio branquial (hiperplasia, fusión lamelar, hipertrofia, necrosis y descamación), interfiriendo en los procesos de intercambio gaseoso, regulación iónica y regulación ácido-base, lo que conlleva a desbalances en la homeostasis, generando episodios de estrés que pueden conducir a la muerte.

3.1.12.Causas biológicas. Representado por lo bioagresores (virus, bacterias y parásitos), la fisiología de estos está condicionada por factores físicos y químicos del medio ambiente. Las enfermedades más comunes en la trucha arcoiris (*O. mykiss*) cultivadas en sistemas de recirculación son las causadas por bacterias (enfermedad bacteriana de las branquias, forunculosis, enfermedad bacteriana renal, putrefacción de la aleta), parásitos (*Gyrodactylus*, *Chilodonella*, *Trichodina*, *Epistylis*, *Trichophrya*, *Ichthyophthirius*, *Ichtyobodo*), hongos (*Saprolegnia*) y virus (necrosis pancreática infecciosa, septicemia hemorrágica viral)⁴⁵.

5.12.MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DEL BIENESTAR DE LOS PECES

3.1.13.Histopatología. La histopatología permite visualizar en secciones de tejido las lesiones ocasionadas en los diferentes procesos patológicos y a partir de la visualización de un tipo u otro de lesión, determinar su naturaleza. Good *et al*⁴⁶. y Noble *et al*⁴⁷., demostraron que en sistemas de recirculación acuícola, los mayores problemas en el bienestar de los peces se presentan cuando son cultivados bajo condiciones de altas densidades de siembra y mínimos recambios de agua, generando condiciones de estrés tales como una mala calidad del agua,

⁴⁴ DAVID-RÚALES, C. y VÁSQUEZ-TORRES, W. Transporte iónico en el epitelio branquial de peces de agua dulce En: Revista Lasallista de Investigación, Corporación Universitaria Lasallista – Colombia. vol. 7, núm. 1, 2010, p. 9 -10. Disponible en: <http://www.redalyc.uaemex.mx>

⁴⁵ NOBLE, C. y SUMMERFELT, S. Diseases encountered in rainbow trout cultured in recirculating systems. Elsevier Science Ltd. Annual Review of Fish Diseases, Vol. 6. 1996. p. 65-92. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/aqua-online>

⁴⁶ GOOD, C., DAVIDSON, J., WELSH, C., BRAZIL, B., SNKVIK, K. y SUMMERFELT, S. The impact of water exchange rate on the health and performance of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* in water recirculation aquaculture systems. En: Aquaculture 294 2009 p. 80–85. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/aqua-online>

⁴⁷ NOBLE, C. y SUMMERFELT, S. Op. cit., p.65 – 92.

conllevando a brotes de enfermedades, afectando principalmente órganos como riñón, hígado, branquias, piel, aleta caudal y dorsal.

Schlotfeldt⁴⁸, encontró diferentes grados de patología en las branquias de la trucha arcoíris cultivado en SRA en el norte de Alemania. El daño de las branquias ocurre principalmente desde la inflamación (debido a la irritación química con posteriores infecciones bacterianas secundarias), a diferentes grados de hiperplasia y, finalmente necrosis de las branquias.

3.1.14.Estado de las aletas. Pelis y McCormick⁴⁹, aseguran que el problema de la necrosis de las aletas es tan complejo que a menudo se utiliza como un indicador del bienestar y calidad de vida de los peces, la aleta dorsal y pectoral son más sensibles a la degeneración debido a las interacciones con superficies abrasivas y mediante el contacto con agentes patógenos; son muchos los factores implicados causantes de la necrosis de las aletas entre ellos: hacinamiento, calidad del agua, temperatura, tipo de alimentación, infección bacteriana, manipulación, exposición excesiva a luz solar y contaminantes ambientales.

Se trata de un método directo, utilizando los peces anestesiados para cuantificar el bienestar animal y posiblemente general en menos de un minuto; no se necesita ningún equipo especial⁵⁰. La evaluación del bienestar de los animales, por el método de observación (cualitativo) de la necrosis de las aletas, es un método no invasivo, económico, que está siendo utilizado “actualmente en el campo para evaluar los daños en las aletas de los peces en diversas etapas de la producción en el Reino Unido como parte de dos DEFRA (Departamento de Medio Ambiente, Alimentación y Asuntos Rurales) de proyectos productivos”⁵¹.

⁴⁸ SCHLOTTFELDT, H. Some clinical findings of a several years survey of intensive aquaculture systems in northern Germany, with special emphasis on gill pathology and nephrocalcinosis. En: Aquaculture in heated effluents and recirculation systems, Vol. 2. Heenemann Verlagsgesellschaft, Berlín, Germany. 1981. p. 110-119.

⁴⁹ PELIS, R. y McCORMICK, S. Fin development in stream- and hatchery reared Atlantic salmon. En: Aquaculture. 2003 p. 525 – 536. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/aqua-online> o <http://www.sciencedirect.com>.

⁵⁰ PERSON-LE RUYET, J., LE BAYON, N. y GROS Sylvie. How to assess fin damage in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. En: Aquat. Living Resources. 20. 2007 p.191 – 195. Disponible en: <http://www.alr-journal.org>.

⁵¹ HOYLE, I., OIDTMANN, B., ELLIS, T., TURNBULL, J., NORTH, B., NIKOLAIDIS, J. Y KNOWLES, T. A validated macroscopic key to assess fin damage in farmed rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). En: Aquaculture 270. 2007 p. 142–148 Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/aqua-online>.

De acuerdo con lo expuesto por Roque d'orbcastel *et al*⁵²., la aleta caudal puede ser utilizada como referencia para determinar el índice de mercado en los siguientes grupos:

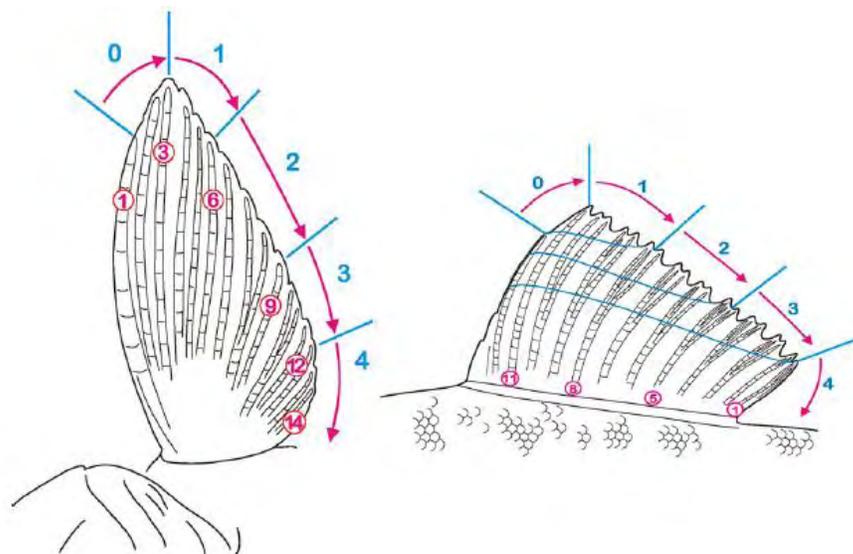
A) Ningún cambio marcado, en el perfil de comparación con una aleta caudal perfecta.

B) Necrosis moderada, con un cambio en general del perfil (rayos externos aleta erosionado).

C) Necrosis importante con sangrado o inflamación de las extremidades (no negociables como pescado entero).

Las aletas pectorales y dorsal se evalúan a través de 5 niveles de necrosis (Figura 1). El nivel 0 es el nivel perfecto y el 4 cuando todos los radios se han necrosado⁵³.

Figura 1. Niveles de necrosis de la aleta pectoral y dorsal.



Fuente. Person-Le Ruyet *et al.* (2007)

⁵² ROQUE D'ORBCASTEL E, PERSON-LE RUYET J, LE BAYON N y BLANCHETON J. Comparative growth and welfare in rainbow trout reared in recirculating and flow through rearing systems. *Aquacultural Engineering* 40 2009 p. 79–86. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/aqua-online>

⁵³ *Ibid.*, p.79-86.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. LOCALIZACIÓN

El montaje del sistema de recirculación acuícola se realizó en las instalaciones del laboratorio de hidráulica ubicado en el Campus Alvernia de la Universidad Mariana, a 3 kilómetros del Hospital San Pedro en la vía Pasto – Mapachico, cuyas coordenadas geográficas son 1°12'11,7" Norte y 77°17'51,1" Oeste, su ubicación altitudinal es de 2668 msnm. El lugar cuenta con el área necesaria y suficiente para cumplir con el perfil hidráulico del sistema, también con los servicios de agua, energía y un sistema con tubería de aire comprimido.

4.2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA DE RECIRCULACIÓN ACUÍCOLA (SRA)

El SRA estuvo constituido por tres tanques plásticos de cultivo de 250 L, con un volumen neto de 125 L, y cuyas salidas de agua fueron tratadas diferencialmente. El agua residual contenida en la superficie del tanque (aproximadamente el 85% del total del caudal efluente de la unidad de cultivo) pasó a una unidad de tratamiento primario constituida por un filtro granular (medio granular seleccionado) de flujo ascendente, para luego ingresar a una unidad de tratamiento biológico constituida por un reactor aerobio de lecho fluidizado trifásico con circulación con tubos concéntricos (RALFTCC) con zeolita como medio soporte de zeolita granular que contó con una cámara de sedimentación en la zona de salida del efluente. La fluidización se logró con la introducción del flujo de aire proveniente de un compresor que mantuvo una velocidad ascensional del agua y de las partículas, lo que favoreció el contacto microbiano de la película adherida a las partículas con el agua residual. El caudal de entrada de aire estuvo controlado por un manómetro. El efluente del RALFTCC pasó a una unidad de tratamiento físico constituida por un filtro granular (medio granular seleccionado) de flujo ascendente, cuya salida se depositó en un tanque de succión de donde fue bombeado a una unidad de desinfección filtro UV y posteriormente a una caja de nivel constante donde se distribuyó para retornar nuevamente a los tanques de cultivo.

El agua de fondo del tanque de cultivo (aproximadamente el 15% del total del caudal efluente), pasó a una unidad de tratamiento biológico conformada por un digestor anóxico de flujo ascendente (DAFA). El agua proveniente de este mecanismo ingresó al postfiltro por la parte inferior. Con el fin de asegurar una

distribución uniforme de flujo en los filtros y en el digestor anóxico, se instalaron internamente láminas perforadas en acrílico; de igual manera se utilizaron dispositivos como guías para mantener en posición el tubo interno del RALFTCC y el elemento que permite el ingreso de aire en el reactor de lecho fluidizado.

4.3. MATERIALES

A continuación se presenta una descripción detallada de cada uno de los elementos que conformaron el SRA. La Figura 3 muestra una vista en planta, la Figura 4 una vista frontal y la dirección del flujo entre las unidades que componen el SRA y en la Figura 5 se presenta el montaje del sistema evaluado.

4.3.1. Caja de nivel constante. Se elaboró en acrílico de 5 mm de espesor y consta de tres (3) cámaras; una primera cámara correspondió a una zona de aquietamiento donde se dispuso una placa con orificios de $\frac{1}{4}$ " de diámetro para garantizar un flujo homogéneo; en la segunda cámara se colocaron tres (3) dispositivos de salida de 1" para distribución de los caudales hacia los tanques de cultivo intensivo de trucha arcoíris. La tercera cámara fue la de excesos, donde mediante una tubería de 1" se devuelve el líquido hasta el tanque de succión, como se muestra en la Figura 5. La caja de nivel constante posee las siguientes dimensiones: largo 41 cm, ancho 36 cm y alto 35 cm, y un volumen total de 51 L.

4.3.2. Sistema de transporte de flujo. Se utilizó tubería de PVC y manguera 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. La manguera que se utilizó para la distribución del agua de la caja de nivel constante a las unidades experimentales tuvo un diámetro de 1", con los accesorios respectivos como: válvulas de bola, compuerta, uniones universales, té, codos, entre otros.

4.3.3. Unidades experimentales. El proceso de recirculación empieza en las unidades experimentales, para dicho fin se utilizaron 3 tanques plásticos de cultivo de 250 L de capacidad con un volumen neto de 125 L., a los cuales se les hicieron 2 perforaciones en el fondo; una primera perforación para la evacuación de las aguas residuales superficiales (que corresponde al 85% del volumen total), provista de una tubería de 2" de diámetro y una altura de 42 cm, para asegurar la columna de agua requerida; y una segunda perforación de diámetro de 1" para la salida de aguas residuales del fondo del tanque (correspondientes al 15% del volumen total). Dichas unidades fueron ubicadas sobre una plataforma de madera localizada sobre una base fabricada en acero de 2 m de altura como se muestra

en la Figura 2. Cada unidad experimental estuvo provista de dos barras de aireación de 40 cm de largo y de una malla polisombra sobre la tubería de 2" para evitar que los animales sean arrastrados por el agua que sale y caigan a los sistemas de filtración.

Figura 2. Unidades experimentales



4.3.4. Digestor anóxico de flujo ascendente (DAFA). Esta unidad de tratamiento recibió el efluente de fondo de las unidades de cultivo (15% del volumen total) para un proceso de desnitrificación (o reducción de nitratos a nitrógeno gaseoso) a través de una tubería PVC de 1", la cual transportó la descarga de los 3 tanques de cultivo hasta dicho sistema, regulando el caudal de entrada mediante una válvula de compuerta. Esta unidad de filtración estuvo compuesta por un DAFA elaborado en tubería PVC de 8" de diámetro y una altura de 1,1 m, con una capacidad de 35,67 L. Estuvo provisto además de láminas circulares internas en acrílico perforadas para la retención del medio soporte (rulos de baja densidad) y pestañas o aros de PVC que sirven de soporte para las mismas; selladas herméticamente con pegamento para este material en la parte inferior y superior del reactor, evitando así fugas que interfieran en el correcto funcionamiento del mismo.

Figura 3. Esquema del sistema de recirculación para el cultivo intensivo de trucha arcoíris (vista planta)

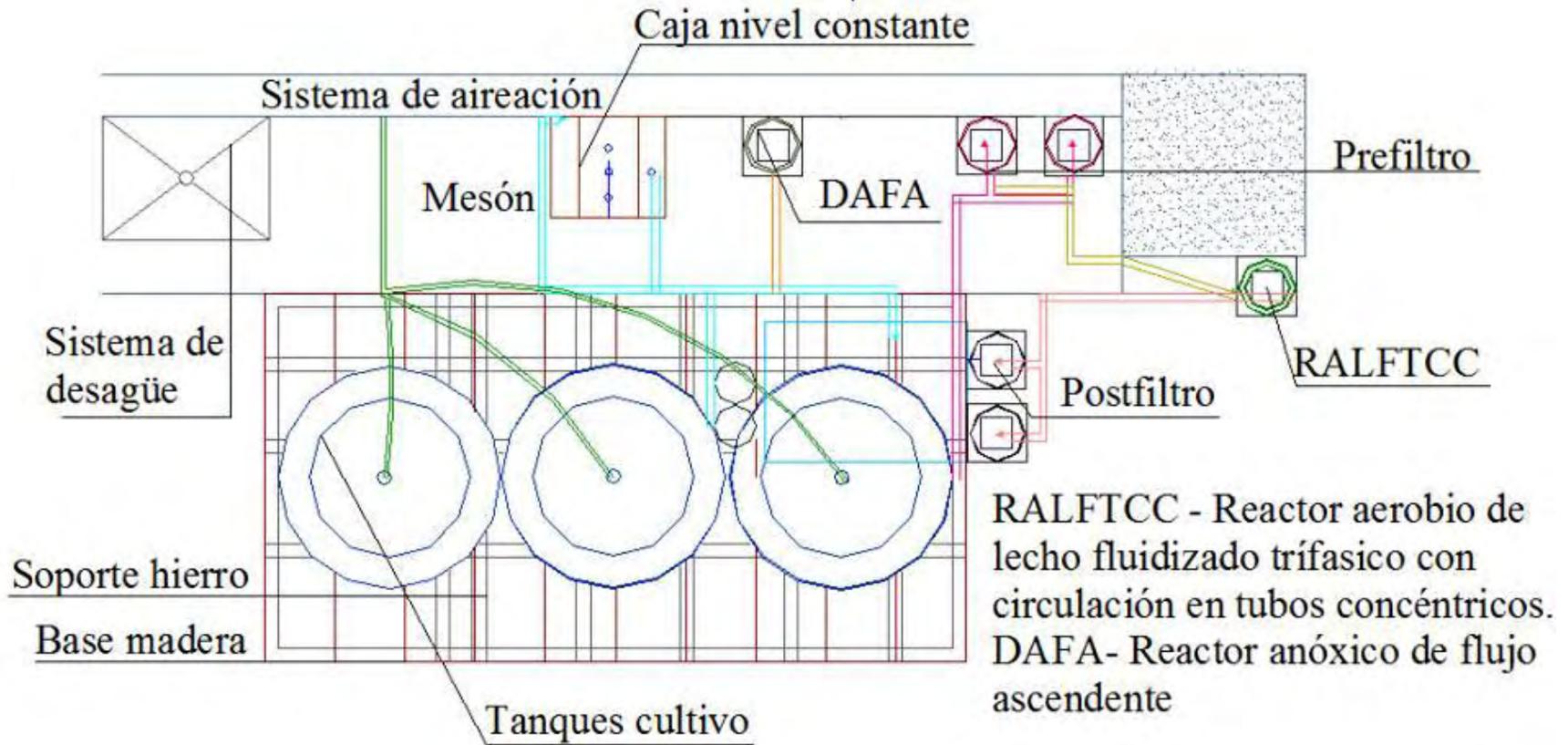


Figura 4. Esquema del sistema de recirculación para el cultivo intensivo de trucha arcoíris (vista frontal)

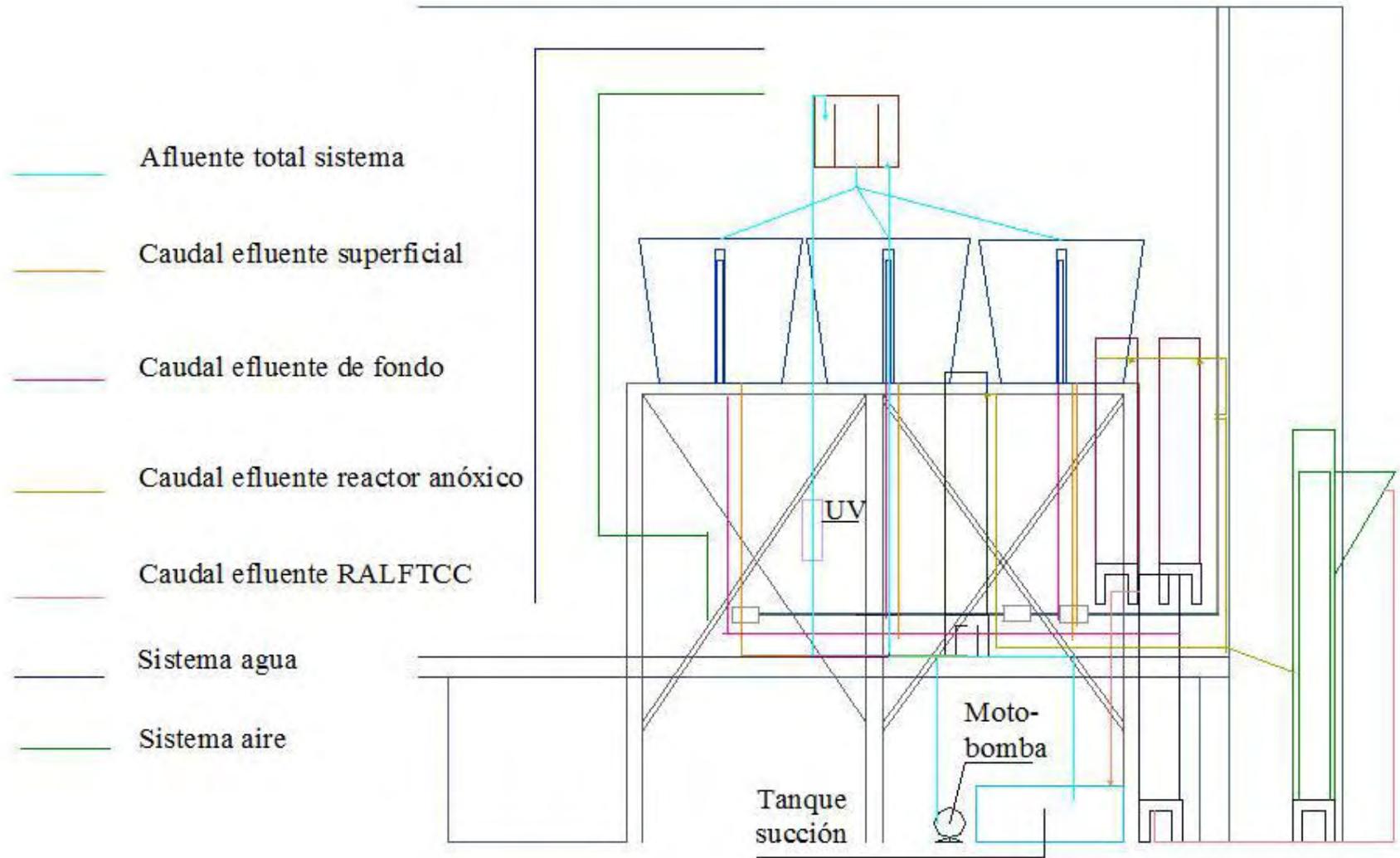


Figura 5. Montaje del sistema de recirculación para el cultivo intensivo de trucha arcoíris



El medio filtrante del (DAFA), estuvo compuesto por material cilíndrico (rulos) de baja densidad biológicamente no degradable. Dicho reactor estuvo ubicado sobre una base de acero de 20 cm de altura. Cabe anotar que este sistema contó con una correa de metal (aluminio) sujeta a la pared por chazos y tornillos, con el fin de evitar que se caiga y mantener verticalidad. (Figura 7).

Figura 6. Elaboración y montaje caja de nivel constante



En la Figura 6, en las imágenes A hasta la D, se observa el proceso de marcación, corte de los materiales (láminas de acrílico, tubería PVC y ángulos de aluminio para soporte), realización de agujeros, montaje y pegado con cloruro de metilo, silicona o soldadura de PVC; en la imagen C, C1 corresponde a la cámara de quietamiento, C2 a la cámara de distribución y C3 a la cámara de excesos.

4.3.5. Sistema de tratamiento primario (prefiltración). Se denomina sistema de tratamiento primario debido a que es la primera unidad utilizada en la reducción de partículas sólidas, y fundamentalmente se encarga tanto de disminuir la carga contaminante que llega al RALFTCC, así como también el flujo que llegaría a este evitando así una posible colmatación de materia orgánica y un estado anaerobio. Este sistema contó con una entrada en la parte inferior conformada por una válvula de regulación unida a una unión universal que recogió la descarga del efluente superficial de los tanques de cultivo correspondiente al 85% del volumen total.

Figura 7. Digestor anóxico de flujo ascendente (DAFA) vista superior



En la Figura 7. Se observa en la imagen izquierda, los rulos de baja densidad; antes de la inoculación y en la imagen de la derecha el proceso después de la inoculación y su funcionamiento.

El prefiltro estuvo conformado por tubería de PVC, de un diámetro de 8" y una altura de 1,1 m para un volumen total de 35,67 L., contó con flujo ascendente y estuvo conformado por una capa soporte y dos medios granulares diferentes (Tabla 2 y Figura 8). Para la selección de esta granulometría se tuvo en cuenta las recomendaciones de la organización panamericana de la salud (OPS)⁵⁴.

El tipo de filtro incorporado en este sistema consistió en diferentes capas granulométricas a través del cual se forzó el paso del agua, quedando así atrapadas las partículas más grandes en los espacios entre grano y grano. La selección del tamaño del material granular necesario se hizo a través de un tamiz, en donde las partículas de menor tamaño atravesaron los poros de este, y las de tamaño mayor, se quedaron atrapadas.

⁵⁴ ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD (OPS). Guía para Diseño de Sistemas de Tratamiento de Filtración en Múltiples Etapas. Lima: 2005. p 16.

Tabla 2. Tipos de material granular utilizado en los sistemas de filtración.

Diámetro material granular (mm)	Volumen Necesario filtro (cc)	Volumen Necesario total (cc)
25	8100	32400
19	6480	25920
13	4860	19440
6	4860	19440
3	3240	12960

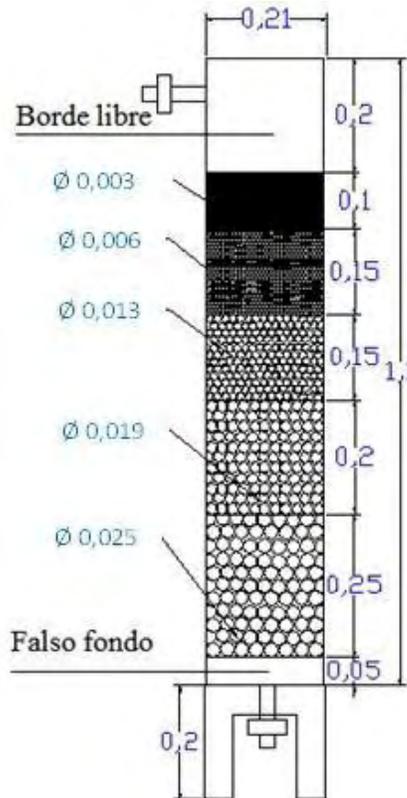
4.3.6. Sistema de postfiltración. El principal objetivo de esta unidad de filtración fue remover las partículas más pequeñas que hayan pasado por las demás unidades de tratamiento del SRA. Tanto en la construcción de las dos unidades de prefiltración y las dos unidades de postfiltración, se utilizó tubo de PVC de diámetro de 8", con bases en acrílico perforado, lo que aseguró un flujo uniforme en el interior de los filtros. Poseen además un medio filtrante (Tabla 2) determinado y tubería para entrada y salida de flujos. Tanto los prefiltros como los postfiltros estuvieron provistos de piezómetros, los cuales sirvieron para verificar la altura del flujo de agua dentro de las unidades de filtración. Dichos piezómetros constaron de una manguera de 3/8" sujeta a un racor por medio de abrazaderas metálicas (Figura 8).

4.3.7. Reactor aerobio de lecho fluidizado trifásico con circulación en tubos concéntricos (RALFTCC) de flujo ascendente. Según Sánchez-Ortíz⁵⁵, este tipo de sistemas se caracterizan por ser muy eficientes en la retención de grandes concentraciones de biomasa activa y materia nitrogenada, procedentes de un complejo ecosistema microbiano generado a partir de un medio soporte como el carbón activado granular. Su importancia radica en que es una alternativa rápida de tratamiento de efluentes, sin exhalar olores desagradables y un manejo eficaz en los niveles de amonio proveniente de procesos como la sobrealimentación, excretas metabólicas generadas de heces, branquias y mucus de la especie de cultivo, y además sostiene que con este tipo de sistemas se pueden garantizar condiciones óptimas para el ambiente de cultivo.

⁵⁵SÁNCHEZ-ORTÍZ, I. Remoção de nitrogênio de água residuária de Produção intensiva de tilápias com recirculação Utilizando reator de leito fluidizado com circulação Em tubos concêntricos. Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil – Ênfase em Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Faculdade de engenharia de ilha solteira. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Área de concentração em Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais. 2009. 170 p.

En la Figura 8 se presenta un esquema donde se muestra la distribución de la altura y el tamaño de las capas de los diferentes diámetros de los medios filtrantes.

Figura 8. Distribución del medio granular en el sistema de pre y postfiltración



El RALFTCC fue construido a partir de tubería PVC; diámetro de 8", y una tubería interna de 6" de diámetro, con soportes circulares en lámina de acrílico para mantener el lecho filtrante (zeolita con diferente tamaño), tubería de entrada de 1" en la parte inferior para la inyección de aire y otros accesorios. El RALFTCC contó con una entrada lateral a una altura de 1/3 del flujo de agua residual proveniente del prefiltro a través de tubería PVC de 1", la cual fue adherida al tubo siendo sellada con silicona y masilla, como se muestra en la Figura 9.

Figura 9. Características y montaje del RALFTCC.



En la Figura 9, en la imagen B, se observa el tubo interno y externo; la imagen C, entrada del aire comprimido y una tubería de PVC para vaciado. Imagen A, montaje final del RALFTCC.

Hernández⁵⁶, menciona que algunos aspectos importantes para la correcta operación de estas unidades de tratamiento, están dadas por la forma de ejecución del movimiento, la velocidad de circulación del líquido, el cual influye en los procesos de mezcla líquida, la recirculación de burbujas y la gravedad específica del medio de soporte. Además se debe tener en cuenta que son operados con velocidades bajas, las biopartículas podrán sedimentarse o presentar bajas tensiones de corte, aumentando el grosor de la biopelícula de remoción, provocando condiciones anaerobias, llevando a la formación de

⁵⁶ HERNANDEZ, T. Coeficiente de transferencia de oxigênio em reatores aeróbios de tubos concêntricos e leito fluidizado. Ilha Solteira. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Editorial Universidade Estadual Paulista. 2002. p.125.

biomasa suspendida en exceso; y si son operados con alta velocidad puede ocurrir reducción del grosor de las biopartículas. En casos de anaerobiosis y aerobiosis, los procesos de remoción de la materia orgánica se afectan cuando la velocidad del líquido es mayor que la velocidad de sedimentación de las partículas, estas permanecen en suspensión, es decir, el lecho es considerado como fluidizado.

En el RALFTCC el lecho se fluidiza a medida que la velocidad del agua es suficiente como para mantener suspendido el soporte en la corriente de aire, generando así una turbulencia y un incremento en las velocidades de transferencia de masa de oxígeno, amoníaco y nítrico a partir de la biopelícula adherida al soporte y removiendo el exceso de biomasa sobre las partículas fluidizadas.

4.3.8. Tanque de succión. Recibió el flujo procedente de los postfiltros, el cual estaba en óptimas condiciones para luego ser enviado por medio de dos motobombas conectadas al tanque a través de tubería y accesorios PVC, pasando por una unidad de filtración UV, después a la caja de nivel constante y posteriormente a los tanques de cultivo. Tuvo una capacidad para 80 litros de agua, con dos agujeros de diámetro 1" en la parte lateral; en dichas perforaciones fueron adecuados accesorios hembra-macho del mismo diámetro, tanto en la parte interna como externa del tanque para el acople con las motobombas, y una lona de caucho en ambos lados que permitió hacer presión entre el accesorio y la pared de la caja, se sellaron herméticamente con silicona para impedir las fugas.

4.3.9. Motobombas. Se contó con dos motobombas hidráulicas de 0,5 HP cada una, marca PEDROLLO las cuales estaban unidas al tanque de succión por medio de tubería PVC de 1". Tenían la función de bombear el flujo de agua que ha pasado por todas las unidades de tratamiento, seguida por el filtro UV hasta la caja de nivel constante, para luego llegar a las unidades de cultivo y continuar así con el proceso de recirculación.

4.3.10. Controlador de motobombas (Timer). Se programa manualmente y actuó como controlador para el funcionamiento de las motobombas, de manera que funcionaron alternadamente por intervalos de tiempo de media hora cada una, brindando así un periodo de receso para una mientras la otra estaba funcionando, con el fin de evitar una posible sobrecarga.

4.3.11. Unidad de desinfección U.V. Se considera importante para la eliminación de microorganismos presentes en el efluente residual, debido a que son

inactivados por la luz UV, donde se produce un daño foto químico a sus ácidos nucleicos y que pueden ser altamente perjudiciales para el cultivo. Es igualmente importante, debido a que no genera residuos peligrosos y son de alta eficiencia. La unidad de desinfección UV con capacidad requerida de 750 L/h estuvo conectada directamente a las motobombas por medio de tubería de 1" y sujeta a la pared mediante correas plásticas y chazos. Las características de unidad de desinfección UV fueron: modelo UV07-55W, marca RESUM® – voltaje de la lámpara de 55 W, carga máxima de 1585 galones/hora, volumen recomendado 476 a 660 galones.

4.3.12. Unidad de aireación. Se contó con un equipo blower o generador de aire con una potencia de 0,5 HP, marca RESUM el cual posee 33 salidas para la aireación de las diferentes unidades, tanto de cultivo como de aclimatación y almacenamiento, se localizó sobre una base de metal a 3 m de altura.

4.3.13. Unidad de generación de aire comprimido (Compresor). Se contó con un compresor o generador de aire presurizado marca Ingersoll Rand, que cuenta con una presión de 225 PSI, y que brindó la aireación necesaria para el RALFTCC con el fin de mantener estable la comunidad microbiana. Contó además con un sistema de trampa de aceites y manómetro para regular el caudal de entrada de aire, evitando así que una presión demasiado fuerte pueda afectar las tuberías y mangueras de conducción e interfiera en la biopelícula adherida al medio soporte.

4.3.14. Tanque de aclimatación. Se dispuso de un tanque plástico de 1m³ de capacidad para la recepción de los animales en el momento de su llegada. El tanque estuvo provisto de una barra de aireación de 70 cm y piedras difusoras para generar la suficiente cantidad de oxígeno para el bienestar de las truchas. Contó con una tubería de 1" en el fondo que sirve como desagüe, además de una malla polisombra para impedir que los ejemplares salten y caigan fuera del tanque y una banda de caucho para sujetarla a las paredes del mismo.

4.3.15. Tanques para almacenamiento de agua. Se usaron dos tanques plásticos de 500 L de capacidad cada uno para el almacenamiento, declorinación y reposición de agua para el sistema y/o para el tanque de aclimatación. Cada tanque contaba con sistema de aireación por piedras difusoras

4.3.16. Balanza. De marca OHAUS PA 313, capacidad máxima de 400 g y precisión de 0,01 g, utilizada para realizar muestreos de los animales y pesaje del alimento a suministrar.

4.3.17. Oxímetro. Referencia YSI 550 A. utilizado en la medición de temperatura, oxígeno disuelto, potencial de hidrógeno y conductividad.

4.3.18. Material biológico. Se utilizaron ejemplares de trucha arcoíris variedad “kamloop” cuya semilla es importada y cultivada en el corregimiento del Encano municipio de Pasto, Nariño.

4.3.19. Insumos.

- Alimento comercial extrudizado al 45% de proteína.
- Sal marina.
- Anestésico a base de clavo de olor (eugenol).

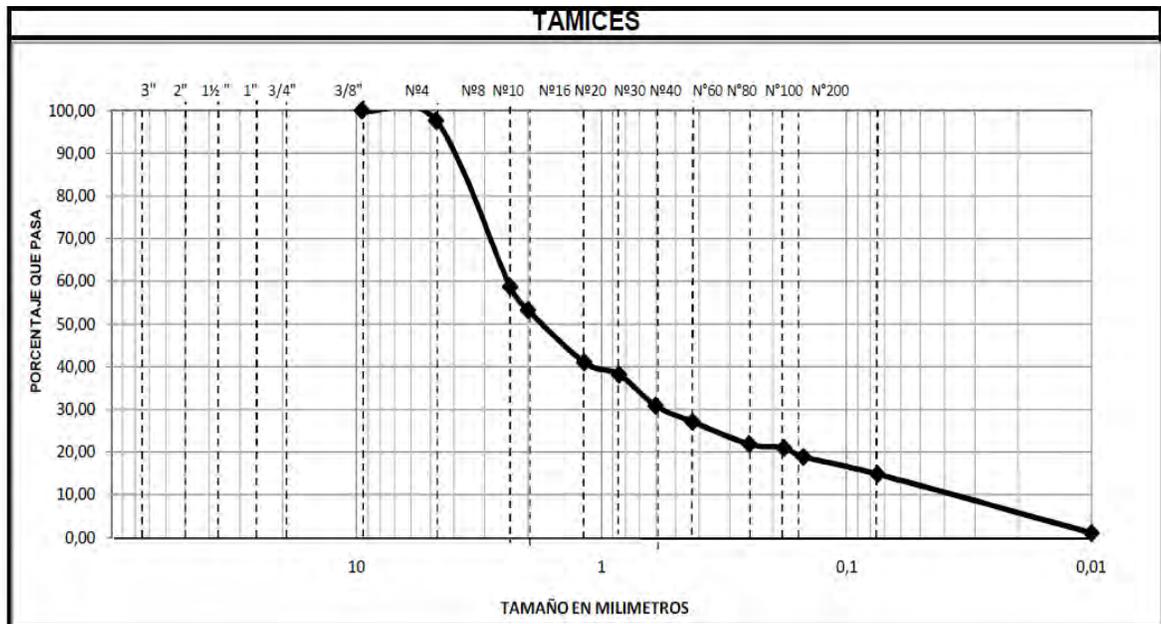
4.4. MÉTODOS

4.4.1. Selección de materiales para el RALFTCC. El material a seleccionar debía cumplir algunas características como por ejemplo que sea económico, resistente y durable. Inicialmente se optó por utilizar piedra pómez, pero al realizar pruebas granulométricas se encontró que tenía una alta fragilidad y disgregaba con facilidad. Como se puede observar en la Figura 10, el material en estudio tuvo fracciones retenidas en los tamices utilizados en la prueba, además por ser un material muy frágil era bien gradado y se requería que predominase material homogéneo.

Sánchez-Ortíz *et al*⁵⁷, caracterizó tres medios granulares como son: arena, carbón antracitoso y carbón activado granular. La arena y el carbón activado granular se muestran como alternativas factibles de ser usadas en este tipo de reactor por las características físicas favorables como son uniformidad granulométrica y baja masa específica. Debido a esto se vio en la necesidad de seleccionar otro material acorde con los requerimientos de la investigación, y se optó por evaluar la zeolita (Figura 11).

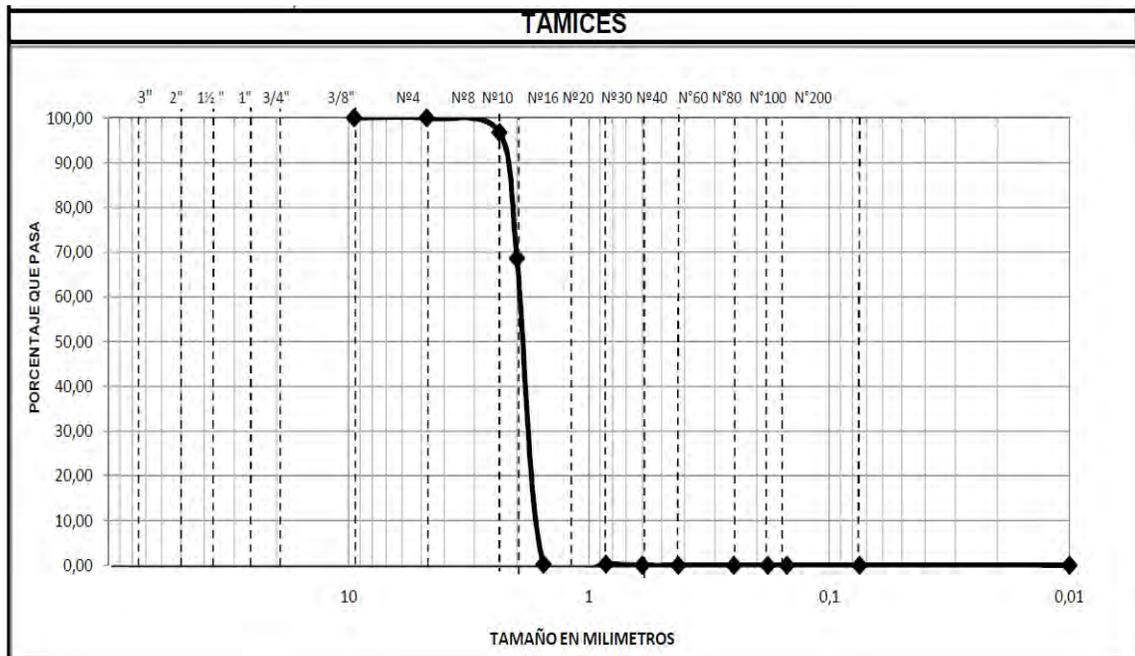
⁵⁷ SÁNCHEZ-ORTÍZ, Óp. cit., p. 68-77

Figura 10. Resultados análisis granulométricos de piedra pómez



Fuente: Laboratorio de suelos y pavimento, Universidad de Nariño, 2012.

Figura 11. Resultados análisis granulométricos de zeolita



Fuente: Laboratorio de suelos y pavimento, Universidad de Nariño, 2012.

A diferencia de la piedra pómez, se observa que la zeolita tuvo material retenido entre los tamices 8 y 20, por lo que se puede convertir en una alternativa para el medio de fluidización, y garantizar un comportamiento adecuado del flujo. De este análisis granulométrico se puede concluir que cerca del 70% pasó el tamiz No. 16 y fue retenido por el tamiz No. 20, que corresponde a un diámetro medio de 1,8 mm aproximadamente.

4.4.2. Método de cálculo y calibración de caudales. Fue importante para garantizar los recambios necesarios para la presente investigación. La ecuación general que describe la hidráulica de un orificio en un tanque o caja de nivel constante, se deduce a partir de la ecuación de Bernoulli, teniendo en cuenta la diferencia de presiones entre el punto más alto del reservorio y la salida del orificio. La ecuación general para un orificio se expresa de la siguiente forma⁵⁸:

$$Q = A * C * \sqrt{2g * \Delta h} \quad (4)$$

$$Q = n \left(\frac{\pi}{4} * D^2 \right) * C * \sqrt{2g * \Delta h} \quad (4.1)$$

$$C = \frac{Q}{\sqrt{2g * \Delta h} * n \left(\frac{\pi}{4} * D^2 \right)} \quad (5)$$

Donde:

Q : Caudal

A : Área

C : Coeficiente de descarga

g : Gravedad

Δh : Altura o carga hidráulica

D : Diámetro del orificio

n : número de orificios

El coeficiente de descarga es un factor adimensional característico de la válvula u orificio, que permite calcular el caudal (Q) con el que descarga; en función del nivel del fluido en la caja de nivel constante (Δh).

⁵⁸ ÁVILA, H. y SILDARRIAGA, J. Calibración de parámetros de fugas en fallas longitudinales en tuberías de PVC. En: Ingeniería & Desarrollo. Universidad del Norte. 2004 p. 32-44 Disponible en: <http://rcientificas.uninorte.edu.co>

•**Cálculo de caudales con coeficiente de descarga teórico.** En el cálculo de caudales requeridos, se evaluó el uso de diferentes diámetros de orificios correspondiente a 11/64”, 9/64” y 3/32”; los cuales brindaron el caudal requerido para los tratamientos ver (Tabla 3 y 4). Posterior a esta selección se procedió a diseñar y hacer el montaje de los tubos tipo flauta, para corroborar a nivel de laboratorio y obtener un coeficiente de descarga real.

Tabla 3. Cálculo de caudal con coeficiente de descarga teórico para el tratamiento 1.

Numero broca (plg)	Área (cm ²)	Número de orificios	Área total (cm ²)	Coeficiente teórico	Altura de columna de agua (cm)				
					19	17	15	13	11
					Caudal (mL/s)				
11/64	0,150	2	0,299	0,6	35	33	31	29	26
5/32	0,124	3	0,371	0,6	43	41	38	36	33
9/64	0,100	3	0,301	0,6	35	33	31	29	26
1/8	0,079	2	0,158	0,6	18	17	16	15	14
7/64	0,061	4	0,242	0,6	28	27	25	23	21
3/32	0,045	7	0,312	0,6	36	34	32	30	27
5/64	0,031	9	0,278	0,6	32	31	29	27	25
1/16	0,020	13	0,257	0,6	30	28	26	25	23

Tabla 4. Cálculo de caudal con coeficiente de descarga teórico para el tratamiento 2.

Numero broca (plg)	Área (cm ²)	Numero de orificios	Área total (cm ²)	Coeficiente teórico	Altura de columna de agua (cm)				
					19	17	15	13	11
					Caudal (mL/s)				
11/64	0,150	4	0,599	0,6	69	66	62	57	53
5/32	0,124	6	0,742	0,6	86	81	76	71	65
9/64	0,100	6	0,601	0,6	70	66	62	58	53
1/8	0,079	4	0,317	0,6	37	35	33	30	28
7/64	0,061	8	0,485	0,6	56	53	50	46	43
3/32	0,045	14	0,623	0,6	72	68	64	60	55
5/64	0,031	18	0,557	0,6	64	61	57	53	49
1/16	0,020	26	0,515	0,6	60	56	53	49	45

•**Cálculo coeficiente de descarga real.** Se realizó el cálculo mediante la Ecuación 5, obteniendo los resultados indicados en las Tablas 5 y 6.

Tabla 5. Cálculo de coeficiente de descarga real tratamiento 1

Número de broca (plg)											
11/64				9/64				3/32			
Tiempo (s)	Vol. (mL)	Caudal (mL/s)	C. real	Tiempo (s)	Vol. (mL)	Caudal (mL/s)	Coe real	Tiempo (s)	Vol. (mL)	Caudal (mL/s)	C. real
2,97	130	43,77	0,76	6,38	272	42,63	0,73	3,12	186	59,62	0,99
2,86	134	46,85	0,81	4,04	168	41,58	0,72	3,69	208	56,37	0,94
3,29	120	36,47	0,63	3,77	156	41,38	0,71	3,39	198	58,41	0,97
3,35	134	40,00	0,69	4,43	186	41,99	0,72	2,82	160	56,74	0,94
2,88	124	43,06	0,74	4,72	222	47,03	0,81	2,98	170	57,05	0,95

Tabla 6. Cálculo de coeficiente de descarga real tratamiento 2.

Número de broca (plg)											
11/64				9/64				3/32			
Tiempo (s)	Vol. (mL)	Caudal (mL/s)	C. real	Tiempo (s)	Vol. (mL)	Caudal (mL/s)	C. real	Tiempo (s)	Vol. (mL)	Caudal (mL/s)	C. real
2,40	214	89,17	0,77	3,08	236	76,62	0,66	2,16	194	89,81	0,75
2,52	206	81,75	0,71	2,79	254	91,04	0,78	2,84	240	84,51	0,70
3,02	280	92,72	0,80	2,90	248	85,52	0,74	2,32	206	88,79	0,74
1,88	180	95,74	0,83	2,74	250	91,24	0,79	2,59	218	84,17	0,70
2,54	234	92,13	0,80	2,16	188	87,04	0,75	2,00	176	88,00	0,73

En el laboratorio se realizó el cálculo del coeficiente de descarga real, correspondiente a un promedio general de 0,78 para los dos tratamientos objeto de estudio (Tabla 5 y 6). Posteriormente se volvió a realizar el cálculo del caudal que brinde los requerimientos necesarios, con el coeficiente de descarga real obtenido.

•Cálculo de caudales involucrando coeficiente de descarga real.

Tabla 7. Cálculo de caudales con coeficiente de descarga real para el tratamiento 1.

Número broca (plg)	Área (cm ²)	Número orificios	Área total (cm ²)	Coeficiente real	Altura de columna de agua (cm)				
					19	17	15	13	11
11/64	0,150	2	0,299	0,779	45	43	40	37	34
5/32	0,124	2	0,247	0,779	37	35	33	31	28
9/64	0,100	2	0,200	0,779	30	29	27	25	23
1/8	0,079	3	0,238	0,779	36	34	32	30	27
7/64	0,061	4	0,242	0,779	36	34	32	30	28
3/32	0,045	5	0,223	0,779	33	32	30	28	25
5/64	0,031	8	0,247	0,779	37	35	33	31	28
1/16	0,020	12	0,238	0,779	36	34	32	30	27

Tabla 8. Cálculo de caudales con coeficiente de descarga real en el tratamiento 2.

Número broca (plg)	Área (cm ²)	Numero orificios	Área total (cm ²)	coeficiente real	Altura de columna de agua (cm)				
					19	17	15	13	11
11/64	0,150	4	0,599	0,779	90	85	80	74	69
5/32	0,124	4	0,495	0,779	74	70	66	62	57
9/64	0,100	4	0,401	0,779	60	57	54	50	46
1/8	0,079	6	0,475	0,779	71	68	63	59	54
7/64	0,061	8	0,485	0,779	73	69	65	60	55
3/32	0,045	10	0,445	0,779	67	63	60	55	51
5/64	0,031	16	0,495	0,779	74	70	66	62	57
1/16	0,020	24	0,475	0,779	71	68	63	59	54

En la calibración de caudales con el coeficiente de descarga real, se obtuvieron los posibles diámetros de broca correspondiente a 5/32 y 1/8 de pulgada, para los dos tratamientos con las características que se indican en las Tablas 7 y 8.

Con los resultados anteriores se realizó el diseño y orificios de los tubos tipo flauta, correspondiente a las siguientes características: tubería de presión de diámetro de 1 pulgada, altura de 8 cm y a 5 cm se realizaron los orificios, con el fin de garantizar el caudal necesario.

•**Verificación de caudales con diámetros de broca seleccionados.** Se realizaron aforos de caudal con los posibles diámetros de broca seleccionados y se obtuvieron los resultados presentados en la Tablas 9 y 10.

Tabla 9. Verificación caudales tratamiento 1

Número de broca (plg)					
1/8				5/32	
Tiempo (s)	Volumen (mL)	Caudal (mL/s)	Tiempo (s)	Volumen (mL)	Caudal (mL/s)
5,53	142	25,68	3,85	134	34,81
5,55	150	27,03	2,98	120	40,27
4,69	132	28,14	4,36	168	38,53
5,33	138	25,89	3,6	144	40,00
5,42	138	25,46	3,47	136	39,19
6,91	180	26,05	4,45	160	35,96
Promedio		26,38			38,13

Tabla 10. Verificación caudales tratamiento 2

Número de broca (plg)					
1/8				5/32	
Tiempo (s)	Volumen (mL)	Caudal (mL/s)	Tiempo (s)	Volumen (mL)	Caudal (mL/s)
3,45	218	63,19	2,28	152	66,67
3,46	220	63,58	3,05	220	72,13
3,36	218	64,88	3,11	210	67,52
2,7	194	71,85	2,38	204	85,71
4,06	260	64,04	3,21	234	72,90
3,04	198	65,13	2,38	184	77,31
Promedio		65,91			73,71

Después de verificar los caudales prácticos de los posibles diámetros de broca, en las Tablas 7 y 8, el diámetro adecuado para los caudales requeridos en los tratamientos 1 y 2, es de 5/32" con una altura de columna de agua de 17 cm (Tabla 9 y 10), y se optó por hacer 3 juegos de tubería perforada para cada tratamiento, con el fin de que cuando uno se tapone el otro siga en funcionamiento.

4.4.3. Plan de manejo

•**Adecuación de unidades experimentales.** Se emplearon tanques de 250 L, se limpiaron y desinfectaron con cloro comercial, se acoplaron los tubos tipo flauta calibradores de entrada de agua y se tuvo un caudal nulo para el T0, para el T1 de 2,1 L/min obteniendo un recambio de una vez por hora y para el T2 de 4,16 L/min permitiendo un recambio de dos veces por hora.

•**Transporte y aclimatación de los animales.** Los animales fueron transportados desde el corregimiento el Encano (Empresa truchas Sindamanoy), hasta el laboratorio de Hidráulica de la Universidad Mariana sede Monte Alvernia. 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 de 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 como lo recomienda Wedler⁵⁹. Una vez transportadas las bolsas con los animales, se llevaron a un tanque de cultivo, donde se realizó la respectiva aclimatación con el fin de equilibrar la temperatura y pH. A cada bolsa se le agregó 5 g/L de cloruro de sodio, como tratamiento profiláctico. De acuerdo con Kinkelin *et al*⁶⁰, 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 (Figura 12).

•**Alimentación.** Se utilizó concentrado comercial extrudizado al 45% de proteína, la cantidad a suministrar se calculó teniendo en cuenta la conversión alimenticia,

⁵⁹ WEDLER, E. Introducción en la Acuicultura con énfasis en los Neotrópicos. Primera Edición., Santa Marta, Col. 1998. p 324.

⁶⁰ KINKELIN, *et al.* Op. cit., p. 276.

el factor de condición, la temperatura y la población por cada unidad experimental, de acuerdo a las modelos de crecimiento recomendados por Timmons *et al*⁶¹ y Blanco⁶². Se alimentó con una frecuencia de 6 a 8 veces por día; y en ocasiones en las que sobró alimento, al finalizar la jornada de trabajo, se pesó todo el que no haya sido consumido para determinar así el consumo neto.

Figura 12.Recepción del material biológico y siembra en unidades experimentales.



•**Determinación del tamaño de muestra.** De acuerdo con Solarte-Portilla *et al*⁶³., la muestra es toda parte representativa de una población, lo que significa que debe conservar las características esenciales de la población. Si se conoce el tamaño de la población N y este es pequeño, se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$n = \frac{NZ^2_{(1-\alpha/2)}\sigma^2}{e^2(N-1)+Z^2_{(1-\alpha/2)}\sigma^2} \quad (6)$$

Donde:

⁶¹ TIMMONS, *et al.* Op. cit., p. 104 - 223.

⁶² BLANCO, C. La trucha arcoíris, cría industrial. 2ª ed. Ediciones Mundiprensa. 1995. 503 p.

⁶³ SOLARTE-PORTILLA, C., GARCÍA, H. & IMUEZ-FIGUEROA, M. Bioestadística, Aplicaciones en Producción y Salud Animal. Universidad de Nariño. San Juan de Pasto. 2008 p.108.

$Z_{(1-\alpha/2)}^2$: Valor que se encuentra en la tabla normal estandarizada, para una confiabilidad de $1-\alpha$. Para niveles del 95 y 99% de confiabilidad los valores de Z son 1,96 y 2,57 respectivamente.

N: Tamaño de la población.

e: “es la distancia máxima que podría admitirse entre la estimación de la verdadera media con respecto al parámetro; esta cantidad es arbitraria y la fija el investigador”⁶⁴ y debe encontrarse en los siguientes rangos.

$$\frac{\sigma}{6} \leq e \leq \sigma \text{ o } \sigma \frac{1}{2} \quad (6.1)$$

σ = La desviación estándar corresponde a la población de donde se extrae la muestra.

•**Muestreo.** Para estimar la población a muestrear se empleó la Ecuación 6 por cada tratamiento y se cuantificó peso, talla y evaluación macroscópica de las aleta dorsal, pectorales y caudal; en este proceso se utilizó anestésico a base de clavo de olor (eugenol) en concentraciones de 0,01–0,03 mL/L, la cantidad menor se utilizó en animales de 20 gr y la dosis más alta en ejemplares con pesos superiores a los 60 gr, que se encuentra dentro de los valores recomendados por, Arzu y Muhammed⁶⁵, quienes en su estudio, demostraron el efecto del clavo de olor como anestésico, en los índices hematológicos de la trucha arcoíris (*O. mykiss*) y trucha marrón (*Salmo trutta fario*).

Cada siete días se realizaron muestreos de los animales, colectando al azar mediante una nasa los ejemplares de cada unidad experimental, hasta completar la muestra representativa calculada con la Ecuación 6, correspondiente a una muestra mayor de 12 animales, que de la población es aproximadamente el 30%. En ese momento los animales fueron transferidos a baldes de 12 litros, provistos de aireación, y se procedió a medir las variables a evaluar de manera individual; y esta información fue consignada en las respectivas bitácoras.

⁶⁴ Ibid., p.109.

⁶⁵ ARZU, U. y MUHAMMED, A. The effects of natural (clove oil) and synthetical (2-phenoxyetthanol) anesthesia substances on hematology parameters of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and brown trout (*Salmo trutta fario*). Journal of animal and veterinary advances 9 (14): Faculty of aquaculture engineering. Ataturk University. Erzurum, Turkey. 2010. 1925 – 1933 p.

Durante la evaluación se efectuaron un total de 5 muestreos; con base en los datos obtenidos, se calculó las variables estudiadas (incremento de peso individual, ganancia de biomasa total por unidad experimental, consumo de alimento por día, alimento a suministrar por día y semana y se estableció la conversión alimenticia).

•**Monitoreo calidad de agua.** La medición de parámetros físico-químicos del agua se realizó diariamente (mañana, medio día y tarde) y dos veces por semana en horas de la mañana, con base en las guías de calidad de aguas para acuicultura 1⁶⁶.Tabla 11; el método de determinación de cada parámetro de calidad de agua, se indica en la Tabla 12 de acuerdo con las entidades APHA, AWWA & WEF⁶⁷.

Tabla 11. Monitoreo parámetros físico-químicos, en las unidades experimentales

Parámetro	Unidades	Frecuencia
Oxígeno Disuelto	mg/L	Diaria
pH		Diaria
Temperatura	°C	Diaria
Conductividad	µS/cm	Diaria
Nitritos	mg/L	2 x semana
Nitratos	mg/L	2 x semana
Amonio	mg/L	2 x semana
Nitrógeno total	mg/L	2 x semana
DBO	mg/L	2 x semana
DQO	mg/L	2 x semana
Sólidos totales	mg/L	2 x semana
Sólidos suspendidos	mg/L	2 x semana
Sólidos disueltos	mg/L	2 x semana
Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	2 x semana

•**Monitoreo de caudales.** Se realizaron aforos de caudal, con frecuencia de tres veces por día (mañana, medio día y tarde), con el fin de verificar y controlar los

⁶⁶ CARDENAS-CALVACHI, G. Guía de laboratorio de calidad de agua para acuicultura 1, métodos adaptados de los “Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales” 17 edición de la APHA, AWWA y WPCF, 1998 y de las guías de laboratorio de la Universidad del Valle. Universidad de Nariño, San Juan de Pasto 2009. 76 p.

⁶⁷ AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA), AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA), WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). Standard Methods for the Examination of Wáter and Wastewater 22 edition. Washington, D. C. 2012

caudales requeridos para los recambios establecidos en cada unidad experimental.

•**Monitoreo del sistema de recirculación acuícola (SRA).** Todas lo días en las mañanas se revisó el nivel del agua en el tanque de succión y se procedió a realizar la reposición del agua, causada por pérdidas de evaporación, salpicaduras y fugas. Cuando se observó que las unidades de filtración (pre y post filtros) estaban colmatadas, se procedió a desmontar las unidades y realizarles un proceso de lavado del material granular (diferentes granulometrías). Este proceso se lo realizó con frecuencia cada 7 días, logrando así obtener el adecuado funcionamiento del SRA.

4.4.4 Inicio de funcionamiento del SRA e inoculación del DAFA

Tabla 12.Métodos de determinación de parámetros fisicoquímicos

Parámetro	Método de determinación
Oxígeno Disuelto*	Electrodo de membrana - APHA, AWWA, WEF (2012) n° 4500_0G
pH*	Electrométrico - APHA, AWWA, WEF (2012) n° 4500H ⁺ B
Temperatura*	Termoeléctrico APHA, AWWA, WEF (2012) n° 2550 B
Conductividad*	Electrométrico - APHA, AWWA, WEF (2012) n° 2510 B
Nitritos**	Colorimétrico - APHA, AWWA, WEF (2012) n° 4500 NO ₂ _B
Nitratos**	Espectrofotométrico U.V.A - PHA, AWWA, WEF (2012) n° 4500 NO ₃ _B
Amonio**	Fenato - APHA, AWWA, WEF (2012) n° 4500 NH ₃ _F
Nitrógeno total**	Persulfato - APHA, AWWA, WEF (2012) n° 4500 N_C
DBO	Ensayo día 5 - APHA, AWWA, WEF (2012) n° 5210 B
DQO	Titulométrico reflujo cerrado - APHA, AWWA, WEF (2012) n° 5220 C
Sólidos totales	Gravimétrico - APHA, AWWA, WEF (2012) n° 2540 B
Sólidos disueltos	Gravimétrico - APHA, AWWA, WEF (2012) n° 2540 C
Sólidos suspendidos	Gravimétrico - APHA, AWWA, WEF (2012) n° 2540 D
Alcalinidad	Titulométrico - APHA, AWWA, WEF (2012) n° 2320 B

*: Análisis realizado por medio de sonda YSI 550 A

** : Análisis realizado por medio de espectrofotómetro

•**Inicio del funcionamiento del SRA.** Una vez construido y montado, el sistema fue probado hidráulicamente, para verificar la presencia de posibles fugas y realizar las reparaciones necesarias; hubo un problema en el SRA debido a que todos los accesorios estaban pegados con silicona, y se corrigió desarmando sus componentes y pegándolos utilizando soldadura. Posteriormente el SRA se colocó a funcionar por periodo de dos semanas, con el propósito de eliminar excesos de pegamentos y toxicidad. En este periodo se realizaron tres cambios totales de agua.

•**Inoculación del digester anóxico de flujo ascendente (DAFA).** Una vez el sistema estuvo funcionando correctamente, se procedió a realizar la inoculación por un periodo de dos semanas con frecuencia diaria, en las cuales se extrajo lodos procedentes del tanque de aclimatación, obtenidos por medio de sifoneo, luego se colocó a decantar por un tiempo de una hora, se eliminó el sobrenadante y con el residuo obtenido se realizó la inoculación.

•**Periodo de maduración del SRA.** Se mantuvo el sistema de recirculación en funcionamiento durante un periodo de tiempo mayor a 20 días recomendado por Timmons *et al*⁶⁸, periodo en el que existe maduración de cada una de las unidades de tratamiento de aguas residuales del sistema principalmente DAFA y RALFTCC.

•**Monitoreo del sistema de recirculación acuícola.** Todos los días en las mañanas se revisó el nivel del agua en el tanque de succión y se procedió a realizar la reposición del agua correspondiente al 3,52% diario, causada por pérdidas por evaporación, salpicaduras y eventuales fugas. Cuando hubo colmatación de las unidades de filtración primaria y secundaria, se realizó lavado de los medios granulares, para obtener un funcionamiento adecuado.

4.4.5.Realización pre-ensayo. Se realizó para estandarizar los protocolos de trabajo con la especie a cultivar, con el SRA, la aireación, y el sistema eléctrico de respaldo (planta eléctrica), que sustentan al sistema de recirculación. Se emplearon 48 animales por cada unidad experimental, con peso inicial de 26,40 y finalizaron de 46,27gramos, obteniendo un crecimiento de 1,08 g/día; se inició con carga de 10 kg/m³ y se obtuvo una carga máxima de 18,45 kg/m³ a lo largo del periodo experimental; conversión alimenticia de 1,05, sobrevivencia de 36%. Los parámetros físico-químicos del agua se mantuvieron estables y sin variaciones significativas, lo que aseguro el bienestar de los animales durante la evaluación,

⁶⁸ TIMMONS, *et al.* Op. cit., p. 209 – 210.

oxígeno disuelto de $5,79 \pm 0,19$ mg/L, temperatura de $18 \pm 0,07^\circ\text{C}$, pH de $8 \pm 0,04$ y conductividad de $361 \pm 30,77$. $\mu\text{S/cm}$. Se logró mantener el caudal deseado para el tratamiento 1, de $35,85 \pm 1,76$ mL/s., generando un recambio/hora para cada unidad experimental, lo que constata el acierto en el método seleccionado para este propósito.

4.4.8. Diseño Experimental. Debido a la limitada disposición de unidades experimentales, se utilizó un diseño en bloques completos aleatorizados (DBCA), mediante el cual se mantuvo de manera simultánea tres tanques (un tanque que representó a cada uno de los tratamientos a investigar). Conformado por tres tratamientos y tres bloques de la siguiente forma:

T0: Sin recambio

T1: Tiempo de retención hidráulica un recambio por hora

T2: Tiempo de retención hidráulica dos recambios por hora

Para realizar el análisis de varianza se utilizó la siguiente expresión algebraica:

$$Y_{ij} = \mu + T_i + B_j + \varepsilon_{ij} \quad (7)$$

Donde:

Y_{ij} : Variable respuesta.

μ : Media poblacional.

T_i : Efecto medio del i-ésimo tratamiento $i= 1$

B_j : Efecto medio del j-ésimo bloque $j= 1$

ε_{ij} : Error experimental asociado al i-ésimo tratamiento en la j-ésima bloque

•Formulación de hipótesis:

Las hipótesis a comprobar fueron:

$H_0: \mu T_0 = \mu T_1 = \mu T_2$. No existen diferencias significativas entre las medias de los tratamientos.

$H_1: \mu T_0 \neq \mu T_1 \neq \mu T_2$. Por lo menos una de las medias de los tratamientos presenta diferencias estadísticas significativas.

•**Análisis estadístico.** En cada una de las variables estudiadas, se aplicó un análisis de varianza ANOVA, con el propósito de determinar si existen diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos y en aquellas variables, en las cuales se encuentra diferencias, se aplicó una Prueba de Comparación Múltiple de Tukey al 95% de confiabilidad, con el fin de comparar los distintos tratamientos y establecer el mejor; para este propósito se empleó el programa estadístico STATGRAPHICS CENTURION XVI.I 2012.

4.4.6. Variables a evaluar. López-Macías⁶⁹, aplica los siguientes índices para evaluación de aspectos productivos:

•**Incremento de peso:** Se obtiene calculando la diferencia entre el peso final y el peso inicial durante un periodo de observación.

$$IP = Wf - Wi \quad (8)$$

Donde:

IP: Incremento de peso

Wf: Peso final

Wi: Peso inicial

•**Tasa de crecimiento específico (TCE):** Es el incremento de peso expresado en porcentaje, de un individuo durante el periodo de estudio.

•

$$TCE = \frac{\ln(Wf) - \ln(Wi)}{\text{Tiempo (días)}} * 100 \quad (11)$$

Donde:

TCE: Tasa de crecimiento específico (%/día)

Wf: Peso final

Wi: Peso inicial

⁶⁹ LÓPEZ-MACÍAS, J. Nutrición y alimentación acuícola. Editorial Universidad de Nariño, 2ª edición, Pasto, Colombia. 2011. p. 202-203.

4.4.6 Bienestar animal

•**Sobrevivencia:** Permite determinar la cantidad de población que murió durante todo el periodo de estudio y se calcula mediante la siguiente fórmula⁷⁰:

$$\text{Sobrevivencia (\%)} = \frac{\text{N}^\circ \text{ final de individuos}}{\text{N}^\circ \text{ inicial de individuos}} \times 100 \quad (12)$$

4.4.7 Análisis macroscópico de las aletas pectorales, dorsal y caudal. Se analizaron según lo reportado por Person-Le Ruyet *et al*⁷¹.

4.4.8 Toma de parámetros físico-químicos de la calidad del agua. Se realizó monitoreos diarios y semanales de los parámetros indicados en la Tabla 11.

⁷⁰ Ibid., p. 202.

⁷¹ PERSON-LE RUYET, *et al.* Óp. cit., p.191–195.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. MONITOREO Y CONTROL DE LOS TIEMPOS DE RETENCIÓN HIDRÁULICA (TRH) DURANTE LA INVESTIGACIÓN

El mantenimiento de la calidad y cantidad de agua de un SRA, se controla por medio del tiempo de retención hidráulico (TRH). Colt *et al*⁷², propone que los TRH para este tipo de sistemas y especialmente en cultivo de peces de agua fría, varía entre 0,17 h–0,34 h si el agua no es aireada y entre 0,48 h–0,96 h si se utiliza oxígeno puro. Con respecto a las estimaciones realizadas por Piedrahita⁷³ sobre la carga contaminante del agua efluente de los SRA, las concentraciones de los compuestos de desecho (nitrógeno, fósforo y sólidos suspendidos totales), se encuentran bajo los límites adecuados para el cultivo de truchas, lo que permitiría aumentar el TRH para estos sistemas de cultivo sin afectar el normal desarrollo de la especie; por consiguiente se optó por utilizar los TRH correspondiente a T1: 1 h y T2: 0,5 h.

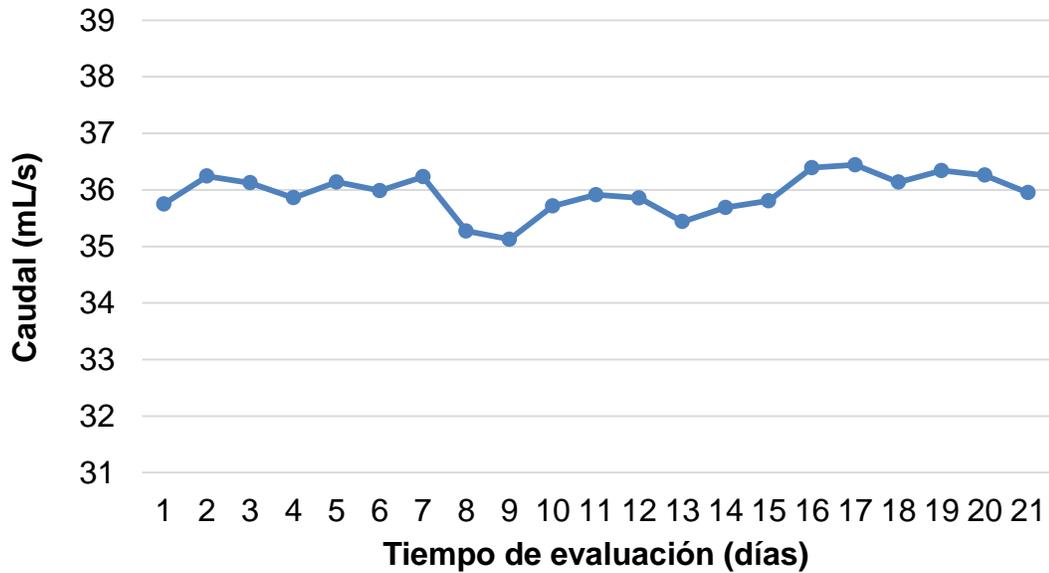
5.1.1. Monitoreo y control del TRH en el tratamiento 1. Durante la investigación se logró mantener el caudal necesario para generar un recambio de agua por hora en la unidad experimental.

En la Figura 13, se observa el comportamiento del caudal durante el periodo experimental en el T1, obteniendo un valor promedio de $35,95 \pm 0,35$ mL/s, que se traduce a un TRH de 0,96 horas, logrando mantener controlada la variación de este parámetro; asegurando así el recambio requerido. Lo anterior demuestra que el método seleccionado para calibración de caudales por medio de orificios, es el más adecuado para calibración del flujo en cajas de nivel constante, evitando el uso de válvulas y por ende generando disminución de costos.

⁷² COLT, J., ORWICZ, K. y BOUCK, G. Water quality considerations and criteria for high-density fish culture with supplemental oxygen. En: Fisheries Bioengineering Symposium 10. American Fisheries Society, Bethesda, Maryland, 1991 p. 372-385. Disponible en: <http://www.scholarworks.umass.edu>

⁷³ PIEDRAHITA, R. Reducing the potential environmental impact of tank aquaculture effluents through intensification and recirculation. En: Aquaculture: Vol. 226. 31 Octubre 2003. p. 35-44. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com>

Figura 13. Comportamiento del caudal en el T1 con TRH de 1 hora.

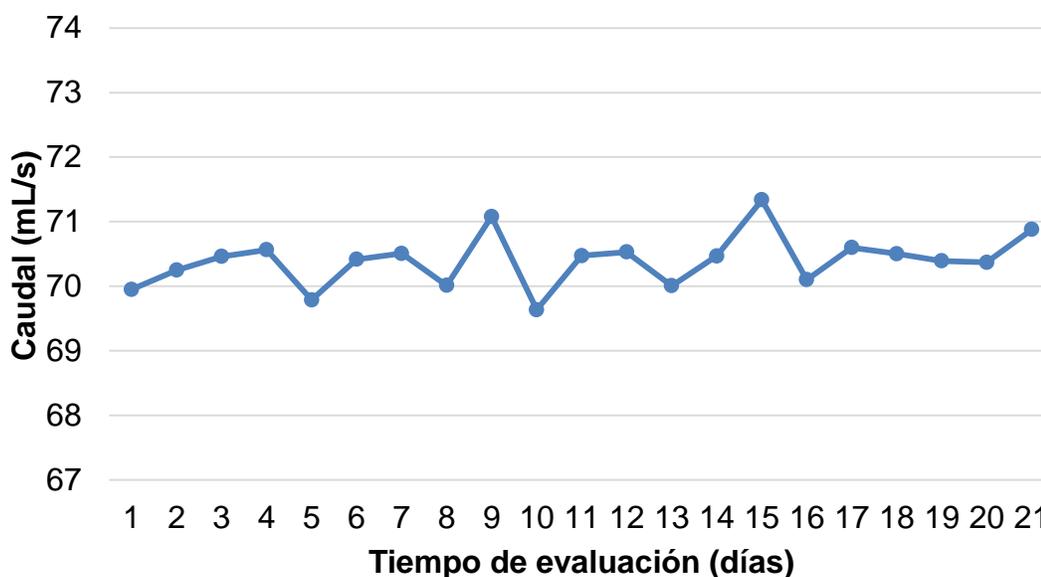


El aforo de caudales se lo realizó por método volumétrico, con frecuencia de tres veces por día (mañana, medio día y tarde); dicho procedimiento fue fundamental para monitorear y calibrar el caudal utilizado; se encontró que a medida que transcurría el tiempo de investigación, el orificio que regula el caudal aumentaba de diámetro; influyendo en el aumento del caudal y por ende menor TRH, por lo que se hizo necesario realizar cambios de tubos calibradores de caudal.

5.1.2. Monitoreo y control del TRH en el tratamiento 2. Durante la investigación se logró mantener el caudal necesario para generar dos recambios de agua por hora en la unidad experimental.

En la Figura 14, se observa el comportamiento del caudal durante el periodo experimental en el T2, obteniendo un valor promedio de $70,40 \pm 0,39$ mL/s, que se traduce a un TRH de 0,49 horas, logrando mantener controlada la variación de este parámetro; asegurando el recambio requerido, en similares condiciones del tratamiento 1.

Figura 14. Comportamiento del caudal en el T2 TRH de 0,5 horas.



5.2. VARIABLES PRODUCTIVAS

5.2.1. Incremento de peso. Según los resultados obtenidos para el peso al inicio de la investigación en los tres tratamientos (Tabla 13) el peso promedio fue de $31 \pm 0,27$ g, y la distribución de los ejemplares se hizo al azar disminuyendo de esta manera el error experimental y asegurando uniformidad de los peces entre los tratamientos. El coeficiente de variación fue menor al 5% lo que indica que los peces con los que se inició en los tratamientos fueron similares en peso inicial, este valor es inferior al 20%, valor recomendado por Acuña y Guevara citado por López-Macías⁷⁴, quien afirman que los coeficientes de variación superiores a 20% demuestran escasez de alimento y espacio insuficiente para el crecimiento normal de los peces. En la Tabla 14 se indica la talla inicial, final e incremento para cada tratamiento (Anexo 3).

⁷⁴ LÓPEZ-MACÍAS, J. 2011 p. 231

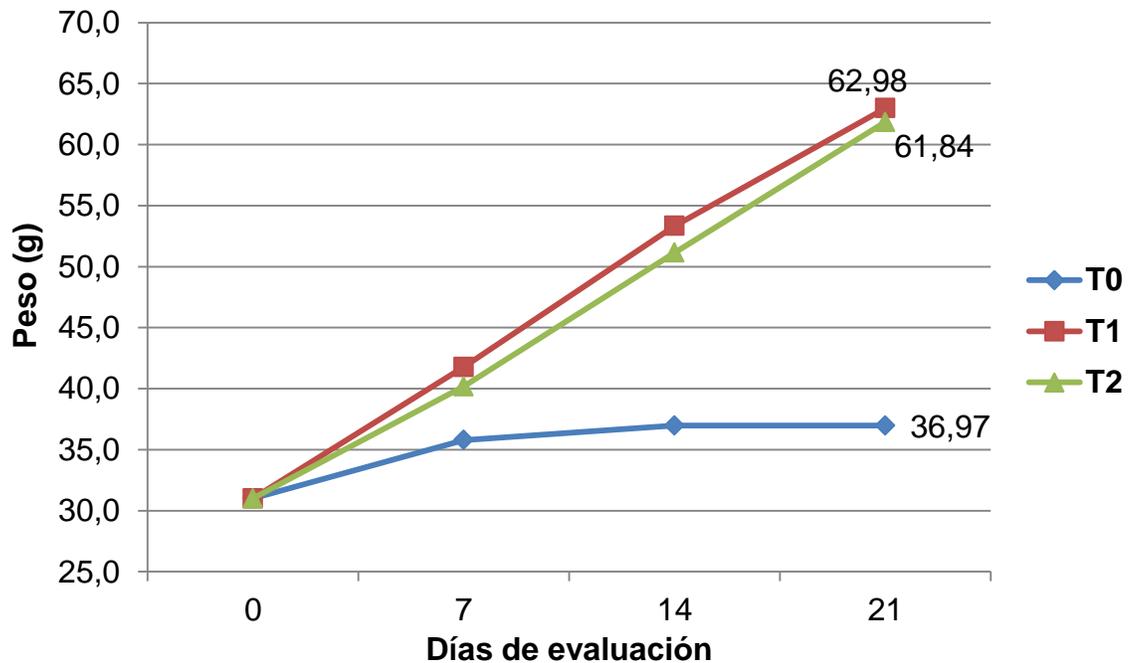
Tabla 13. Talla inicial y final de los tratamientos.

	T0	T1	T2
Talla inicial promedio mm.	140,98±0,84	140,98±0,84	140,98±0,84
Talla final promedio mm.	148,48±3,71	169,97±3,01	168,64±2,98
Incremento de talla mm	7,47±9,99	28,99±6,23	27,66±8,96

Tabla 14. Peso inicial y final de los tratamientos.

	T0	T1	T2
Peso inicial promedio g.	31±0,27	31±0,27	31±0,27
Peso final promedio g.	39,08±1,50	63,63±1,38	62,74±1,07
Coefficiente de variación (%) peso inicial	0,86	0,86	0,86
Coefficiente de variación (%) peso final	4,07	2,16	1,07

Figura 15. Incremento de peso, en el SRA vs aireación convencional.



En la Figura 15, se muestra el comportamiento del crecimiento en gramos al final de la investigación en los tratamientos (Tabla 14) obteniendo en el T1 con $63,63 \pm 1,38$ y T2 con $62,74 \pm 1,07$ frente al T0 con $36,97 \pm 1,68$ donde se registró el menor peso debido que este tratamiento se manejó únicamente con aireación convencional y recambios nulos.

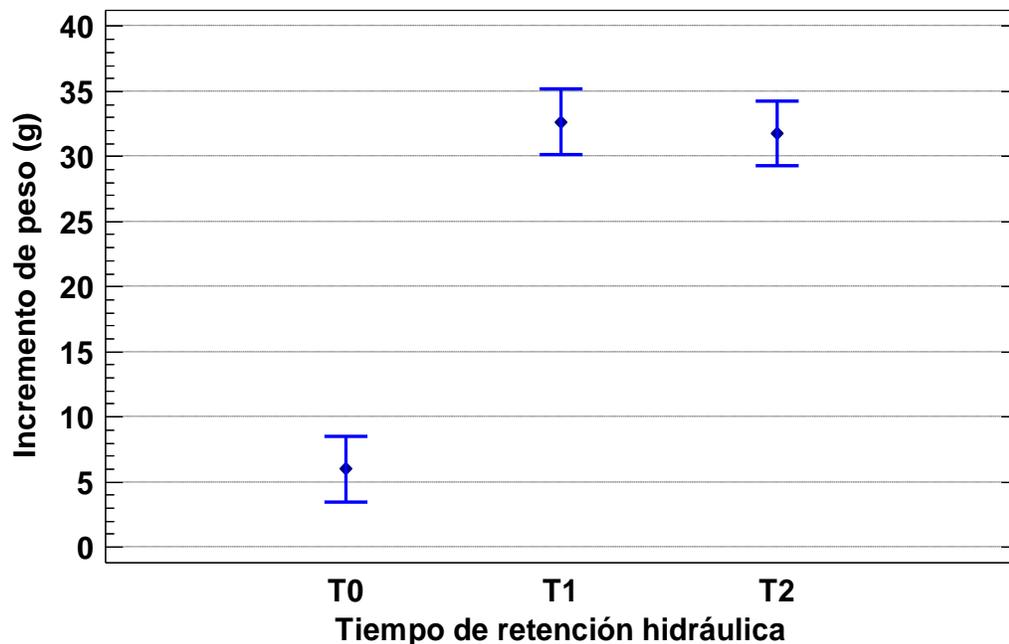
Tabla 15. Incremento de peso periodo, en el SRA vs aireación convencional.

Tratamientos	Incremento g/21 días	Incremento g/día
T0 ^b	$8,08 \pm 1,29$	$0,384 \pm 0,06$
T1 ^a	$32,63 \pm 1,36$	$1,554 \pm 0,06$
T2 ^a	$31,74 \pm 0,88$	$1,511 \pm 0,04$

^a: no existen diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$)

^b: existen diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$)

Figura 16. Gráfica de medias para incremento de peso periodo en SRA vs aireación convencional.



El análisis de varianza ($p < 0,05$ Anexo 2) para incremento de peso periodo demostró que existen diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos. Además la prueba de significancia de Tukey (Anexo 2) con el 95% de confiabilidad, estableció que los tratamientos (Tabla 15) en los que se evaluó en el sistema de recirculación, con uno y dos recambios por hora, presentaron los mejores resultados con un incremento de 32,63 y 31,74 g/21 días respectivamente, el tratamiento T0 con 8,08 g/21 días (Figura 16). Lo anterior coincide con las investigaciones realizadas por Mocanu *et al*⁷⁵. y Docan *et al*⁷⁶., en SRA, obteniendo incrementos de 49,58 g en un periodo de 33 días; dichos autores iniciaron con pesos de 27,46 g ($9,42 \text{ kg/m}^3$) y finalizaron con pesos promedios de 77,04 g ($26,46 \text{ kg/m}^3$), reportando crecimientos de 1,5 g por día.

Con relación a los incrementos de peso diarios (Tabla 15), se estableció que los mejores resultados se obtuvieron en el T1 con 1,55 g seguido por el T2 con 1,52 g y finalmente el T0 con 0,38 g; estos datos son superiores a los reportados para cultivo de trucha de altura, en condiciones similares de sistemas de recirculación como lo demuestran, García-Criollo *et al*⁷⁷ (1,13 g/día), Arredondo-Figueroa *et al*⁷⁸ (1,21 g/día) y Jojoa-Cabrera, Ibarra-Chaves y Sánchez-Ortíz⁷⁹ (1,5 g/día). De acuerdo con López⁸⁰, el incremento de peso de los organismos hidrobiológicos en cautiverio, los procesos anabólicos de proteínas son mayores en animales jóvenes, y la restauración, remodelación, y mantenimiento de los tejidos y acumulación de nuevos tejidos, están relacionados con la eficiencia del nitrógeno y la calidad y consumo de alimento, pero en animales adultos los procesos catabólicos son más intensos.

⁷⁵ MOCANU M., CRISTEA V., DEDIU L., DESIMIRA D., DOCAN A & IONESCU T. The influence of different stocking densities On growth performances of *Oncorhynchus mykiss* (walbaum, 1792) in a recirculating Aquaculture system. En: *Lucrări Științifice - vol. 56, Seria Zootehnie. Aquaculture, Environmental Sciences and Cadastre Department, "Dunarea de Jos" University of Galati, Romania. 2010. p.326 – 331.*

⁷⁶ DOCAN, A., CRISTEA, V., DEDIU, L., MOCANU, M. Y GRECU, L. The impact of level of the stocking density on the haematological parameters of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) reared in recirculating aquaculture systems. En: *AACL Bioflux, Volume 4, Issue 4. Aquaculture, Environmental Sciences and Cadastre Department, "Dunarea de Jos" University of Galați, Galați, Romania, European Union. 2011, p. 536 – 541. Disponible en: <http://www.bioflux.com.ro/aac>*

⁷⁷ GARCÍA-CRIOLLO, *et al.* Op. cit., p. 29

⁷⁸ ARREDONDO-FIGUEROA. J., BARRIGA-SOSA, L., NUÑEZ-GARCÍA, I. y PONCE-PALAFIX, J. Cultivo de Trucha Arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*, Walbaum) en un sistema cerrado de recirculación de agua. Planta Experimental de Producción Acuícola, Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa, México, Distrito Federal (México). En: *CIVA 2006 1038-1047. 2006. p .10* Disponible en: <http://www.civa2006.org>

⁷⁹ JOJOA-CABRERA, G. IBARRA-CHAVEZ, E. y SÁNCHEZ-ORTÍZ, I. Efecto del tiempo de retención hidráulica en reactores de lecho fijo para el tratamiento de efluentes del cultivo de Trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*). Univeridad de Nariño, Pasto, Colombia. En: *Livestock Research for Rural Development 25 (10) 2013. p. 1 – 16.*

⁸⁰ LÓPEZ-MACIAS, J. 2011 Op. cit. p. 243

Igualmente entre las integraciones fisiológicas complejas se encuentra el crecimiento de los organismos, el cual de acuerdo con Faure y Labbé⁸¹, es una actividad controlada a nivel celular. El crecimiento refleja múltiples procesos que se llevan a cabo en el medio interno y es un indicador global de la adecuación del organismo al ambiente. Si ésta es favorable el organismo crece pero cuando está sujeto a variables causantes de estrés del medio, el crecimiento se detiene. “Los peces obtienen su potencial máximo de crecimiento fisiológico por una serie de condiciones: composición química del agua, características genéticas y estado fisiológico”⁸².

Se determinó que el factor más importante que afecta el crecimiento de los peces es la temperatura del agua y el nivel de oxígeno, a mayor temperatura del agua y disponibilidad de oxígeno se genera un incremento de la tasa metabólica que implica una mayor ingesta de alimento y asimilación, el rango óptimo de temperatura para trucha arcoíris se encuentra entre “15 y 18°C”⁸³; los peces utilizan más eficientemente el alimento, coincidiendo con las mejores tasas de conversión y mayor crecimiento específico, como lo demuestran Larsen *et al.*⁸⁴, quienes evaluaron a una temperatura de 19°C, y McKenzie *et al.*⁸⁵, a una temperatura de 14°C; obteniendo bajos índices de parámetros productivos.

La investigación realizada por Davidson J., Bebak J. y Mazik P⁸⁶, demostró cómo afecta el ruido (117 y 149 decibeles), en las variables productivas de la trucha arcoíris, el peso de inicio fue 39 g (5,6 kg/m³), al cabo de 30 días, llegaron a 85 g (12,24 kg/m³) la talla de inicio fue de 140 mm y final del estudio de 175 mm, la tasa de crecimiento específico (TCE) de 2,64–2,93%/día, conversión alimenticia 1,07; sobrevivencia del 99% y concluyen que los factores de ruido no afectan las variables productivas en los SRA.

⁸¹ FAURE, A. y LABBÉ, L. Práctica de la alimentación en los peces. p.399 – 411 En: Nutrición y alimentación de peces y crustáceos. Ediciones Mundi-Prensa. México 2004. 482 p.

⁸² LÓPEZ-MACÍAS, J. y RUALES, E. Manejo preventivo de la flavobacteriosis de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) en cultivos intensivos en jaulas flotantes y superintensivos en raceways. En: Acta Biol. Par., Curitiba, 41 (1-2): 2012. p. 25-51.

⁸³ TIMONS *et al.* Op. cit., p. 213

⁸⁴ LARSEN, B., SKOV, P., MCKENZIE, D. Y JOKUMSEN A. The effects of stocking density and low level sustained exercise on the energetic efficiency of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) reared at 19 °C. En: Aquaculture. 2012 p. 226–233. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/aqua-online>

⁸⁵ MCKENZIE, D., HÖGLUND, E., DUPONT-PRINET, A., LARSEN, A., SKOV, P., PEDERSEN, P. y JOKUMSEN, A. Effects of stocking density and sustained aerobic exercise on growth, energetics and welfare of rainbow trout. En: Aquaculture 338–341. 2012 p.216–222 Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/aqua-online>

⁸⁶ DAVIDSON, J., BEBAK, J. y MAZIK, P. The effects of aquaculture production noise on the growth, condition factor, feed conversion, and survival of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. En: Aquaculture 288 (2009) p. 337–343. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/aqua-online>

Los crecimientos son adecuados, debido a que se les suministró varias raciones de alimentación como lo demuestra Ustaoglu *et al*⁸⁷, los cuales observaron al comparar 2 vs 6 veces el suministro de alimento, el de mayor cantidad de veces obtuvo conversiones alimenticias más bajas, mayor crecimiento y mejor aprovechamiento de los nutrientes; también Morales y Quirós⁸⁸, demuestran que al suministrar alimento pocas veces mucho existe una elevada ingestión, esto afecta las señales periféricas del aparato digestivo involucradas en la generación de apetito, resultando en un menor consumo al día siguiente, para luego, a las 48-72 horas recuperar el apetito normal y volver a ingerir nuevamente alimento.

Por otra parte, Trenzado-Romero⁸⁹, propone modelos matemáticos en los cuales el crecimiento viene expresado en función de 2 variables: ingesta y actividad metabólica, el incremento de la densidad ocasiona una menor ingesta y un aumento de la actividad (conductas agresivas, competición, etc.) lo que se traducirá en un menor crecimiento, y establece que el crecimiento dependerá de un 40% de la ingesta y de un 60% del gasto energético. Al someter a la trucha arcoíris a condiciones de alta densidad se induce una reducción de la tasa de crecimiento debido, fundamentalmente a una disminución de la ingesta.

5.2.2.Cargas obtenidas. La carga inicial promedio para la siembra de los distintos tratamientos (Tabla 16) fue de 10,17 kg/m³, el análisis de varianza (p<0,05 Anexo 4) para este parámetro, determinó que no existen diferencias estadísticas. En consecuencia la carga inicial de siembra no genera fuente de variación.

Las mejores cargas fueron las obtenidas en el SRA, el T1 con 20,87 kg/m³, y T2 con 20,58 kg/m³ frente al T0 con 1,25 kg/m³ (Figuras 17 y 18); de acuerdo a los resultados del análisis estadístico (p<0,05) y prueba de múltiples rangos de Tukey al 95% de confianza (Anexo 5). Esto se demuestra debido a que los recambios por hora son superiores al 100%, lo cual está de acuerdo a lo determinado por Timmons *et al*⁹⁰, en consecuencia los tiempos de retención hidráulica en sistemas

⁸⁷ USTAOĞLU, S. y ALAĞİL, F. Effects of feeding frequency on nutrient digestibility and growth performance of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed a high lipid diet. En: Revista, Turk. J. Vet. Anim. Sci. 33(4). Department of Aquaculture, Faculty of Fisheries, Sinop University, Turkey 2009; p.317-322

⁸⁸ MORALES, G. y QUIRÓS, R. Desempeño productivo de la trucha arcoíris en jaulas bajo diferentes estrategias de alimentación. En: Asociación Latinoamericana de Producción Animal. Vol. 15, Núm. 4. Universidad de Buenos Aires, Argentina. 2007. P. 121 – 129. Disponible en: <http://www.alpa.org.ve/ojs.index/php>

⁸⁹ TRENZADO-ROMERO, C. Selección parental y dieta como estrategias de atenuación del estrés crónico en la trucha *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum, 1792). Tesis doctoral. Universidad de Granada, Facultad de Ciencias. 2004. p. 70

⁹⁰ TIMMONS M. *et al*. Op. cit., p 223

de recirculación para cultivo de truchas no afectan el incremento de las variables productivas.

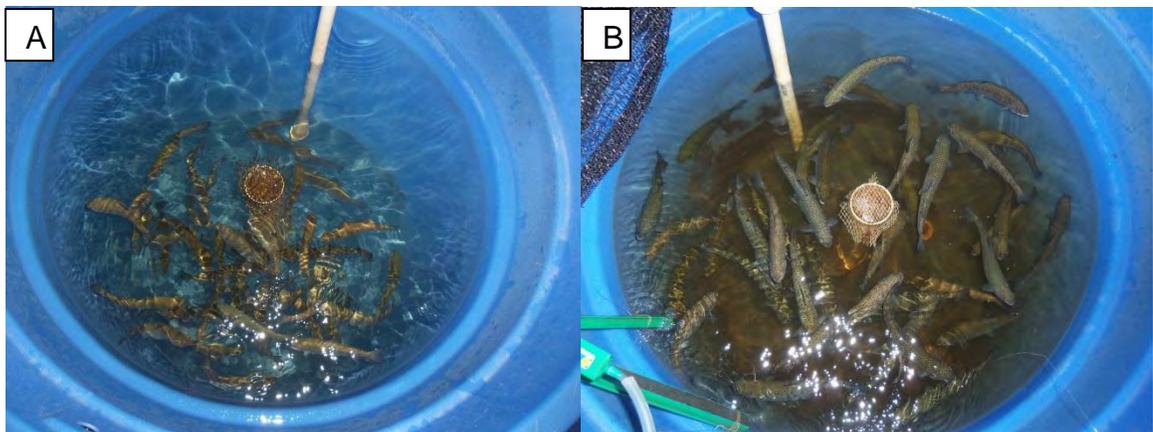
Tabla 16. Cargas obtenidas en SRA vs aireación convencional.

	T0 ^b	T1 ^a	T2 ^a
Carga inicial (kg/m ³)	10,17±0,09	10,17±0,09	10,17±0,09
Carga final (kg/m ³)	1,25±1,77	20,87±0,45	20,58±0,22
Incremento de carga (kg/m ³)	-8,92±1,69	10,70±0,45	10,41±0,29

^a: no existen diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$)

^b: existen diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$)

Figura 17. Tanques de cultivo inicio y final de la investigación en el SRA.



En la Figura 17, se observa el incremento de carga obtenida en el SRA al inicio y al final de la investigación (imagen A y B respectivamente). Tanto en el T1 y T2 el incremento de carga es del 50%, con respecto a la carga inicial; en el T0 existió una disminución de carga correspondiente a menos 87,7%, causada por cero recambios y por consiguiente acumulación de poluciones en la calidad de agua, dejando susceptibles a los animales para mortalidades elevadas, y obteniendo carga final muy baja correspondiente a 1,25 kg/m³.

Las cargas obtenidas en el sistema de recirculación acuícola, están de acuerdo a las investigaciones reportadas en condiciones de cultivo similares y en la misma

fase de cultivo, Mocanu *et al*⁹¹. y Docan *et al*⁹²., demuestran en su investigación con inicio de carga de 10 kg/m³ y peso inicial de 29,51 g y al cabo de 33 días finalizó con carga de 26,42 kg/m³ y peso 77,04 g, obteniendo incrementos de 1,53 g/día, conversión alimenticia de 0,68 y tasa de crecimiento específico de 3,13% en un SRA.

“Los resultados obtenidos en esta investigación son válidos, para densidades de carga promedio de 20,72 Kg/m³; pero sin embargo variarán en las condiciones de cultivo en jaulas flotantes ubicadas en el lago Guamuez, que tienen capacidades promedio de 30 a 40 kg/m³”⁹³.

En los SRA las altas cargas conllevan a una disminución de la tasa de crecimiento e incrementan la conversión alimenticia, además afecta el bienestar de los ejemplares existiendo una jerarquización e incrementa el nivel de necrosis en las aleta dorsal y caudal, estos resultados, obtenidos bajo las condiciones de infraestructura y manejo de un cultivo a escala piloto, se ajustan con los obtenidos por Larsen *et al*⁹⁴., North *et al*⁹⁵., Sirakov *et al*⁹⁶., Baldwin⁹⁷ y Skov *et al*⁹⁸., las altas cargas llevan a los peces a ser más vulnerables a enfermedades como lo muestra Docan⁹⁹, quienes evaluaron los parámetros hematológicos de trucha arcoíris criados bajo diferentes niveles de cargas en SRA.

⁹¹ MOCANU, *et al*. Op. cit., p.326 – 331.

⁹² DOCAN, *et al*. Op. cit., p. 536 – 541.

⁹³ LÓPEZ-MACÍAS, 2013. Comunicación personal.

⁹⁴ LARSEN, *et al*. Op. cit., p. 226–233

⁹⁵ NORTH, B., TURNBULL, J., ELLIS, T., PORTER, M., MIGAUD, H., BRON, J. y BROMAGE N. The impact of stocking density on the welfare of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). En: Aquaculture, Volume 255, Issues 1–4, 31 May 2006, P. 466-479. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com>

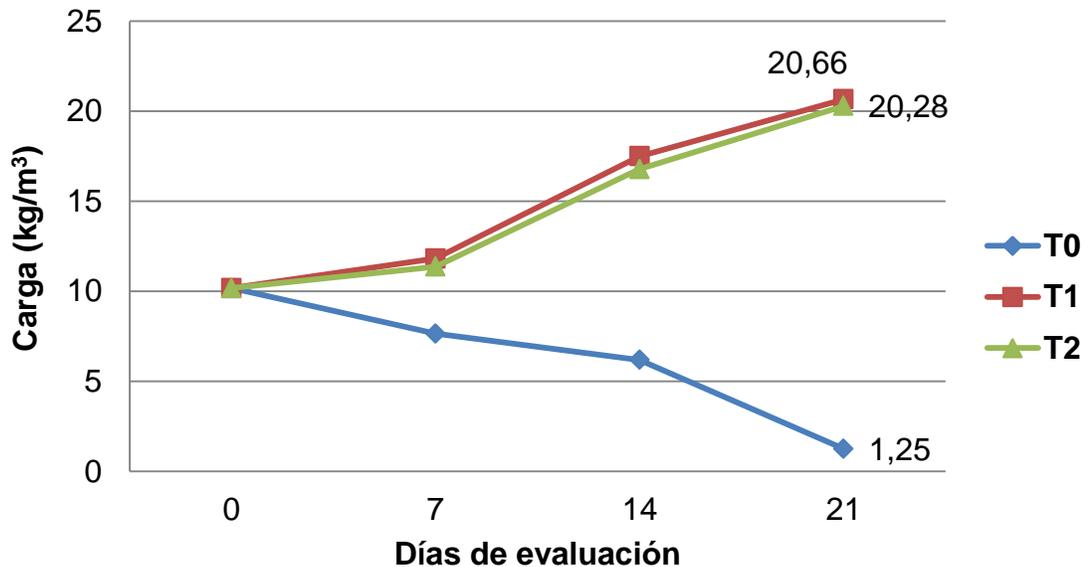
⁹⁶ SIRAKOV, I. y IVANCHEVA, E. Influence of stocking density on the growth performance of rainbow trout and brown trout grown in recirculation system. En: Bulgarian Journal of Agricultural Science, 14 (No 2). National Centre for Agrarian Sciences. 2008, 150-154. Disponible en: <http://www.agrojournal.org>

⁹⁷ BALDWIN, L. The effects of stocking density on fish welfare. En: The Plymouth Student Scientist, 4, (1), School of Science, University of the West of Scotland. 2010, p. 372-383.

⁹⁸ SKOV P, LARSEN B, FRISK M, y JOKUMSEN A. Effects of rearing density and water current on the respiratory physiology and haematology in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* at high temperature. En: Aquaculture. Technical University of Denmark. Aquaculture 319. 2011 p. 446–452. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/aqua-online>

⁹⁹ DOCAN, *et al*. Op. cit., p. 536 – 541

Figura 18. Incremento de la carga en kg/m³ en SRA vs aireación convencional.

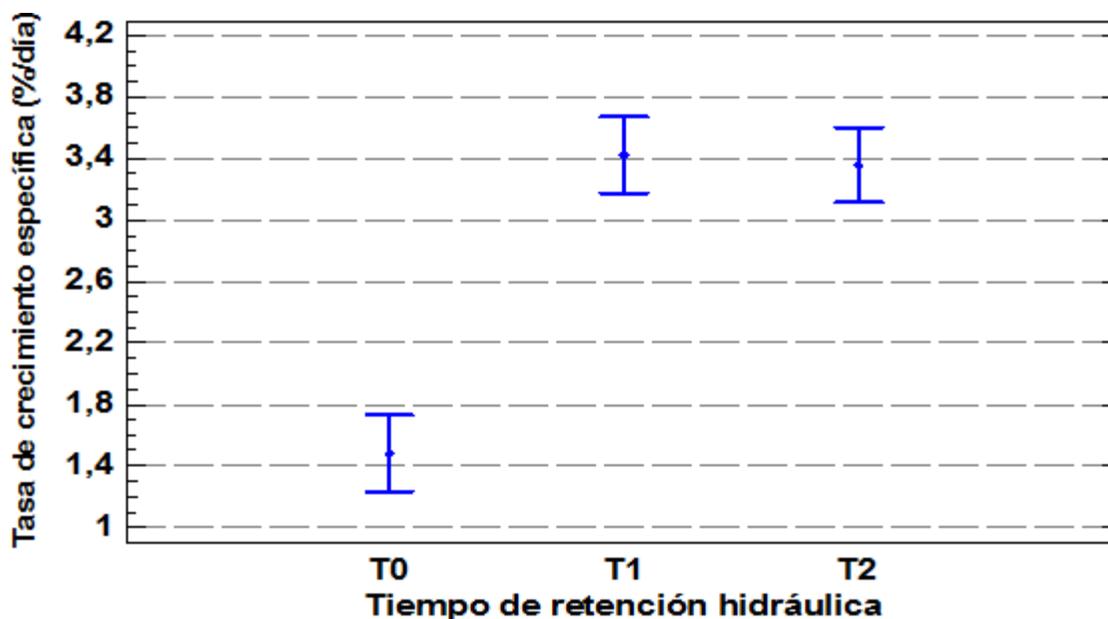


5.2.3. Tasa crecimiento específico (TCE). Los resultados obtenidos para tasa de crecimiento específico, el análisis de varianza ANOVA ($p < 0,05$), demostró que existen diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos (Anexo 5). Igualmente la prueba de Tukey al 95% de confiabilidad (Anexo 5), determina los mejores resultados en el SRA T1 con 3,43 y T2 con 3,36 frente al T0 con 1,49 donde se registró el menor crecimiento (%/día). Lo anterior se explica porque los animales jóvenes son más eficientes y aprovechan mejor la absorción de nutrientes para el proceso de renovación de tejidos y crecimiento, “mientras que en la fase de finalización la energía requerida del alimento se utiliza para la formación de células sexuales”¹⁰⁰.

En la Figura 19, se observa la tasa de crecimiento específico en %/día, en el T1, T2 vs el T0. Se determinó que no existen diferencias entre 1 y 0,5 TRH, los cuales fueron superiores en 56% comparados con el T0 correspondiente a aireación convencional y cero recambios.

¹⁰⁰ LÓPEZ, J. Nutrición Acuícola. Fisiología digestiva de los organismos hidrobiológicos de cultivo. Ed. Universidad de Nariño, Pasto, Colombia. 1997 p. 160

Figura 19. Gráfica de medias para tasa de crecimiento específica (TCE), en SRA vs aireación convencional.



De igual manera Herpher¹⁰¹, comprobó que los ejemplares de menor tamaño utilizan el alimento más eficientemente en procesos de crecimiento, lo cual es inversamente proporcional a medida que estos van creciendo. La anterior afirmación es comprobada por; Roque D'orbcastel *et al*¹⁰², quienes evaluaron con trucha arcoíris, al inicio de la investigación con 600 g y finalizaron con pesos superiores a 1200 g, obteniendo tasas de crecimiento específicos de 0,85 y 0,68 respectivamente en SRA y sistemas abiertos, a temperatura del agua de 12°C. Igualmente estudios reportados por McKenzie *et al*¹⁰³, compararon densidades de cargas bajas (19–25 kg/m³) y cargas altas (75-100 kg/m³); y obtuvieron las siguientes tasas de crecimiento específico: 1,51 vs 1,44 respectivamente, en truchas arcoíris cultivadas a 14°C. De otro lado, Venegas *et al*¹⁰⁴, evaluaron dos TRH, 6 y 3 horas, en fase de finalización para cultivos de trucha arcoíris; en su estudio iniciaron con pesos de 704±99 y 753±205, cargas iniciales de 29 y 31 kg/m³, pesos finales de 1049±124 y 1093± 253 g, cargas finales de 43,2 y 37,4

¹⁰¹ HERPHER, B. Nutrición de peces comerciales en estanques. México. Editorial Limusa, p 1993. p. 197

¹⁰² ROQUE D'ORBCASTEL, E, *et al*. Óp. cit., p. 79–86

¹¹¹ MCKENZIE, *et al*. Op. cit., p. 338 - 341

¹⁰⁴ VENEGAS, P., SOBENES, C., y ORTIZ, C. Efecto de Tiempos de retención Hidráulico de Agua, en un Sistema de cultivo Experimental de un Paso para Trucha Arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*). En: Información Tecnológica Vol. 19(6), Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile. 2008. p. 71-82

kg/m³, obteniendo resultados de CA 1,43 y 1,71 TCE de 1,158 y 1,096 respectivamente, para los dos TRH existió sobrevivencia del 100%; concluyen que el TRH no afectó las variables productivas.

En el caso contrario; en las fases de edades iniciales, Moradyan *et al*¹⁰⁵., en su estudio evaluaron el efecto de la densidad de población, sobrevivencia y crecimiento de alevinos de trucha arcoíris, por un tiempo de 45 días; el peso inicial fue 131±0,10 mg y longitud inicial de 24±0,2 mm se distribuyeron al azar entre 9 unidades experimentales, con 4,000 (T1); 6,000 (T2) y 8,000 (T3) peces, correspondientes a cargas iniciales de 5,28; 7,80 y 10,56 kg/m³, respectivamente. Los peces fueron alimentados manualmente de 6 a 8 veces al día, hasta un 4% de peso corporal/día. Se obtuvieron los siguientes resultados, la sobrevivencia de alevinos fue: T1 (81%), T2 (84,8%) y T3 (74%) la densidad de siembra no afectó el peso final, tasas de crecimiento específico (TCE) osciló entre 4,05–4,37%/día y conversión alimenticia (CA) varió de 1,1 a 2,3; carga final de 37,68; 50,40 y 64,48 kg/m³ respectivamente para los tratamientos 1, 2 y 3.

Es importante destacar que la tasa de crecimiento específica, obtenidas en la presente investigación, son superiores a las registradas en las que se relacionan a continuación: Mocanu *et al*¹⁰⁶., cuyo propósito de la investigación fue evaluar cómo la densidad de población influye en el crecimiento y rendimiento en la fase de precría en trucha arcoíris (*O. mykiss*) cultivadas en SRA, el experimento se llevó a cabo durante un período de 33 días, los peces iniciaron con peso promedio de 29,51±1,32 g se dividieron en cuatro tratamientos con el fin de evaluar las diferentes densidades: el T1 2,64 kg/m³, con un peso medio de 31,68 g, T2 5,16 kg/m³ con peso promedio de 30,39 g, T3 7,12 kg/m³, con peso promedio de 28,52 g y T4 9,42 kg/m³ con peso promedio de 27,46 g. Al final de la investigación la tasa de crecimiento específico (TCE) calculada presentó una leve disminución de la siguiente manera, T1 3,84%, T2 3,36%, T3 3,20% y T4 3,13%. Demostraron con respecto a los índices productivos que los niveles de carga no afectan el crecimiento, la eficiencia de la alimentación y la retención de nutrientes no fue significativamente afectada por la densidad de población, y se mantuvieron las condiciones adecuadas para el cultivo de trucha arcoíris en sistemas de recirculación.

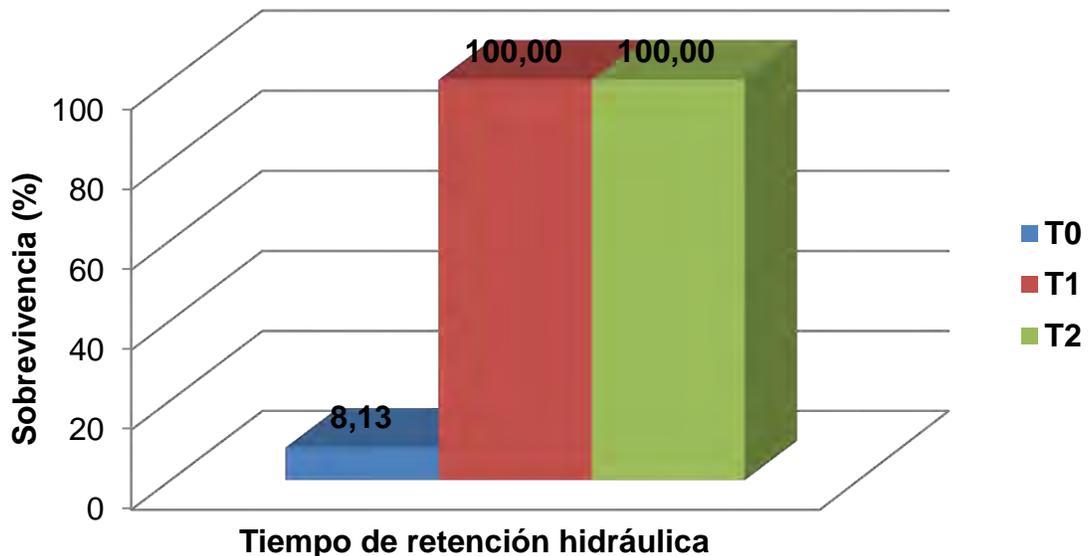
¹⁰⁵ MORADYAN, H., KARIMI, G., SAHRAEIAN, M., ERTEFAAT, S. y SAHAFI, H. The Effect of Stocking Density on Growth Parameters and Survival Rate of Rainbow Trout Alevins (*Oncorhynchus mykiss*). *En*: World Journal of Fish and Marine Sciences 4 (5): Iran. 2012. p. 480-485.

¹⁰⁶ MOCANU, *et al*. Op. cit., p. 326 - 331

5.3. BIENESTAR ANIMAL

5.3.1.Sobrevivencia. En la variable sobrevivencia se aplicó la prueba para homogeneidad de binomiales simples de Snedecor-Irwin¹⁰⁷, para determinar el porcentaje de sobrevivencia influenciado por los tratamientos, por lo tanto como el valor de la chi-cuadrada 331,18 calculada, es mayor que la chi-cuadrada de la tabla ($p < 0,05$ y 8 grados de libertad) 15,50; entonces se concluye que al menos un tratamiento, influye sobre la sobrevivencia de los animales y existen diferencias estadísticas significativas (Figura 20).

Figura 20.Sobrevivencia (%) en el SRA vs aireación convencional.



Los mejores resultados se obtuvieron en T1 y T2 con 100% de sobrevivencia, frente al T0 correspondiente a la aireación convencional con 8,13%; este resultado ocasionado por que no existieron recambios de agua, por lo tanto la calidad del agua se vio afectada por el incremento de las concentraciones de contaminación de sólidos, materia orgánica y compuestos nitrogenados; por lo tanto esto coincide con los incrementos de peso más bajos, conversiones alimenticias altas y bienestar animal en condiciones desfavorables; incrementando la mortalidad, debido a que los peces al estar limitados a un ambiente artificial, no tienen la

¹⁰⁷ SNEDECOR, G. y COCHRAN W. Analisis of frecuencies in one.way and two-way classifications. 196 – 213 p. En: Statistical Methods, Iowa State University Press, 1980. 507 p.

posibilidad de buscar espacios libres del agente estresor por lo que han de estar sometidos a las condiciones establecidas en los sistemas de producción como lo propone Eslava-Mocha¹⁰⁸. También se ha señalado al oxígeno y amoníaco; como los parámetros de calidad del agua más importantes generados por efectos de la densidad, un aumento de la densidad pueden reducir los niveles de oxígeno disuelto y aumentar el amoníaco no ionizado dependiendo del pH, estos actúan como factores de estrés crónicos en la trucha arcoíris, elevando los niveles de cortisol en plasma sanguíneo y por consiguiente las tasas de crecimiento disminuyen hasta llegar a ser nulas (no se ingiere alimento). Igualmente el exceso de sólidos obstruyen las branquias evitando la sinapsis, y por consiguiente aumentando la mortalidad, como lo demuestran Laursen *et al*¹⁰⁹.

En los tratamientos T1 y T2, se obtuvo el 100% de sobrevivencia, que es consistente con los resultados anteriores, si se considera que estos tratamientos presentaron los mayores incrementos de pesos y las mejores conversiones alimenticias. Lo anterior se explica porque se brindó los recambios adecuados, y se mantuvo la calidad del agua de acuerdo a lo requerido por la especie como lo recomienda Colt, *et al*¹¹⁰. Los resultados de la presente investigación, están acordes con los reportadas en cultivos de trucha arcoíris en sistemas de recirculación similares, Mocanu *et al*¹¹¹, Docan *et al*¹¹², demuestran en su investigación con inicio de carga de 10 kg/m³ y peso inicial de 29,51 g y al cabo de 33 días finalizó con una carga de 26,42 kg/m³ y peso 77,04 g, obteniendo resultados del 100% de sobrevivencia. Igualmente García-Criollo *et al*¹¹³, obtuvieron sobrevivencias del 94% al final del periodo en un SRA, lo cual se puede explicar por la mayor biomasa por metro cúbico, incrementándose el consumo de oxígeno disuelto, como la producción de amonio y el deterioro de la calidad de agua. Por lo tanto el tiempo de retención hidráulica en un SRA no afecta la sobrevivencia.

5.3.2.Necrosis de las aletas. En el inicio de la investigación, en cuanto a la valoración de las aletas dorsal, pectoral y caudal, no se presentaron diferencias

¹⁰⁸ ESLAVA-MOCHA P. Una aproximación sistémica a las enfermedades de peces dulceacuícolas de Colombia. En: Memorias, XIV Jornada de Acuicultura, Sanidad y producción de peces. Universidad de los Llanos. Octubre 10 del 2008 Villavicencio. p. 45.

¹⁰⁹ LAURSEN D. PATRICIA I. BODIL S. LARSEN K y HÖGLUND E. High oxygen consumption rates and scale loss indicate elevated aggressive behavior at low rearing density, while elevated serotonergic activity suggests chronic stress at high rearing densities in farmed rainbow trout. En: Journal: physiology & Behavior Revision submitted. 2013. p. 23 – 33. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com>.

¹¹⁰ COLT, *et al*. Op. cit., p. 372-385.

¹¹¹ MOCANU, *et al*. Op. cit., p.326 – 331.

¹¹² DOCAN, *et al*., Op. cit., p. 536 – 541

¹¹³ GARCIA-CRIOLLO, *et al*., Op. cit., p. 29

estadísticas significativas iniciando con valores superiores al 90% de aletas que no poseían ningún grado de necrosis (Anexo 6); con base en lo anterior todos los tratamientos evaluados iniciaron en las mismas condiciones de bienestar animal, de acuerdo con el clasificación de Hoyle *et al*¹¹⁴., quienes recomiendan una escala para medir las necrosis, el grado 0 correspondiente a aletas sin necrosis (>70% buen estado), del grado 1 al 4, corresponde a; necrosis leve (1–24% de la aleta necrosada), necrosis moderada (25–49% de la aleta necrosada) y necrosis peligrosa (>50% de la aleta necrosada).

•**Necrosis de la aleta dorsal.** Los resultados obtenidos para la necrosis de la aleta dorsal grado 0 y 1 en promedio, en el análisis de varianza ($p < 0,05$), demostró que existen diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos (Anexo 7 y 8). Igualmente la prueba de Tukey al 95% de confiabilidad (Anexo 7 y 8), determinó que, las aletas dorsales encontradas en buen estado al finalizar la investigación, corresponden al T0 con 50%, seguido por T1 36% frente al T2 con 24,64% donde se registró el menor valor, traduciéndose a menor cantidad de animales que no presentan necrosis como se muestra en la Figura 23 A.

En el grado de necrosis 1, correspondiente a 39,44%, 42,66% y 55,66% para los tratamientos T0, T1 y T2 respectivamente (Figura 23 B). En los grados de necrosis de aleta dorsal 2, 3 y 4 no se presentaron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos (Anexo 9, 10 y 11), estos grados se encuentran en valores menores al 25% que se traduce en una necrosis leve, de acuerdo a la clasificación de Hoyle *et al*¹¹⁵. Datos similares son presentados por Cañon *et al*¹¹⁶., quienes en su estudio compararon un tratamiento control y un tratamiento con restricción alimenticia, evaluando el bienestar animal por medio de las aletas, encontraron para el grado 0 de 83,4 y 51,2%, grado 1 de 16,6 y 25%, respectivamente, mientras que el grado 2 (16,6%) y 3 (7,2%) solo se presentaron en el ensayo de restricción alimenticia.

Si una aleta posee necrosis, por lo general las demás aletas tienen algún grado de afección, como lo demuestran St-Hilaire *et al*¹¹⁷., quienes compararon el bienestar

¹¹⁴ HOYLE, et al. Op. cit., p. 142–148

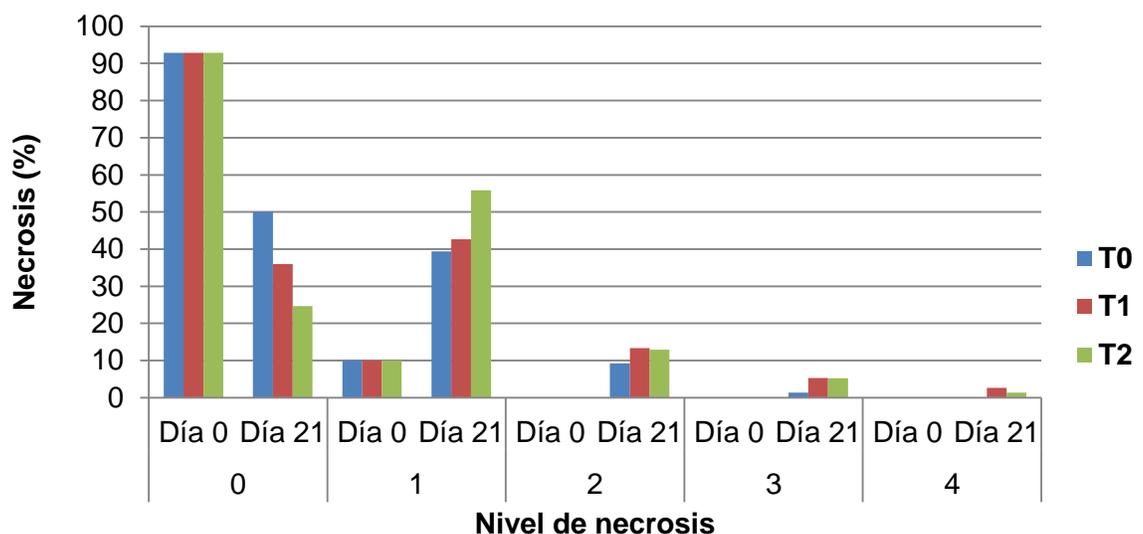
¹¹⁵ Ibid., p. 142–148

¹¹⁶ CAÑÓN, H., NOBLE, C., DAMSGÅRD, B. y PEARCE, G. Social network analysis of the behavioural interactions that influence the development of fin damage in Atlantic salmon parr (*Salmo salar*) held at different stocking densities. *En: Applied Animal Behaviour Science* 133. 2011. p. 117– 126. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/applanim>

¹¹⁷ ST-HILAIRE S. ELLIS A. COOKE B. NORTH P. TURNBULL F. KNOWLES T y KESTIN S. Fin erosion on rainbow trout on commercial trout farms in the United Kingdom. *En: veterinaryrecord.bmj.com* on January 7, 2012. p. 447 – 452. Disponible en: <http://www.journals.bmj.com/cgi/reprintform>

animal de diferentes granjas por medio de la necrosis de las aletas, observaron que existió diferencias en la aleta dorsal, con variación del 40 al 50% (necrosis moderada) para los diferentes grados; en las otras aletas no existieron diferencias significativas; también compararon con truchas salvajes, en ellas no se presentó grados de necrosis elevados pero si valores menores al 25% (necrosis leve). Igualmente Roque d'Orbcastel *et al*¹¹⁸, demostraron resultados en sistemas de recirculación, y concluyen que el deterioro de la aleta dorsal no fue significativo el nivel predominante fue el grado 1. Por consiguiente los TRH no generan necrosis de la aleta dorsal en sistemas de recirculación acuícola.

Figura 21. Niveles de necrosis de la aleta dorsal (%), en trucha arcoíris, en el SRA vs aireación convencional



Turnbull *et al*¹¹⁹, concluyen que a medida que aumenta la carga (kg/m^3) la necrosis de las aletas es más elevada, influyendo en el bienestar de los animales, en la investigación iniciaron con carga de $9,7 \text{ kg/m}^3$ y finalizaron con cargas de 22 kg/m^3 ; las aletas estaban necrosadas en el rango mayor al 70% en cultivos comerciales de *Salmo salar*. Igualmente estos datos no se pueden extrapolar a otros cultivos debido a que cada explotación acuícola posee diferentes características de las variables involucradas.

¹¹⁸ ROQUE D'ORBCASTEL, *et al.*, Op. cit., p. 79–86.

¹¹⁹ TURNBULL, J., BELL, I., ADAMS, C., BRON, J., y HUNTINGFORD, F. Stocking density and welfare of cage farmed Atlantic salmon: application of a multivariate analysis. *Aquaculture* 243 (2005) p. 121– 132. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/aqua-online>

•**Necrosis de las aletas pectorales.** Los resultados obtenidos para la prueba de análisis de las aletas pectorales, de los diferentes grados de necrosis 0, 1, 2, 3 y 4, demostraron en el análisis de varianza que no existen diferencias estadísticas significativas, puesto que ningún valor p es menor que 0,05, por lo tanto ninguno de los TRH tiene efecto sobre la necrosis de las aletas pectorales para los diferentes grados con un 95% de nivel de confianza (Anexo 13 hasta 17).

Figura 22. Niveles de necrosis de la aleta pectoral (%), en trucha arcoíris, en SRA vs aireación convencional

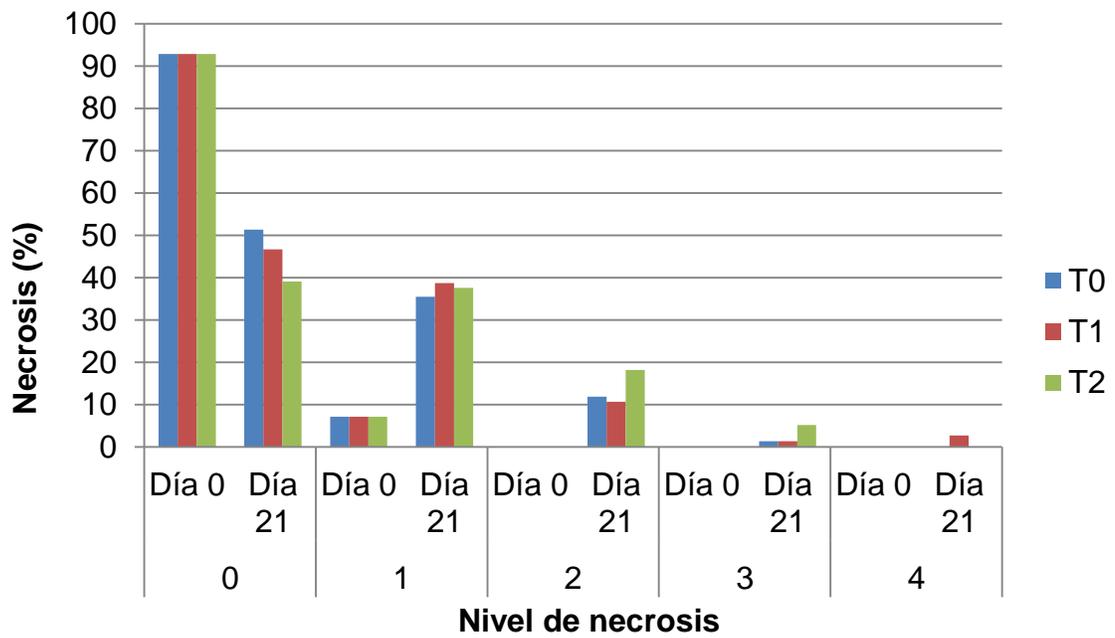
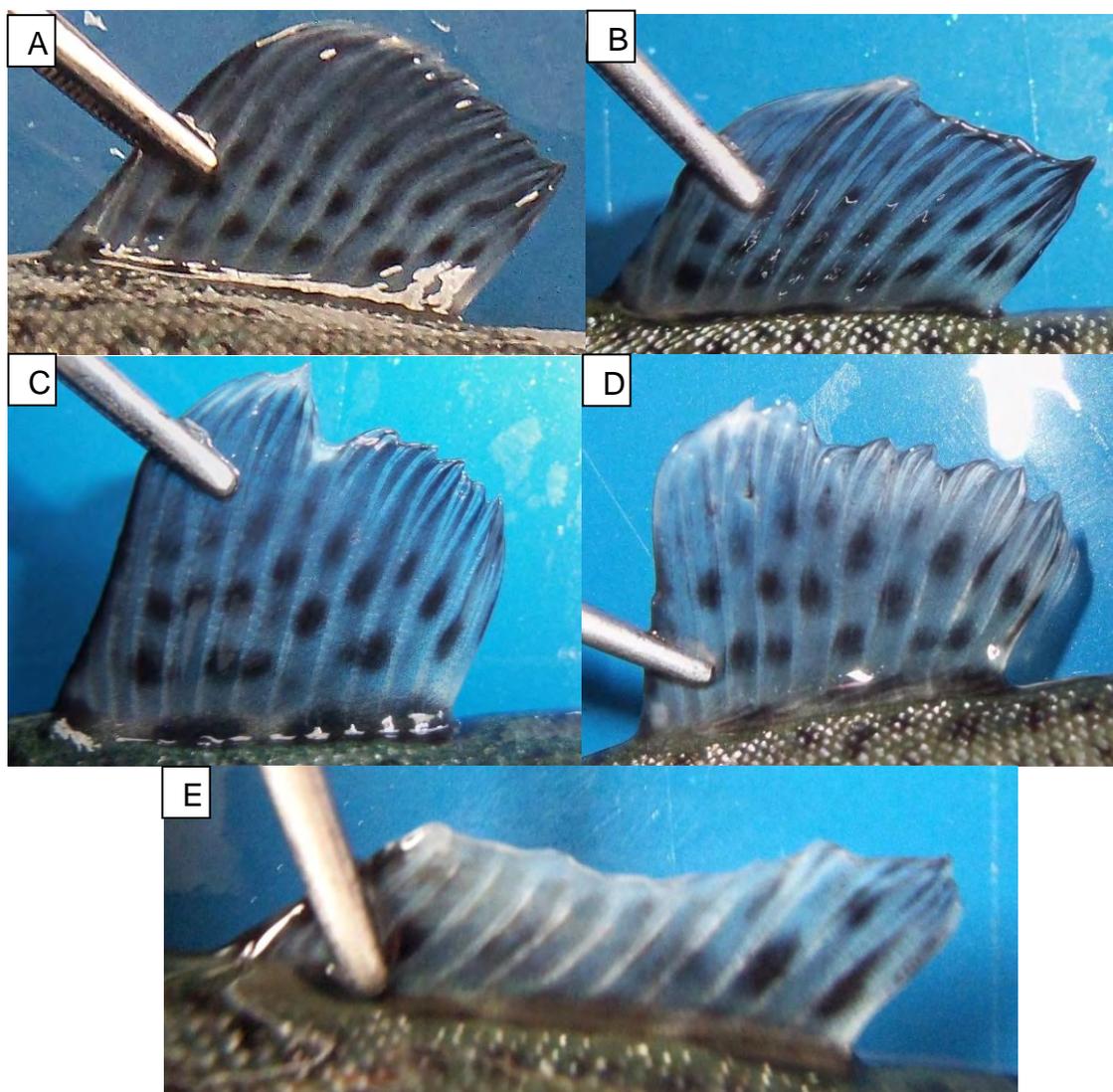
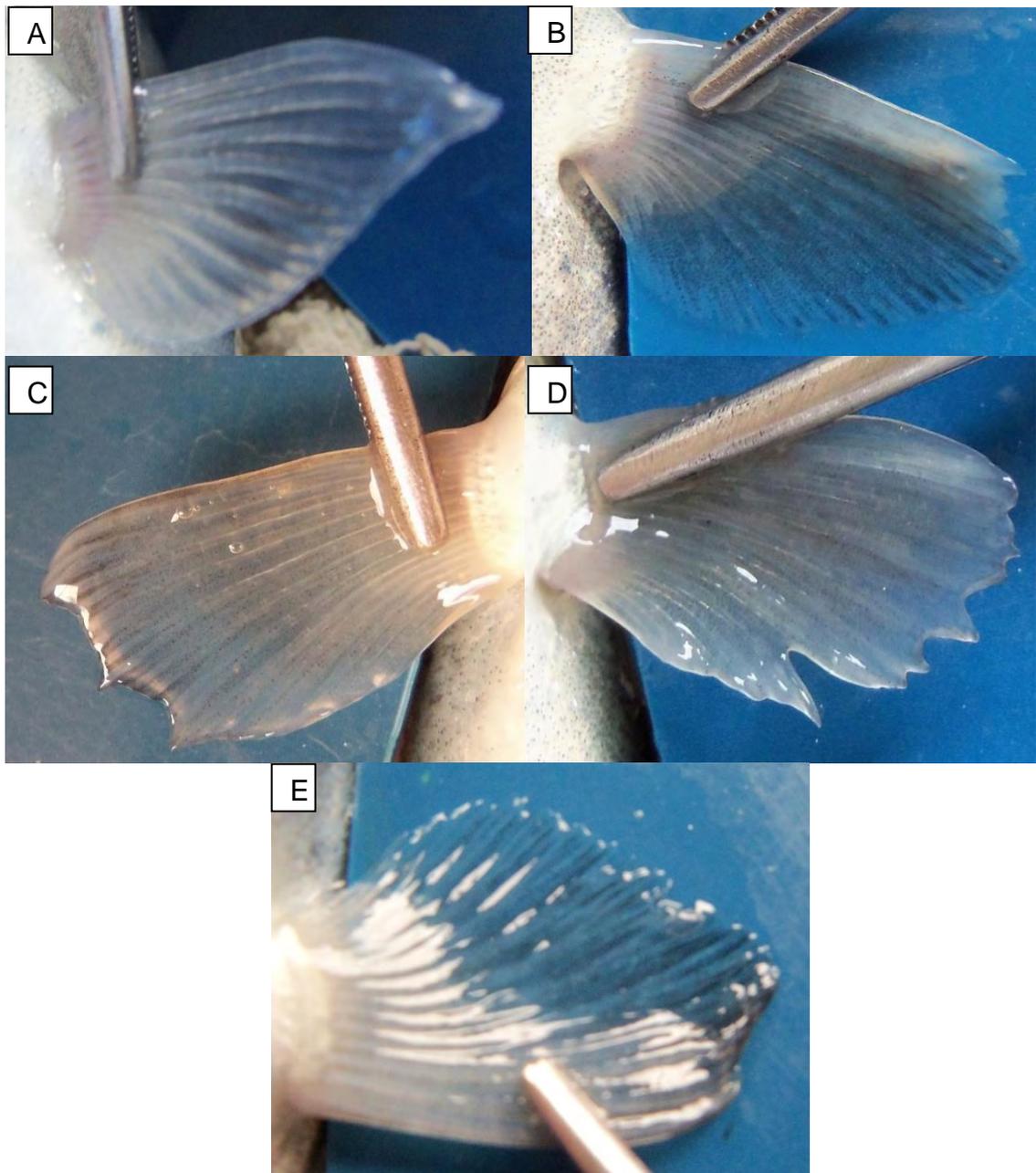


Figura 23. Niveles de necrosis de la aleta dorsal.



En la Figura 23, se observa los niveles de necrosis de la aleta dorsal, A. nivel 0 (No existe necrosis), B. Nivel 1(Radio 11 al 8), C. Nivel 2 (Radio 7 al 5), D. Nivel 3 (Radio 4 al 1), E. Nivel 4 (Radio 12 al 1).

Figura 24. Niveles de necrosis de la aleta pectoral.

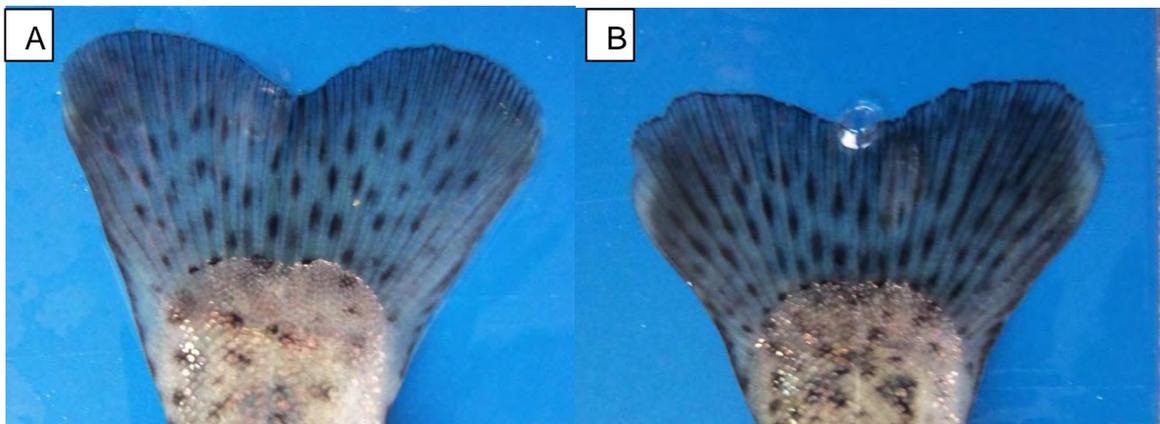


En la Figura 24, se observa los niveles de necrosis de la aleta pectoral, A. nivel 0 (Radio 1 al 3), B. Nivel 1 (Radio 4 al 6), C. Nivel 2 (Radio 7 al 9), D. Nivel 3 (Radio 10 al 12), E. Nivel 4 (Radio 13 al 14).

En los tratamientos T0, T1 y T2 para el análisis de necrosis de las aletas pectorales, el nivel predominante es el 1 (Figura 24 B), correspondiente a 35,48%, 37,58% y 38,66% respectivamente; estos porcentajes se encuentran dentro del rango de necrosis moderada (25 a 49%). El grado de necrosis 2, 3 y 4 (Figura 24 C D y E) se presenta en el T1 y T2 en un nivel de necrosis leve menor al 25%. Datos similares fueron obtenidos por Roque d'Orbcastel *et al*¹²⁰., el nivel más predominante es el 1, correspondiente al 57% vs 64% en SRA y un sistema abierto respectivamente. St-Hilaire *et al*¹²¹., demuestran en su estudio que los grados de necrosis 2, 3 y 4, se encontraron en nivel de necrosis moderada entre el 25 y 49%. Maclean *et al*¹²²., encontraron que el nivel más predominante es el 1 con un porcentaje de necrosis de 30 al 60% para las aletas pectoral y dorsal.

•**Necrosis de la aleta caudal.** Los resultados obtenidos para la prueba de análisis de las aletas caudales, de los diferentes índices de mercado A y B (Figura 25. A y B) demostraron en el análisis de varianza que no existen diferencias estadísticas significativas, puesto que ningún valor p es menor que 0,05, por lo tanto ninguno de los factores tiene un efecto significativo sobre la necrosis de la aleta dorsal para los diferentes grados con un 95% de nivel de confianza (Anexo 19 y 20).

Figura 25. Niveles de necrosis de la aleta caudal



En la Figura 25 se observa los dos niveles de necrosis de la aleta caudal, A y B.

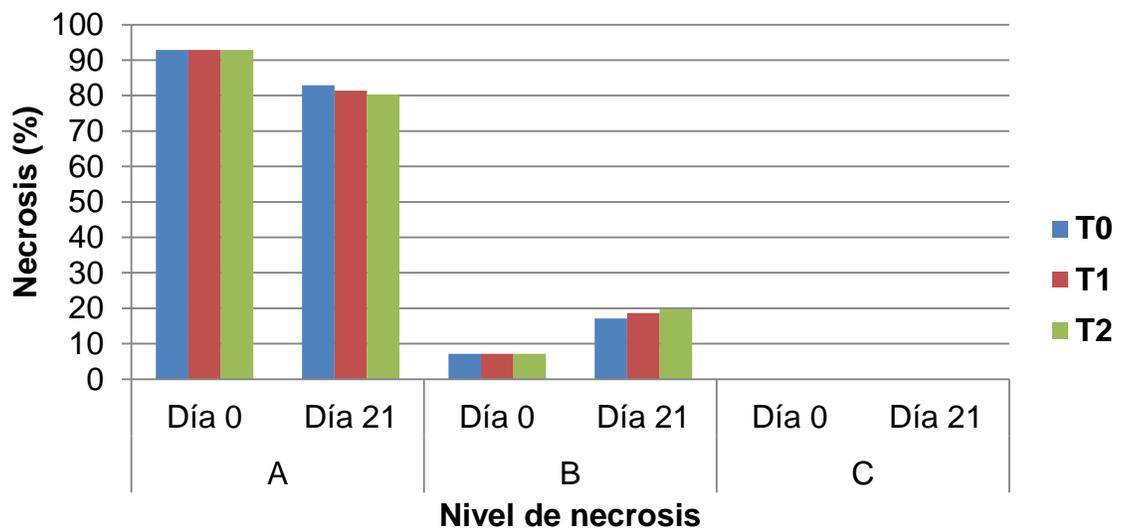
¹²⁰ ROQUE D'ORBCASTEL E, *et al*. Op. cit., p. 79–86.

¹²¹ ST-HILAIRE, *et al*. Op. cit., p. 447 – 452.

¹²² MACLEAN, A., NEIL, B., METCALFE, A., y MITCHELL, D. Alternative competitive strategies in juvenile Atlantic salmon *Salmo salar*: evidence from fin damage. *En*: Aquaculture 184 2000. p. 291–302. Disponible en: <http://www.elsevier.nl/locateraqua-online>

En los tratamientos T0, T1 y T2 el nivel de necrosis predominante es el A, correspondiente a un nivel de 82,87%, 81,33% y 80,29% respectivamente, seguido por el nivel B, T0 con 17,12 el T1 con 18,66 y T2 con 19,70 los cuales son menores al 20%; el nivel C no se encontró en esta investigación, en condiciones similares de sistemas de recirculación, Roque d'Orbcastel *et al*¹²³, observaron un alto grado de necrosis de aleta caudal del nivel B, en sistemas de recirculación del 50% vs 20% en flujo abierto, independientemente de la densidad de población, que podría estar relacionado con la mayor velocidad del agua, no se observó un comportamiento agresivo en los ensayos, no existió marcas de mordeduras en las extremidades. Por lo tanto el porcentaje de necrosis de la aleta caudal es más elevado en un SRA que en sistemas abiertos para cultivo de trucha.

Figura 26. Niveles de necrosis de la aleta caudal (%), en trucha arcoíris, en SRA vs aireación convencional.



Durante la evaluación se observó jerarquía, “las truchas más grandes tienen hasta seis veces más probabilidades de tener aletas dañadas que los peces más pequeños”¹²⁴, porque el pez dominante compite agresivamente entre sí y conlleva a daños en las aletas, mientras que los individuos menos agresivos (talla pequeña) adoptan estrategias de alimentación alternativas que resultan en niveles más bajos de consumo de alimento y bajo crecimiento; pero reducen el riesgo de

¹²³ ROQUE D'ORBCASTEL E, *et al.* Ibid. p. 79–86.

¹²⁴ MACLEAN, *et al.* Op. cit., p. 291–302.

lesiones. Laursen *et al*¹²⁵., demuestran que existen varios efectos perjudiciales de la conducta agresiva en los aspectos del bienestar como necrosis de las aletas, lesión del cuerpo y el estrés social. La pérdida de apetito, suprime la tasa de crecimiento, elevando las tasas metabólicas, la enfermedad y la mortalidad. Además, la mala calidad del agua ha sido correlacionada con la aumento de la severidad de la necrosis de las aletas, aunque las interacciones agresivas se han destacado como la causa primaria.

Las principales causas de la necrosis de las aletas son: la abrasión con superficies rugosas, daños por confrontaciones agresivas, deficiencias nutricionales, y la infección bacteriana; por lo general varias de las causas anteriores existen simultáneamente¹²⁶. Las altas densidades generan conductas agresivas (abrasión, choque y obstrucción), y un aumento en la necrosis de la aleta dorsal y caudal, y daños branquiales, reduciendo la ingesta de alimento, y aumento de la mortalidad como lo demuestran Ellis *et al*¹²⁷., Abbott y Lawrence¹²⁸, en sistemas similares de cultivos de trucha.

La necrosis de las aletas es empleada a menudo como un indicador de bienestar de los peces, aunque la etiología de la necrosis de las aletas no es completamente entendida y se supone que existe un complejo proceso multifactorial, ciertas condiciones ambientales, incluido el aumento de densidad de población y los altos niveles de sólidos, compuestos nitrogenados, se consideran como los factores que potencializan la necrosis de las aletas como lo reportan investigaciones similares de Good *et al*¹²⁹., y Latremouille¹³⁰. “El comportamiento agresivo, como mordidas también ha demostrado que es una causa directa de la necrosis de las aletas”¹³¹.

¹²⁵ LAURSEN D. ANDERSSON M. SILVA P. PETERSSON E Y HÖGLUND E. Utilising spatial distribution in two-tank systems to investigate the level of aversiveness to crowding in farmed rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*. *En: Applied Animal Behaviour Science* 144 2013 p. 163– 170. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/applanim>

¹²⁶ LATREMOUILLE, D. Fin erosion in aquaculture and natural environments. *En: Reviews in Fisheries Science*, 11 (4). 2003 p. 315 -335

¹²⁷ ELLIS, T., NORTH, B., SCOTT, A., BROMAGE, N., PORTER, M. y GADD, D. The relationships between stocking density and welfare in farmed rainbow trout. *J. Fish Biol.* 61, 2002, 493-531.

¹²⁸ ABBOTT, J. y LAWRENCE, M. Patterns of Aggressive Attack in Juvenile Steelhead Trout (*Salmo gairdneri*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 42(11): 1985, p. 1702-1706

¹²⁹ GOOD, C., DAVIDSON, J., WELSH, C., SNEKVIK, K. y SUMMERFELT, S. The effects of ozonation on performance, health and welfare of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* in low-exchange water recirculation aquaculture systems. *En: Aquacultural Engineering* 44 2011 p. 97– 102. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/aqua-online>

¹³⁰ LATREMOUILLE, Op. cit., 2003 p. 315 -335

¹³¹ ABBOTT J y LAWRENCE M., Op. cit., p. 1702-1706.

5.4.MONITOREO DE PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DE LA CALIDAD DEL AGUA

López-Macías *et al*¹³²., manifiestan que el agua para consumo animal o humano debe ser química y biológicamente pura. Esta pureza misma hace que sobre ella no se desarrollen microorganismos y vegetales. Cuando ésta se enriquece de calcio, magnesio, sodio y principalmente de fósforo, se dice que se ha eutrofizado, comenzando el desarrollo de todo tipo de organismos, los cuales la vician, tomando el oxígeno (aumento de la DBO); aportando materia orgánica que para su descomposición requiere de oxígeno (DQO); aumentando el contenido de dióxido de carbono y a su vez la acidez. El resultado final de esta alteración es la falta de oxígeno para peces y la impotabilidad para su consumo por el hombre.

De otro lado, Summerfelt *et al*¹³³., aseguran que la producción de peces dentro de cualquier sistema artificial basado en la implementación de tanques como unidades de cultivo, está limitado por la disponibilidad de oxígeno disuelto y por la densidad de peces por unidad de volumen de agua utilizada. Si el oxígeno disuelto no es limitado dentro del sistema productivo; el agua podrá ser reutilizada siempre y cuando las concentraciones de dióxido de carbono, amoníaco, nitritos, y sólidos suspendidos totales, se puedan controlar en niveles seguros para las especies.

En la Tabla 17 se muestran los valores promedio obtenidos para cada uno de los parámetros físicoquímicos del agua evaluados en esta investigación durante el periodo de estudio.

¹³² LÓPEZ-MACÍAS, J., SALAS-BENAVIDES, J., GOMEZ-NIEVES, V., GÓMEZ-CERÓN, A., LÓPEZ-ERASO, H., ORTEGA-SALAS, A., SANGUINO-ORTÍZ, W., BELTRÁN-TUMAL, D., LÓPEZ-MORENO, W., PAZ-ARGOTY, M., GAMEZ-CASTRILLÓN, A. y GUERRERO-ROMERO, C. Diagnóstico del estado de trofización, según la variabilidad físicoquímica, bacteriológica y fitoplanctónica del lago Guamuez y su interrelación con la producción de trucha arcoíris en jaulas flotantes. Departamento de Recursos Hidrobiológicos, Universidad de Nariño, Pasto, Colombia. 2008. 36 p.

¹³³ SUMMERFELT, S., DAVIDSON, J., WALDROP, T., TSUKUDA, S. y BEBAK-WILLIAMS, J. A partial-reuse system for coldwater aquaculture. The Conservation Fund Freshwater Institute. En: Aquacultural Engineering 31. 2004. p. 157–181.

Tabla 17. Parámetros fisicoquímicos promedio obtenidos para los tratamientos durante el período de estudio.

PARAMETROS	T0	T1	T2
Oxígeno disuelto (mg/L)	5,79±0,22 ^b	5,06±0,31 ^a	5,11±0,33 ^a
Temperatura (°C)	14,83±0,35 ^b	17,05±0,44 ^a	17,03±0,39 ^a
pH	8,31±0,14 ^b	7,8±0,16 ^a	7,81±0,14 ^a
Conductividad (µs/cm)	318±38,27 ^b	479±50,65 ^a	480±51,5 ^a
NAT (mg/L)	19,64±6,7 ^a	17,64±4,3 ^a	16,51±3,48 ^a
Amonio (mg/L)	10,52±10,51 ^b	0,57±0,32 ^a	0,53±0,29 ^a
Nitritos (mg/L)	0,22±0,23 ^a	0,38±0,17 ^a	0,38±0,17 ^a
Nitratos (mg/L)	3,42±1,41 ^b	10,16±3,47 ^a	10,12±3,45 ^a
Alcalinidad total (mg/L)	135,54±32,12 ^b	88,08±11,69 ^a	86,55±9,56 ^a
DBO ₅ (mg/L)	18,23±3,93 ^b	4,53±0,16 ^a	4,78±0,09 ^a
DQO (mg/L)	96,37±20,62 ^a	102,59±9,47 ^a	103,63±11,13 ^a
Sólidos suspendidos (mg/L)	79,01±7,51 ^a	75,74±9,43 ^a	75,56±8,33 ^a
Sólidos disueltos (mg/L)	210,33±29,04 ^a	229,62±24,14 ^a	223,92±24,93 ^a
Sólidos totales (mg/L)	335,11±54,99 ^b	368,03±35,34 ^a	368,97±35,35 ^a

^a: no existen diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$)

^b: existen diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$)

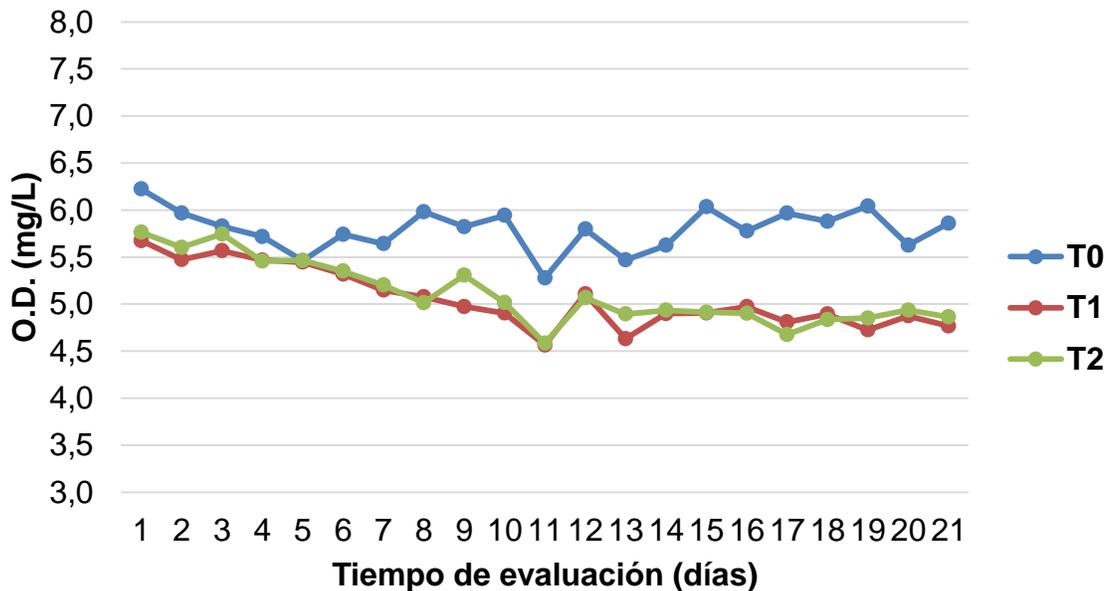
5.12.1. Oxígeno disuelto. En los resultados promedio obtenidos para el oxígeno disuelto, el análisis de varianza ($p < 0,05$) determina que existen diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos (Anexo 21). De la misma manera, la prueba de Tukey al 95% de confiabilidad (Anexo 21) establece que el mejor es el tratamiento 0 con 5,73±0,64 respecto al T1 con 5,06±0,42 y el T2 con 5,11±0,37 mg/L de oxígeno disuelto.

Como se puede apreciar en la Figura 27, el oxígeno disuelto en los tres tratamientos se mantuvo dentro de los límites requeridos por la especie. Sin embargo el valor más alto prevaleció para el tratamiento 0 (sin recambio); lo cual se puede explicar debido a la elevada mortalidad presentada en este tratamiento, por cuanto a medida que los animales iban muriendo, la carga, la población y por ende el suministro de alimento disminuían, lo que conllevó a más disponibilidad de oxígeno disuelto para los animales que lograron sobrevivir. Lo anterior es corroborado por Macityre *et al*¹³⁴, quienes consideran que el consumo de oxígeno

¹³⁴ MACITYRE, C., ELLIS, T., NORTH, B. y TUMBULL, J. The influences of water quality on the welfare of farmed rainbow trout: a review. En: "Fish Welfare". Editado por Branson, E.J. Blackwell Publishing Ltd. Oxford, U.K. 2008 p. 311.

es proporcional al tamaño y la densidad de los peces; y que cuando estos son pequeños, o se encuentran en etapas de larvas y huevos consumen más oxígeno por unidad de peso que los peces en etapa de finalización.

Figura 27. Comportamiento del oxígeno disuelto en el SRA vs aireación convencional



Por otro lado, Mocanu *et al*¹³⁵, aseguran que la concentración de oxígeno disuelto varía de acuerdo a la densidad de siembra que se tenga en las unidades de cultivo. Estos autores reportan estudios donde obtuvieron valores promedio de $(5,51 \pm 0,95 \text{ mg/L})$ para una carga de $9,42 \text{ kg/m}^3$, y de $(5,93 \pm 1,01 \text{ mg/L})$ manejados en una carga de $7,12 \text{ kg/m}^3$. La variación más alta se obtuvo con una carga de $5,16 \text{ kg/m}^3$, encontrando rangos de $6,20 \pm 0,58 \text{ mg/L}$ de oxígeno disuelto. Además, proponen que para la especie *O. mykiss*, la variable oxígeno disuelto representa el principal factor limitante en el cultivo y, por esta razón; cualquier desviación del intervalo recomendado puede tener graves consecuencias en el ciclo de producción.

¹³⁵ MOCANU, *et al.* Op. cit., p.326 – 331.

Timmons *et al*¹³⁶, establecen que la falta de oxígeno disuelto se constituye como la principal razón por la cual la mayoría de peces mueren, ya que es consumido por el flujo de agua. Lo anterior se puede explicar debido al metabolismo de los peces, ya que el oxígeno es consumido a una tasa relativamente alta, y este es transportado por el flujo del agua, causando bajas concentraciones inherentes de oxígeno, por lo que se requieren altos flujos para transportar el oxígeno necesario.

Wheaton¹³⁷, establece que el consumo de oxígeno en los sistemas de cultivo de peces, depende de muchas variables asociadas a la especie en cultivo, como lo son la temperatura, la población bacteriana, el stress y el tamaño del pez entre otras, y establece un rango óptimo de oxígeno disuelto entre 4 y 5 mg/L. Igualmente afirma que la demanda de oxígeno en muchos sistemas de recirculación es alta debido a la acción bacteriana a la hora de descomponer residuos de materia orgánica, para lo cual se debe contar con un adecuado sistema de aireación u oxígeno puro. El autor establece que la demanda de oxígeno en el ambiente de cultivo debe ser 1,5 veces mayor a la demanda requerida por la especie, lo cual está sujeto a factores presentados en el sistema de recirculación como enfermedades y stress, en donde dicho requerimiento puede incrementarse a cuatro veces más del requerimiento normal.

5.4.2. Temperatura. En los resultados promedio obtenidos para la temperatura, en el análisis de varianza ($p < 0,05$), se demostró que existen diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos (Anexo 22). Igualmente la prueba de Tukey al 95% de confiabilidad (Anexo 22), determina las más adecuadas en el T1 con $17,04 \pm 0,35$, T2 con $17,02 \pm 0,34$ frente al T0 con $14,97 \pm 0,31^\circ\text{C}$.

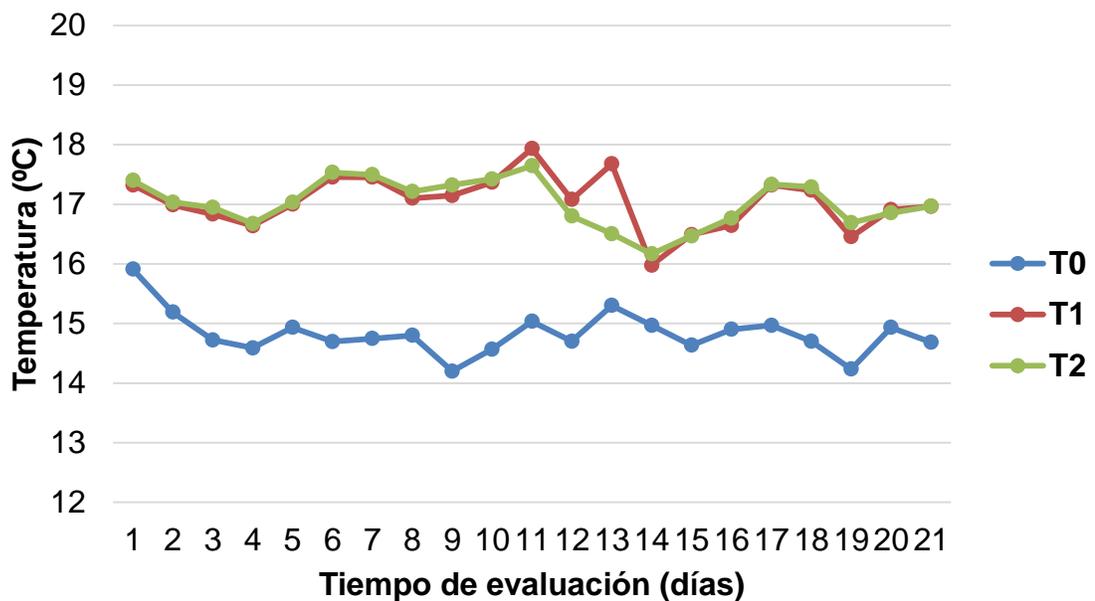
Como se puede observar en la Figura 28, la temperatura se mantuvo estable y dentro de los límites requeridos por la especie. Sin embargo, el T0 (únicamente aireación convencional) reportó el menor valor, lo cual se puede explicar debido a que la unidad de cultivo utilizada para este tratamiento se manejó de manera aislada al SRA, en el que no se contó con motobombas de recirculación, las cuales si se manejaron para las unidades del SRA (T1 y T2), en donde al estar en constante funcionamiento, se generó un leve incremento térmico de $2,06^\circ\text{C}$.

¹³⁶ TIMMONS, *et al*. Op. cit., p. 96.

¹³⁷ WHEATON, F. Recirculating Aquaculture Systems: An Overview of Waste Management. Professor and Chairman. Department of Biological Resources Engineering. University of Maryland. College Park. 2007. p. 3.

Timmons *et al*¹³⁸., aseguran que frente al oxígeno disuelto, la temperatura del agua ocupa el segundo lugar en importancia e impacto en la viabilidad económica en una actividad dedicada a la producción acuícola. La temperatura influye directamente en algunos procesos fisiológicos tales como respiración, eficiencia alimenticia, crecimiento y reproducción. Establecen además un rango de temperatura adecuado para el cultivo de trucha arcoíris, el cual se encuentra entre 15 y 18°C. Por otro lado Sandoval¹³⁹, menciona que la temperatura afecta funciones vitales de los peces como la respiración, el metabolismo y la reproducción. Debido a que las reacciones químicas tienden a incrementar con el aumento de la temperatura, proporcionalmente incrementa también la voracidad de los peces; por ende el autor recomienda que para fines alimenticios, la ración de alimento debe suministrarse entre las 8 y las 9 a.m. y hasta las 4 p.m.; siendo el rango de 11a.m. a 1 p.m., el momento de mayor aprovechamiento del alimento por parte de los peces.

Figura 28. Comportamiento de la temperatura en el SRA vs aireación convencional



¹³⁸ TIMMONS, *et al*. Op. cit., p. 31.

¹³⁹ SANDOVAL, J. Fundamentos de piscicultura continental y calidad de aguas naturales. Fundación Eco-Ambiental de Colombia. Universidad del Cauca. Popayán. 2007. p. 15.

Said¹⁴⁰, establece que la temperatura ambiente tiene influencia sobre todos los aspectos de la fisiología de los peces; no obstante, estos toleran temperaturas diferentes a la ideal por medio de un ajuste metabólico y termorregulación comportamental de manera que cuando la temperatura aumenta por encima de los límites tolerables, la tasa de alimentación disminuye para poder ser completamente inhibida en bajas temperaturas. También asegura que existen dos elementos relacionados a la temperatura que afectan el crecimiento y la sobrevivencia de los peces; la relación entre la temperatura, el metabolismo y la eficiencia de la conversión alimenticia durante largos períodos de tiempo y la tolerancia térmica de los peces a temperaturas letales en periodos cortos; siendo estos dos aspectos importantes debido a las variaciones ambientales presentadas en picos ocasionales. De otro lado García-Criollo *et al*¹⁴¹, proponen que cambios drásticos de temperatura, afectan la tasa metabólica, y por ende, se presenta mayor consumo de oxígeno.

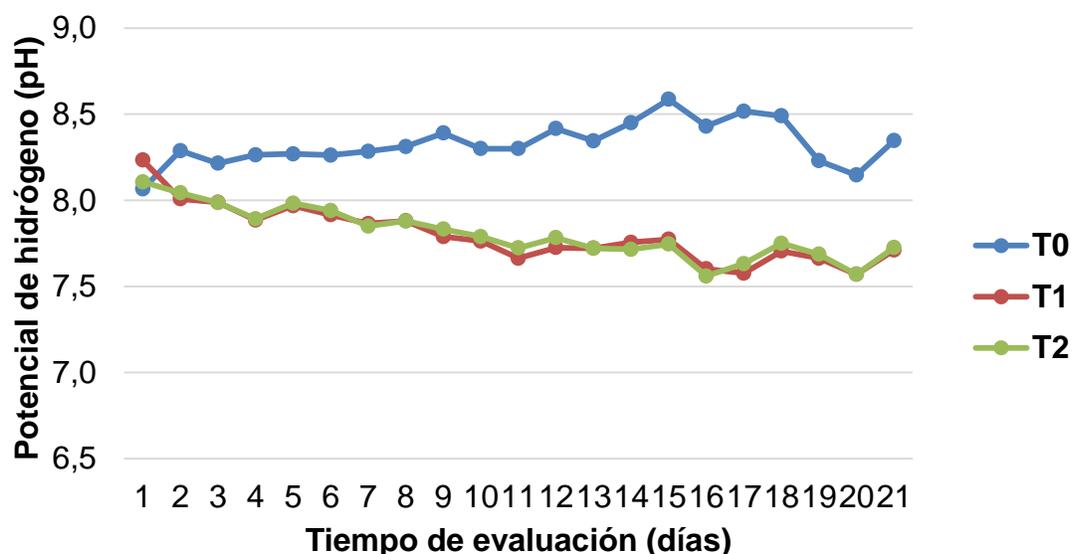
5.4.3.Potencial de hidrógeno (pH). En los resultados promedio obtenidos para pH, en el análisis de varianza ($p < 0,05$), demostró que existen diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos (Anexo 23). Igualmente la prueba de Tukey al 95% de confiabilidad (Anexo 23), determina diferencias entre el T1 con $7,79 \pm 0,05$ y el T2 con $7,8 \pm 0,03$ frente al T0 con $8,25 \pm 0,07$ unidades de potencial de hidrógeno.

Como se puede apreciar en la Figura 29, el pH durante el período de estudio se mantuvo estable y dentro de los límites requeridos por la especie; sin embargo el valor más alto se presentó en el tratamiento 0, lo cual puede explicarse; si se tiene en cuenta que este tratamiento se manejó únicamente con aireación convencional, en el que no existió ningún tipo de recambio, y por ende; se generó una acumulación de materia orgánica producida por las heces excretadas por los peces y por el alimento no consumido en estado de descomposición.

¹⁴⁰ SAID, L. Relação ambiente e sanidade de peixes. Trabalho monográfico do curso de pós-graduação "Lato Sensu" em Medicina de Animais Selvagens e Exóticos apresentado á UCB como requisito parcial para a obtenção de título de Especialista em Clínica Médica e Cirúrgica de Animais Selvagens e Exóticos. Universidade Castelo Branco 2008. p. 38.

¹⁴¹ GARCÍA-CRIOLLO, *et al.* Op. cit. p. 17.

Figura 29. Comportamiento del pH en el SRA vs aireación convencional



De acuerdo con lo expuesto por Timmons *et al*¹⁴², el valor de pH expresa la intensidad de las características básicas o ácidas que tiene el agua. Igualmente aseguran que el pH óptimo para el crecimiento y salud de los animales de agua dulce se encuentra en un rango de 6,5 a 9,0. Said¹⁴³ establece un rango de pH entre 5 y 9, el cual no representa toxicidad para la mayoría de las especies. La autora asegura que algunos contaminantes acuáticos como los metales pueden alterar la calidad del agua modificando el rango de pH; dado que valores por debajo de 5 pueden producir reducción de crecimiento, reducción de la tasa reproductiva e inclusive la mortalidad de la especie.

Por otro lado, García *et al*¹⁴⁴, aseguran que un rango óptimo de pH se encuentra entre 6,5 a 8. Valores por encima o por debajo causan cambios en el comportamiento como inapetencia, letargia, y retraso en el crecimiento y madurez reproductiva. Así mismo Moradyan *et al*¹⁴⁵, reportan rangos de valores de pH que oscilan entre 7,6 a 7,8, asegurando que al no presentarse variaciones significativas de los parámetros físico-químicos del agua, conlleva a que la fuente de agua es perfectamente compatible con los requerimientos de la trucha arcoíris.

¹⁴² TIMMONS, *et al*. Op. cit., p. 34.

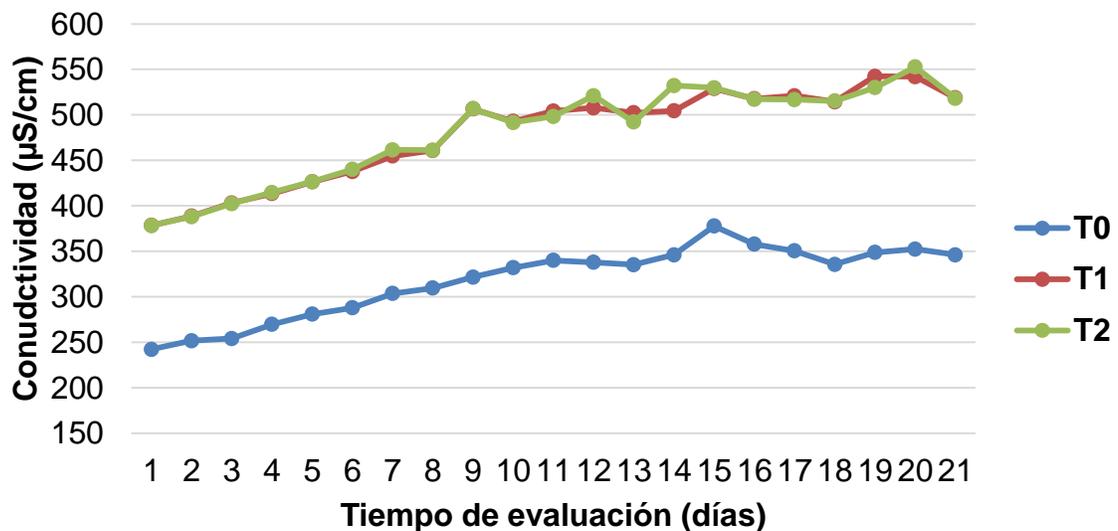
¹⁴³ SAID, Op. cit., p. 34.

¹⁴⁴ GARCÍA, *et al*. Op. cit., p. 17.

¹⁴⁵ MORADYAN, *et al*. Op. cit. p. 480-485

5.4.4. Conductividad. En los resultados promedio obtenidos para la conductividad, en el análisis de varianza ($p < 0,05$) se demuestra que existen diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos (Anexo 24). De la misma manera, la prueba de Tukey al 95% de confiabilidad (Anexo 24), establece diferencias para los tratamientos T1 con $546 \pm 35,92$ y T2 con $547 \pm 38,98$ frente a $418 \pm 9,3$ $\mu\text{S/cm}$ del tratamiento 0.

Figura 30. Comportamiento de la conductividad en el SRA vs aireación convencional.



En la Figura 30 se puede observar el comportamiento de la conductividad durante el período de estudio; presentándose el valor más bajo en el tratamiento 0 (sin recambio). Lo anterior se explica por la alimentación constante suministrada en estas unidades de cultivo, debido a que en ninguno de estos tratamientos se presentó mortalidad, por ende hubo generación constante de materia orgánica y compuestos nitrogenados. Lo anterior es corroborado por los siguientes autores: Yang Zhang *et al*¹⁴⁶, en SRA demuestran que la conductividad indica la acumulación abundante de sólidos disueltos, encontrándose rangos entre 417 y 463 $\mu\text{S/cm}$. Igualmente el CYTED¹⁴⁷, propone que la conductividad se encuentra

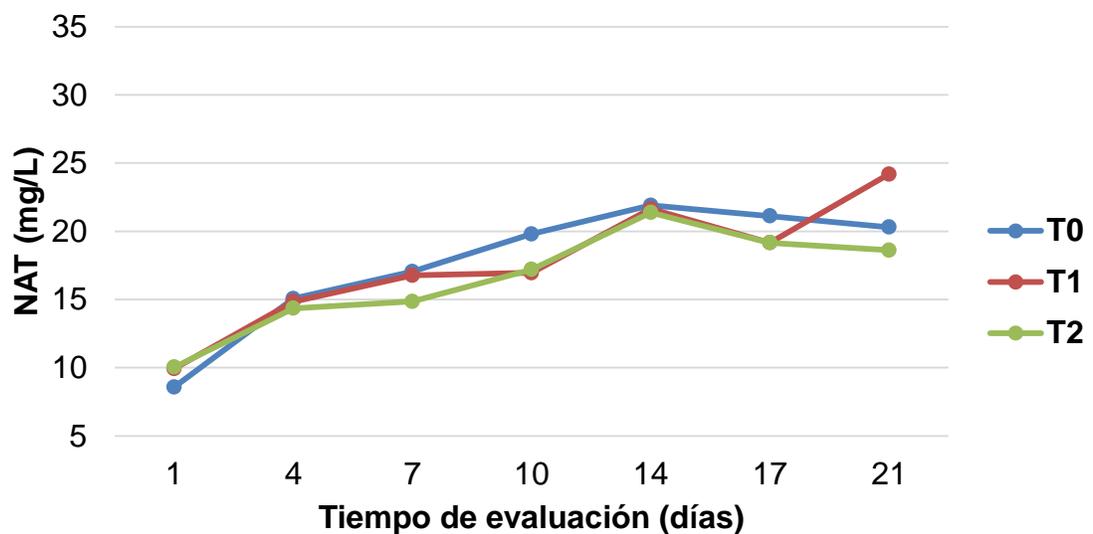
¹⁴⁶ YANG ZHANG, S., LI, G., WUA, H., XING-GUO, L., YAN-HONG, Y., LING, T., HUANG, L. An integrated recirculating aquaculture system (RAS) for land-based fish farming: The effects on water quality and fish production. *En: Aquacultural Engineering* 45 2011. p. 93-102.

¹⁴⁷ PROGRAMA IBEROAMERICANO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA EL DESARROLLO (CYTED). Sistema de recirculación de agua para cría de alevín de trucha arcoíris (*Oncorhynchus*

directamente asociada con los sólidos disueltos totales, y agregan que un rango óptimo para este parámetro es cercano a los 400 mg/L. Goyenola¹⁴⁸, establece un rango de conductividad para sistemas continentales que varía entre 50 y 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

5.4.5. Nitrógeno amoniacal total (NAT). En los resultados promedio obtenidos para el nitrógeno amoniacal total, en el análisis de varianza ($p < 0,05$) se demuestra que no existen diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos (Anexo 25). Los valores medios obtenidos son T0 con $19,64 \pm 6,7$, T1 con $17,64 \pm 4,3$ y T2 con $16,51 \pm 3,48$.

Figura 31. Comportamiento del nitrógeno amoniacal total en el SRA vs aireación convencional



En la Figura 31 se observa el comportamiento del nitrógeno amoniacal total durante el periodo de estudio. Durborow *et al*¹⁴⁹, reportan que la proporción de nitrógeno amoniacal total en su forma tóxica se encuentra estrechamente ligada al

mykiss) y carpa común (*Cyprinus carpio*). Agua potable para comunidades rurales, reúso y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas. Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua. Capítulo 7. p. 7.

¹⁴⁸ GOYENOLA, G. Red de Monitoreo Ambiental Participativo de Sistemas Acuáticos. RED MAPSA. 2007.

¹⁴⁹ DURBOROW, R., CROSBY, D., y BRUNSON M. ammonia in Fish Ponds. Southern Regional Aquaculture Center SRAC. SRAC Publication No. 463. 1997. p.1.

incremento del pH y la temperatura, puesto que por cada incremento en una unidad de estos, la cantidad de amoníaco tóxico aumenta aproximadamente 10 veces.

Se encontró que las altas concentraciones de NAT en las unidades de cultivo se deben a que los peces recibieron alimento balanceado, el cual es fuente constante de nitrógeno, debido a que es excretado a través de las branquias, la orina, la descomposición de las heces y el alimento no consumido por acción bacteriana. Ingle de la Mora *et al*¹⁵⁰, aseguran que el alimento balanceado aporta hasta el 88% del nitrógeno generado en el sistema, y que debido a esto se obtienen altos valores de NAT en las unidades de cultivo. Proponen además, que el recambio de agua diario y los altos niveles de saturación de oxígeno disuelto, pueden contribuir a reducir los niveles de nitrógeno amoniacal total en los tanques de cultivo de un sistema de producción acuícola.

Pereira y Mercante¹⁵¹, aseguran que el NAT aumenta de acuerdo con el incremento de la cantidad de alimento suministrado; para el caso de los peces carnívoros, esta situación puede empeorar debido a los altos niveles de proteína que se encuentran en la dieta, lo que puede influir fuertemente en la dinámica del oxígeno disuelto en el ambiente de cultivo.

5.4.6. Compuestos nitrogenados.

• **Amonio.** En los resultados promedio obtenidos para el amonio, en el análisis de varianza ($p < 0,05$) se demuestra que existen diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos (Anexo 26). De la misma manera, la prueba de Tukey al 95% de confiabilidad (Anexo 26), establece que existen diferencias para los tratamientos, obteniendo el valor más elevado para el T0 con $7,96 \pm 3,71$ seguido por los del SRA T1 con $0,57 \pm 0,32$ y T2 con $0,53 \pm 0,29$. En la Figura 36 se puede apreciar el comportamiento del amonio durante el período de investigación.

En el T0 se observó un incremento acumulativo de 0,36 mg/L en el día uno a 13,35 mg/L en el día 7, ocasionado por la elevada mortalidad presentada, la cual fue mayor al 70%, debido a las condiciones adversas en las que se manejó dicha unidad experimental. Igualmente se puede apreciar que a partir del día 10 la

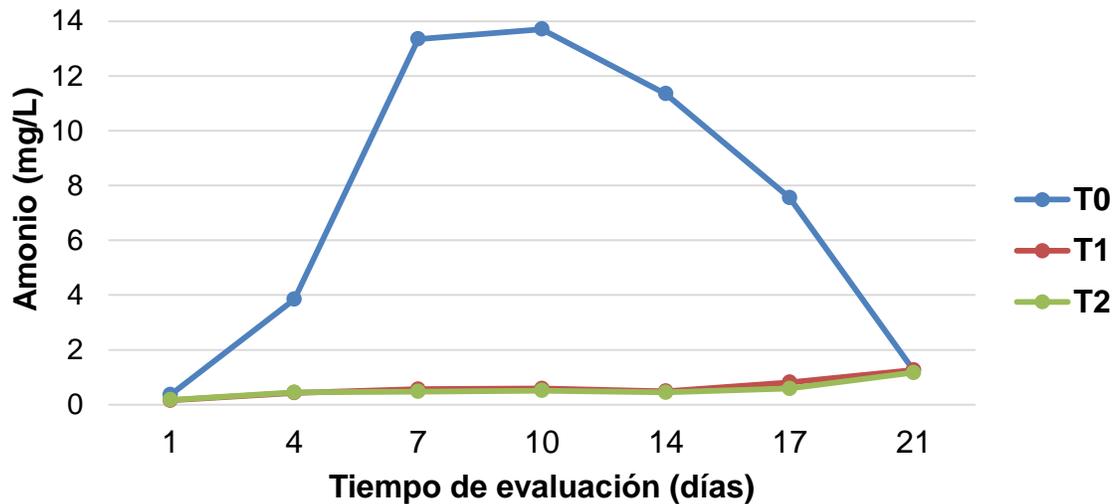
¹⁵⁰ INGLE DE LA MORA. G., VILLAREAL. E., ARREDONDO. J., PONCE. J. y BARRIGA. I. Evaluation of some water quality parameters in a closed aquaculture recirculating-water system, submitted to different loads of fish. *Hidrobiológica* 13 (4): 2003. p. 247-253.

¹⁵¹ PEREIRA y MERCANTE. Op. cit., p. 84.

concentración de este compuesto tóxico empieza a disminuir llegando a valores admisibles para la especie en cultivo. Ingle de La Mora *et al*¹⁵², proponen que los niveles altos de oxígeno disuelto contribuyen a la disminución de las concentraciones de amonio en su forma ionizada presente en las unidades de cultivo. En esta investigación, se utilizaron barras de aireación suspendidas a 10 cm del fondo del tanque, generando así sedimentación de materia orgánica, y contribuyendo como medio de cultivo para las bacterias nitrificantes tal como lo aseguran Pereira y Mercante¹⁵³, para quienes 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.

El T0 tiene mayor concentración de este compuesto a pesar de tener menores cargas a partir del día 7, teniendo en cuenta que no existió recambio adicional de agua en la unidad experimental y no se disponía de sustratos para el establecimiento de bacterias nitrificantes que convirtieran amoniaco a nitrito y nitrato.

Figura 32. Comportamiento del amonio en el SRA vs aireación convencional



¹⁵² INGLE DE LA MORA, *et al.*, Op. Cit., p. 247-253.

¹⁵³ PEREIRA y MERCANTE. Op. cit., p. 84.

En la misma Figura se observa que el T1 y T2 son ligeramente superiores a lo reportado por los siguientes autores: en estudios de toxicología Kinkelin *et al*¹⁵⁴., reportan que la toxicidad del amoniaco para salmónidos y especies de agua dulce en diferentes condiciones se ha examinado de forma exhaustiva; los autores encontraron que una concentración de 0,54 mg/L, 14–15°C, es letal para el 100% de la población para una exposición de 96 h, en el bagre de canal (*Ictalurus punctatus*), concentraciones de 2,85 mg/L, pH de 8 y temperatura de 25°C a un tiempo de exposición de 24 h, existe mortalidad del 100%. Además, los autores afirman que las especies sensibles, como los salmónidos, toleran por largos periodos de tiempo concentraciones máximas de amoniaco de 0,12 mg/L, sin efecto significativo. En esta investigación toleraron esos rangos gracias al potencial acuícola de la especie y fácil adaptación a medios cambiantes como son los SRA.

Bueno *et al*¹⁵⁵., corrobora que el amonio es uno de los factores que ponen en riesgo la piscicultura, debido a que es un residuo nitrogenado que puede alcanzar rápidamente concentraciones tóxicas en sistemas intensivos mal manejados, causando reducción en la sobrevivencia, crecimiento y así mismo mortalidades totales. Los mismos autores afirman que la trucha arcoíris es considerada una de las especies más sensibles al amonio, cuyo rango de concentración letal comprende valores superiores a 0,62 mg/L de NH₃ de acuerdo con la fase de crecimiento.

Para Durborow *et al*¹⁵⁶., el amoniaco es el principal producto final de la descomposición de las proteínas en los peces, provenientes de la alimentación suministrada, el cual es excretado a través de las branquias y las heces, y cuya cantidad depende de la cantidad de alimento en el sistema. Otra forma de presencia de amoniaco en el sistema es la descomposición bacteriana de materia orgánica por alimento no ingerido o algas muertas. Los autores proponen que la exposición crónica a corto plazo a niveles de amoniaco no ionizado cercanos a los 0,6 mg/L puede matar a los peces en pocos días; entre tanto que una exposición crónica en niveles tóxicos cercanos a los 0,06 mg/L puede ocasionar daño del riñón y las branquias, reducción en el crecimiento y capacidad de transporte de oxígeno en los peces y posible mal funcionamiento del cerebro.

¹⁵⁴ KINKELIN *et al.*, Op., cit., p. 42 – 43.

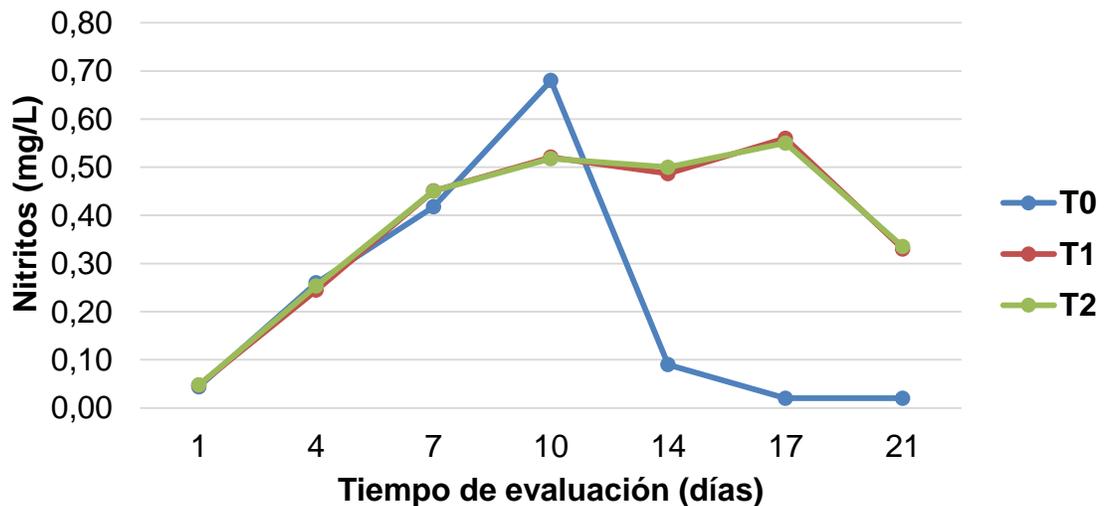
¹⁵⁵ BUENO DOS REIS. C., AZEVEDO. F., y ULBRICHT. E. Toxicidade e Efeitos da Amônia em Peixes Neotropicais. Capítulo 6. Departamento de Ciências Fisiológicas; Universidade Estadual de Londrina. p. 3.

¹⁵⁶ DURBOROW, *et al.* Op. cit., p.1.

Vosyliené y Kazlauskiené¹⁵⁷, demuestran los efectos adversos del amoniaco en concentraciones subletales en peces de diferentes etapas de desarrollo. Aseguran que durante la etapa larval, la exposición de 0,006 hasta 0,18 mg/L de NH₃ por un periodo aproximado de 20 días causa reducción del crecimiento en las larvas, ya que al cabo de este tiempo la masa corporal se reduce significativamente. Proponen además que la exposición a largo plazo a concentraciones subletales comprendidas entre 0,024 a 0,09 mg/L de NH₃ ocasionan una disminución significativa en cuanto a glóbulos rojos (recuento de eritrocitos, concentración de hemoglobina y hematocrito) y blancos (leucocitos y porcentaje de linfocitos).

•**Nitritos.** En los resultados promedio obtenidos para nitritos, el análisis de varianza ($p < 0,05$) demuestra que existen diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos (Anexo 27). De la misma manera, la prueba de Tukey al 95% de confiabilidad (Anexo 27), establece que existen diferencias para los tratamientos T1 con $0,38 \pm 0,17$ y T2 con $0,38 \pm 0,17$ frente al T0 con $0,22 \pm 0,23$. En la Figura 33 se puede observar el comportamiento de los resultados obtenidos para los nitritos a lo largo del período de estudio.

Figura 33. Comportamiento de los nitritos en el SRA vs aireación convencional



¹⁵⁷ VOSYLIENÉ. M. y KAZLAUSKIENÉ. N. Comparative Studies of Sublethal Effects of Ammonia on Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*) at Different Stages of its Development. Institute of Ecology of Vilnius University, Akademijus 2. Acta Zoológica Lituanica. Volume 14, Issue 1. Lithuania 2004. p.1.

Como se puede apreciar en la Figura 33, en el tratamiento 0 se observa un cambio drástico de 0,7 mg/L a 0,08 mg/L entre los días 10 y 14, ocasionado por la elevada mortalidad mayor al 70%, debido a las condiciones adversas en las que se manejó dicha unidad experimental. En el T1 y T2 se encontraron rangos tolerables para el cultivo de la especie. Timmons *et al*¹⁵⁸., afirman que los nitritos se constituyen en un problema frecuente en sistemas de recirculación porque es producido constantemente, por lo que los peces están expuestos de manera permanente a abundantes concentraciones de este compuesto.

Estudios similares realizados por Summerfelt *et al*¹⁵⁹., y López *et al*¹⁶⁰ reportan concentraciones de nitritos cercanas a los 0,35 y 0,8 mg/L respectivamente; estableciendo que la concentración de nitritos presentes en el agua es la que tiene mayor variación en los sistemas de cultivo.

•**Nitratos.** En los resultados promedio obtenidos para los nitratos, en el análisis de varianza ($p < 0,05$) se demuestra que existen diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos (Anexo 28). De la misma manera, la prueba de Tukey al 95% de confiabilidad (Anexo 28), establece que existen diferencias para los tratamientos T1 con $10,16 \pm 3,47$ y T2 con $10,12 \pm 3,45$ frente al T0 con $3,42 \pm 1,41$.

Summerfelt *et al*¹⁶¹., proponen que en un SRA el proceso más esperado es la nitrificación, puesto que los nitratos se constituyen en el compuesto menos tóxico para los peces, que cualquiera de los demás componentes derivados del nitrógeno. Por otro lado, la nitrificación dentro de un sistema de recirculación se limita solo a aquellas superficies donde las bacterias autótrofas se puedan adherir y permanecer dentro del sistema, como por ejemplo las superficies de contacto como tuberías y tanques.

En la Figura 34 se puede apreciar que el comportamiento de los nitratos se mantuvo estable durante el periodo de estudio, encontrándose dentro de los rangos soportados por la especie como lo demuestran Davidson *et al*¹⁶²., quienes

¹⁵⁸ TIMMONS, *et al.* Op. cit., p. 33.

¹⁵⁹ SUMMERFELT, *et al.* Op. cit., p. 157–181.

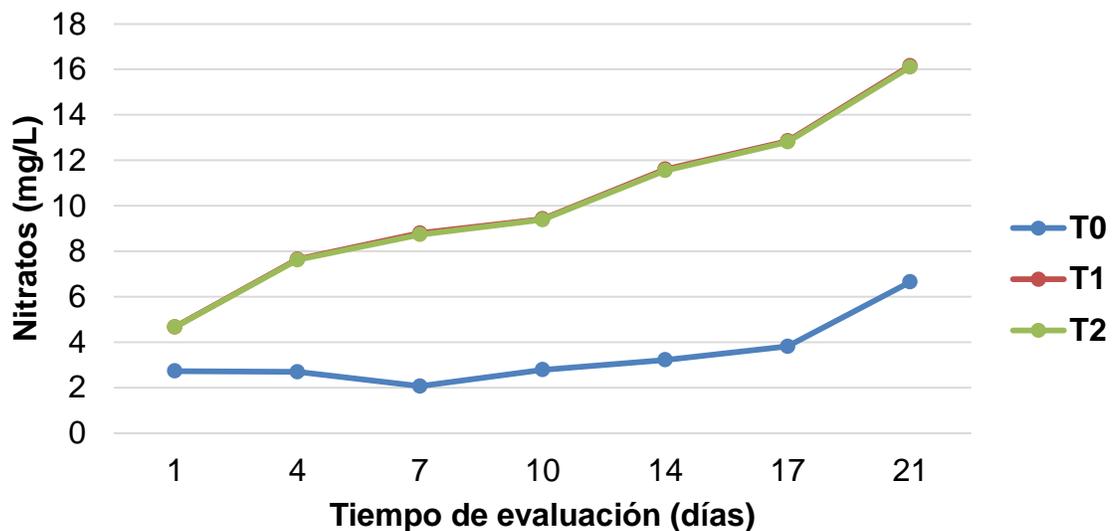
¹⁶⁰ LÓPEZ. Y., TRUJILLO. E, FONSECA. Ma. y MARTÍNEZ. V. Identificación de las características físicas, químicas y microbiológicas del agua, que se alteran por uso acuícola. Centro Interamericano de Recursos del Agua, Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de México. Edo. de México, México. 2005. p. 3.

¹⁶¹ SUMMERFELT, *et al.* Op. cit., p. 157–181.

¹⁶² DAVIDSON J, GOOD C, WELSH C, SUMMERFELT S. The effects of ozone and water exchange rates on water quality and rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* performance in replicated water

al realizar tres ensayos separados: (1) bajo recambio de agua (0,26% del total del flujo) con y sin ozono, (2) el bajo intercambio de agua con ozono frente a alto recambio de agua (2,6% del flujo total), sin ozono, y (3) intercambio de agua cercano a cero (sólo lavado a contracorriente), encontraron NO_3 de $91 \pm 0,1$; 17 ± 1 y 191 ± 28 mg/L. respectivamente. En sistemas de cultivo abiertos Blanco¹⁶³, 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.

Figura 34. Comportamiento de los nitratos en el SRA vs aireación convencional



Según Roque d'orbcastel *et al*¹⁶⁴, la combinación de factores de calidad del agua tales como O_2 disuelto, conductividad, nitrito, CO_2 y amoníaco pueden causar problemas de salud en los peces; pero por el contrario, estos pueden soportar grandes concentraciones de compuestos como el nitrato, debido a que el crecimiento de la trucha se ve afectada por concentraciones por encima de 180 mg/L NO_3 , y para el caso de otras especies (*Ictalurus punctatus*), las

recirculating systems. *En*: Aquacultural Engineering 44. United States. 2011 p. 80–96. Disponible en: www.elsevier.com/locate/aqua-online

¹⁶³ BLANCO, Op. cit. p. 227.

¹⁶⁴ ROQUE D'ORBCASTEL, E., BLANCHETON, J. y BELAUD, A. Water quality and rainbow trout performance in a Danish Model Farm recirculating system: Comparison with a flow through system. Aquacultural Engineering. Elsevier B.V, Volume 40, Issue 3, 2009. p. 135-143.

concentraciones máximas reportados son alrededor de 500 mg/L NO₃, e inclusive en algunos casos, dicho rango de tolerancia ha superado los 1000 mg/L NO₃.

5.4.7. Materia orgánica en el SRA vs aireación convencional, demanda biológica de oxígeno (DBO₅) y demanda química de oxígeno (DQO).

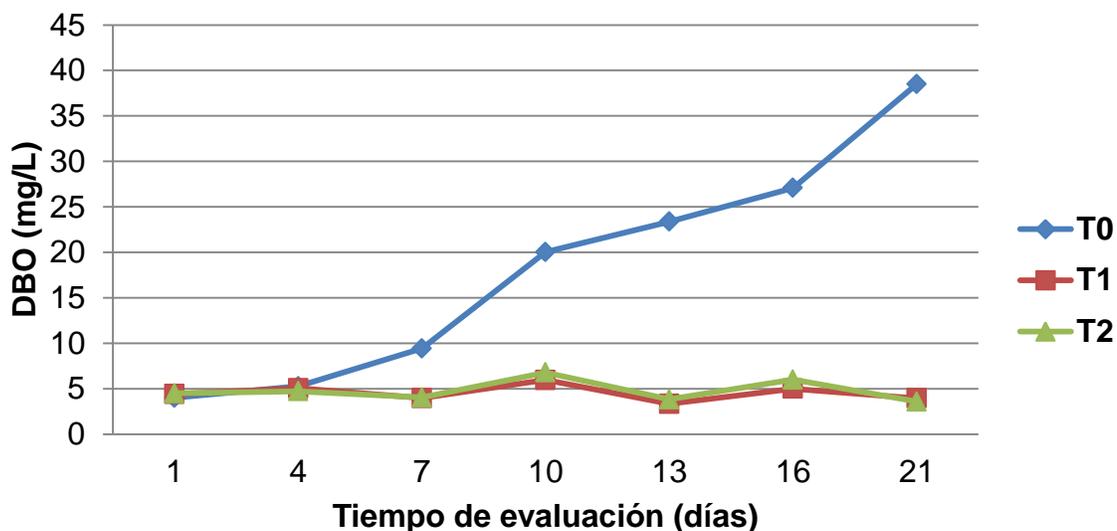
• **Demanda biológica de oxígeno (DBO₅).** En los resultados promedio obtenidos, se demostró con el análisis de varianza ($p < 0,05$) que existen diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos (Anexo 30), la prueba de Tukey al 95% de confianza reporta; que la mejor calidad de agua se presenta en el SRA T1 con $4,53 \pm 0,16$, y T2 con $4,78 \pm 0,09$ frente al T0 con $18,23 \pm 3,93$ mg/L. La DBO₅ en los T1 y T2 es superior a 4,5 mg/L, las cuales pueden ser denominadas como aguas negras; y representan un peligro para el cultivo por la posibilidad del enorme gasto de oxígeno, tal como lo indica Wedler¹⁶⁵, debido a que se encuentran en un rango entre 4-10 mg/L. En el T0 se presentó una concentración de 18,23 mg/L que de acuerdo a la afirmación del anterior autor se clasifica como agua que sirve para medio de cultivo solo después de un tratamiento, por encontrarse en un rango mayor a 10 mg/L.

En la Figura 35, se observa el comportamiento de la DBO₅, para el SRA T1 y T2 permanecen constantes con datos promedios mínimos de 3,33 y máximos 6,79 mg/L; el T0 tiene una tendencia exponencial de datos promedios mínimos de 4 y máximos de 48,45 mg/L, debido a que se manejó con cero recambios y por ende las materias fecales y alimento no consumido, se acumularon iniciando procesos de descomposición afectando el bienestar de los peces y conduciendo a un incremento de la mortalidad. La materia orgánica acumulada estimula la producción bacteriana, cambiando la composición química, la estructura y funciones de los sedimentos, algunos efectos del aumento de la carga de materia orgánica y de los nutrientes en los sedimentos son: disminución de las concentraciones de oxígeno y aumento de la demanda biológica de oxígeno (los sedimentos aumentan su condición anaeróbica y reductora); como lo afirma Buschmann¹⁶⁶.

¹⁶⁵ WEDLER E. Op., cit. p. 87 - 94

¹⁶⁶ BUSCHMANN, A. Impacto ambiental de la acuicultura el estado de la investigación en Chile y el mundo, un análisis bibliográfico de los avances y restricciones para una producción sustentable en los sistemas acuáticos. Universidad de los Lagos, Santiago de Chile. 2001. p. 15 – 17. 67 p. Disponible en: <http://www.terram.cl>

Figura 35. Comportamiento de la DBO₅ (mg/L) en el SRA vs aireación convencional.



Teniendo en cuenta lo anterior se deduce que el agua para el cultivo de truchas, posee diversas concentraciones entre las que se registró una DBO₅ máxima promedio de 18,23 mg/l en el T0 y promedio mínimo de 4,53 en el T1 mg/l, lo cual indica que entre menor sea la cantidad de DBO mayor será la cantidad de oxígeno disuelto, debido a que no habrá gran cantidad de microorganismos que puedan consumir el oxígeno presente en el agua, facilitando la supervivencia de la especie de cultivo como lo menciona Abarca¹⁶⁷.

La concentración de la DBO₅ en los tanques de cultivo para los tratamientos T0, T1 y T2 fueron de 18,23, 4,53 y 4,78 respectivamente, los cuales se encontraron dentro de los rangos soportados para la trucha arcoíris. Datos parecidos en condiciones similares de SRA son reportados por Davidson *et al*¹⁶⁸., quienes realizaron tres ensayos analizando los efectos del ozono con recambios, bajos, altos y cercanos a cero reportando DBO₅ 4,7±0,9; 4,1±0,7 y 18,9±6,2 mg/L. respectivamente, existiendo diferencias significativas en cuanto a la calidad del agua y parámetros productivos. Igualmente Davidson *et al*¹⁶⁹., en su estudio

¹⁶⁷ ABARCA. J. Técnicas para evaluación y monitoreo del estado de los humedales y otros ecosistemas acuáticos Bogotá: Terranova. 2000. p. 124.

¹⁶⁸ DAVIDSON J, 2011 *et al*, Op. cit., p. 80–96.

¹⁶⁹ DAVIDSON J. GOOD C. WELSH C. BRAZIL B. y SUMMERFELT S. Heavy metal and waste metabolite accumulation and their potential effect on rainbow trout performance in a replicated

iniciaron con cargas de 25 kg/m^3 , evaluando los parámetros productivos con bajos recambios de agua (TRH 6,7 días) y alto recambio de agua (TRH 0,67 días) en SRA, generando como resultado $13 \pm 1 \text{ mg/L}$ y $3 \pm 1 \text{ mg/L}$ para DBO_5 respectivamente y concluyen que este parámetro afectó el bienestar de los peces.

•**Demanda química de oxígeno (DQO).** En los resultados promedio obtenidos, se demostró con el análisis de varianza ($p < 0,05$) que no existieron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos (Anexo 31). En la Figura 37 se muestra el comportamiento de la demanda química de oxígeno, las concentraciones se mantienen similares debido a que en el T1 y T2 con el transcurso del tiempo la carga (kg/m^3) incrementaba exponencialmente por ende mayor suministro de alimento, en el T0 se presenta una curva exponencial, debida a la acumulación causada por alimento no consumido y materia fecal de las truchas.

La concentración de la DQO (mg/L) en los tanques de cultivo para los tratamientos T0, T1 y T2 son $96,31 \pm 20,62$; $102,59 \pm 9,47$ y $103,63 \pm 11,13$ respectivamente, estos resultados son superiores a los reportados por la literatura para cultivos de trucha en SRA como lo demuestran los siguientes autores: Davidson *et al*¹⁷⁰., quienes realizaron tres ensayos separados analizando los efectos del ozono con recambios, bajos, altos y cercanos a cero reportando DQO de $15,3 \pm 1,5$; $9,0 \pm 1,2$ y $21,0 \pm 2,6 \text{ mg/L}$ respectivamente, existiendo diferencias significativas en cuanto a la calidad del agua y parámetros productivos.

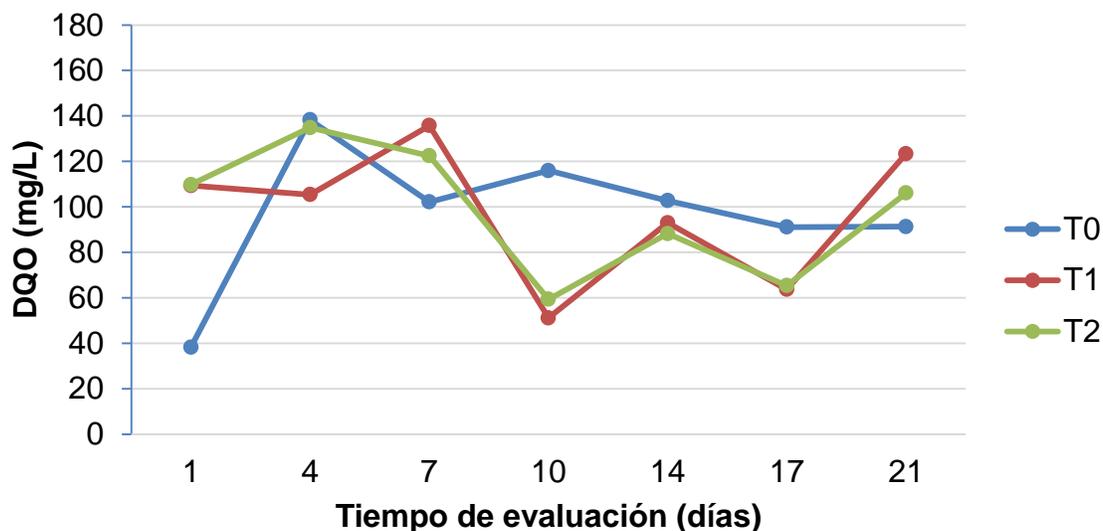
En los tres tratamientos los datos promedios de DQO son superiores a $96,31 \text{ mg/L}$ que son concentraciones altas y DBO_5 de $16,79 \text{ mg/L}$ en el T0, se puede explicar gracias a la presencia de bacterias y microorganismos en altas cantidades, los cuales necesitan mayor cantidad de oxígeno para la degradación de materia orgánica, lo cual es corroborado por Recalde y Araya¹⁷¹, quienes afirman que un incremento en las poblaciones de microorganismos, contribuye al aumento de la descomposición del material orgánico; y por ende aumento de la DBO_5 y DQO debido al consumo de oxígeno por parte de los microorganismos y bacterias.

water reuse system operated at low or high system flushing rates. *En*: Aquacultural Engineering 41. United States. 2009 p. 136–145. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/aqua-online>

¹⁷⁰ DAVIDSON J, *et al.*, 2011. Op., cit., p. 80–96.

¹⁷¹ RECALDE, P y ARAYA, J. Diseño de tecnologías para la descontaminación de aguas residuales en sistemas agropecuarios. Tesis de grado: Universidad Earth, Ingeniero agrónomo. Guacím, Costa Rica. 2006. p. 35-46.

Figura 36. Comportamiento de la DQO (mg/L) en el SRA vs aireación convencional



5.4.8. Alcalinidad. En los resultados promedio obtenidos, se demostró con el análisis de varianza ($p < 0,05$) que existen diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos (Anexo 32), la prueba de Tukey al 95% de confianza reporta que la mejor calidad de agua se presentó en el SRA en el T1 con $88,08 \pm 11,69$, T2 con $86,55 \pm 9,56$ frente al T0 con $135,54 \pm 32,12$ mg/L en donde se presenta la sobrevivencia y los parámetros productivos más bajos. Timmons *et al*¹⁷²., mencionan que la alcalinidad es la medida de la capacidad de neutralización del pH que tiene el agua. Los mismos autores recomiendan que para el agua dulce, la alcalinidad se encuentra entre 5 y 500 mg/L de CaCO_3 . También reportan para cada gramo de nitrógeno amoniacal reducido a nitrógeno de nitrato, se consumen 7,14 gramos de alcalinidad.

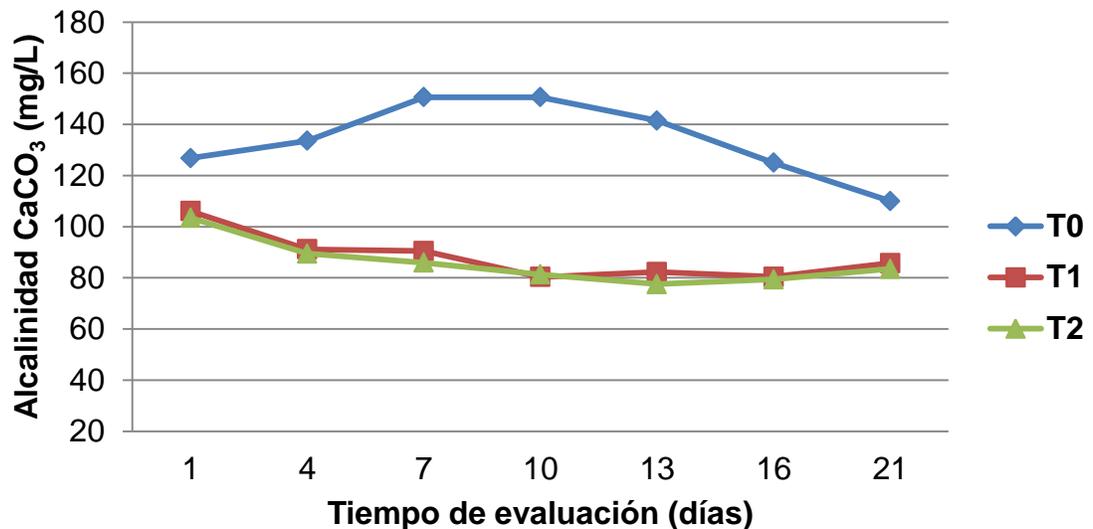
En la Figura 37 se observa el comportamiento de la alcalinidad, la cual se mantuvo estable durante el periodo de estudio. Wedler¹⁷³, menciona que cuando la alcalinidad se encuentra en rango de 25-100 CaCO_3 mg/L, significa que no existe variación alta de pH, una cantidad mediana de CO_2 y la acidez no representa ningún peligro para los peces en cultivo. Igualmente si dicho rango se encuentra entre 100–250 CaCO_3 mg/L se traduce que no existen cambios de pH, alta

¹⁷² TIMMONS, *et al.* Op. cit., p. 34.

¹⁷³ WEDLER, E. Op., cit., p. 48

cantidad de dióxido de carbono e igualmente la acidez no presenta peligro para el bienestar de los peces.

Figura 37. Alcalinidad CaCO_3 en mg/L en un el SRA vs aireación convencional.



Con respecto a los resultados obtenidos en el SRA se encontró para T1 (88,08), T2 (86,55) frente al tratamiento de aireación convencional T0 (135,54), el cual es superior en más del 36% comparado con el T1 y T2. Este leve incremento se debe a que el pH promedio se encontró en $8,34 \pm 0,14$ por consiguiente el bicarbonato se hace más común obteniendo resultados elevados. Buschmann¹⁷⁴ sostiene que la fuente de alcalinidad se debe a las sales de ácidos débiles, que se disocian en el agua. Gran parte de la alcalinidad en agua dulce, es consecuencia de los iones de carbón (carbonatos y ácidos carbónicos) que están interrelacionados; dependiendo estas proporciones del pH existente en el medio. A medida que el pH aumenta, el bicarbonato se hace más común, hasta alcanzar un pH de 8,3; si el pH continúa subiendo, el carbonato se hace aún más común.

¹⁷⁴ BUSCHMANN, A. *et al.* Op. cit., p. 21 – 22.

5.4.9.Sólidos suspendidos, disueltos y totales. Según Cripps y Bergheim¹⁷⁵, las concentraciones de sólidos en los flujos efluentes sin tratar, se encuentran en un rango entre 5 y 50 mg/L. Dichos sólidos pueden contener concentraciones habituales de nitrógeno total entre 7 y 32% y de fósforo total de 30 a 84% en el agua residual. Los autores asocian dicho factor a la calidad y cantidad de alimento suministrado en las unidades de cultivo, con lo cual si se manipula apropiadamente se puede llegar a reducir la cantidad de residuos y desechos sólidos producidos.

•**Sólidos suspendidos.** En los resultados promedio obtenidos para sólidos suspendidos, en el análisis de varianza ($p < 0,05$) se determinó que no existen diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos (Anexo 33). El tratamiento 0 con $79,01 \pm 7,51$, el T1 con $75,74 \pm 9,43$ y el T2 con $75,56 \pm 8,33$ mg/L. (Figura 38).

Como se puede apreciar en la Figura 39, los valores registrados para sólidos suspendidos tuvieron un incremento desde el día 1 hasta el día 7; a partir de este día presentaron una tendencia estable debido al taponamiento por materia orgánica de las unidades de filtración, en consecuencia se realizó un lavado de la unidad filtrante y reposición de agua, lo que condujo a la dilución de todos los sólidos y compuestos nitrogenados presentes en el sistema. Los resultados obtenidos en esta investigación fueron superiores a los recomendados por García y Calvario¹⁷⁶, quienes proponen que el nivel tolerable de sólidos suspendidos para la trucha arcoíris no debe exceder los 80 mg/L.

Couturier *et al*¹⁷⁷, aseguran que los sólidos en suspensión generados en SRA se originan por la presencia de heces fecales, restos de alimento no consumido y flóculos bacterianos. La eliminación eficaz de estas partículas presentes en el agua es esencial para evitar una disminución en su calidad. Si estos compuestos no son eliminados a tiempo, pueden ocasionar turbidez en el agua, aumento del consumo de oxígeno debido a la descomposición bacteriana, afectar la salud del pez de manera directa por la irritación de las branquias debido a las partículas en

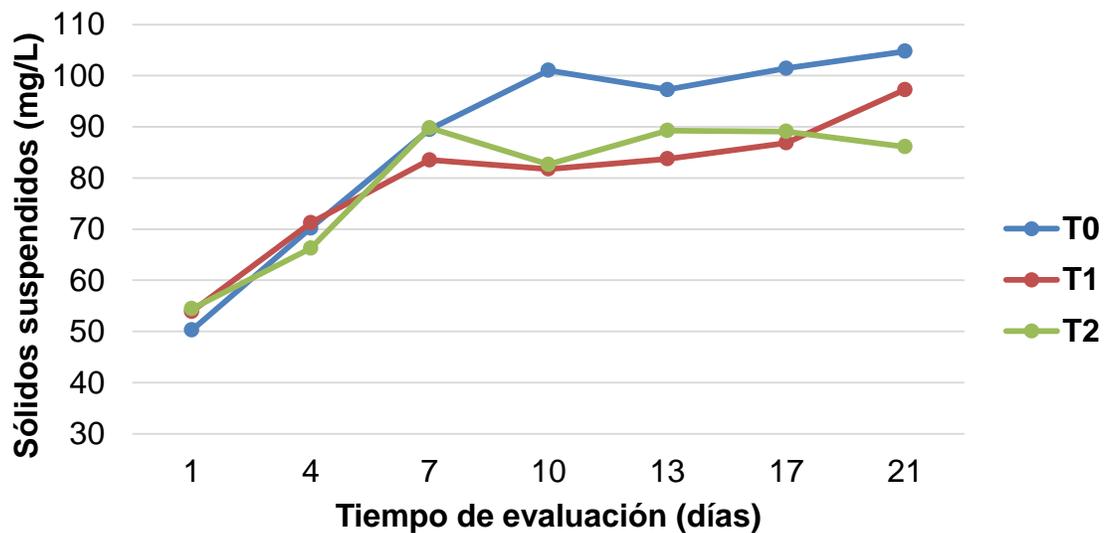
¹⁷⁵ CRIPPS, S. y BERGHEIM, A. Solids management and removal for intensive land-based aquaculture production systems. *En*: Aquacultural Engineering 22. Stanger, Norway. 2000. p. 33–56.

¹⁷⁶ GARCÍA, A y CALVARIO, O. Manual de Buenas Prácticas de Producción Acuícola de Trucha para la Inocuidad Alimentaria. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Unidad Mazatlán en Acuicultura y Manejo Ambiental SENASIACA. Primera edición. México. 2003. p. 31.

¹⁷⁷ COUTURIER, M., TROFIMENCOFF, T., UTGE-BUIL, J. y CONROY, J. Solids removal at a recirculating salmon-smolt farm. Recirculating Aquaculture Research Group, Department of Chemical Engineering, University of New Brunswick. *En*: Aquacultural Engineering 41. 2009 p. 71–77.

suspensión, e indirecta por albergar patógenos y ocasionar un posible debilitamiento del sistema inmune. También afirman que los salmónidos alimentados con dietas ricas en contenido energético, generan alrededor de 0,2 kg de materia fecal por cada kilogramo de alimento ingerido.

Figura 38. Comportamiento de los sólidos suspendidos en el SRA vs aireación convencional.



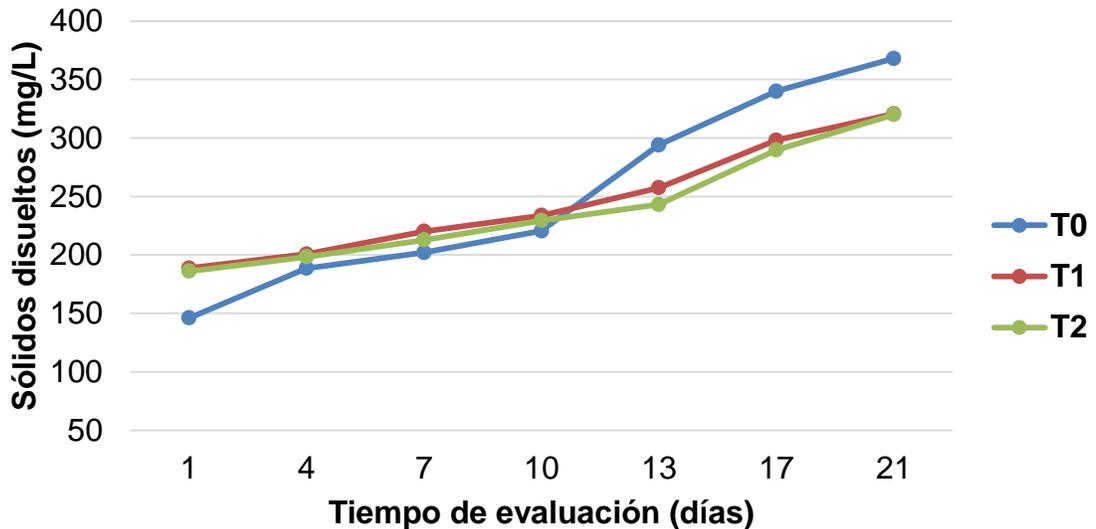
•**Sólidos Disueltos.** Los resultados promedio obtenidos no presentaron diferencias entre los tratamientos con el análisis de varianza ($p < 0,05$) (Anexo 34). Los valores promedio obtenidos fueron de $210,33 \pm 29,04$, $229,62 \pm 24,14$ y $223,92 \pm 24,93$ para el T0, T1 y T2 respectivamente. Por lo tanto, los TRH no tienen incidencia sobre este parámetro. En la Figura 43 se puede apreciar que el comportamiento de los sólidos disueltos para el T1 y T2 se mantuvo en constante incremento debido a que para dichos tratamientos no se presentó mortalidad y por ende la carga estuvo aumentando; caso contrario ocurrió con el T0, donde al presentarse elevada mortalidad ($>70\%$ entre el día 7 y 10), no existió fuente de generación de sólidos ni por el suministro de alimento ni tampoco por excreción de desechos de los peces.

En la Figura 39, se observa que los valores promedio registrados para los sólidos disueltos durante el período de estudio se mantuvieron ligeramente superiores del

rango tolerable para el cultivo de la especie, el cual según lo establecen García y Calvario¹⁷⁸, se encuentra entre 50 y 200 mg/L.

Couturier *et al*¹⁷⁹., aseguran que las heces desechadas por los peces se descomponen con facilidad en partículas más pequeñas; dado que estas son mucho más difíciles de eliminar que las grandes, es indispensable que sean removidas con rapidez antes que se puedan dividir en partículas mucho más pequeñas debido a la turbulencia del agua, el movimiento de los peces y la acción de recirculación de las motobombas.

Figura 39. Comportamiento de los sólidos disueltos en el SRA vs aireación convencional.

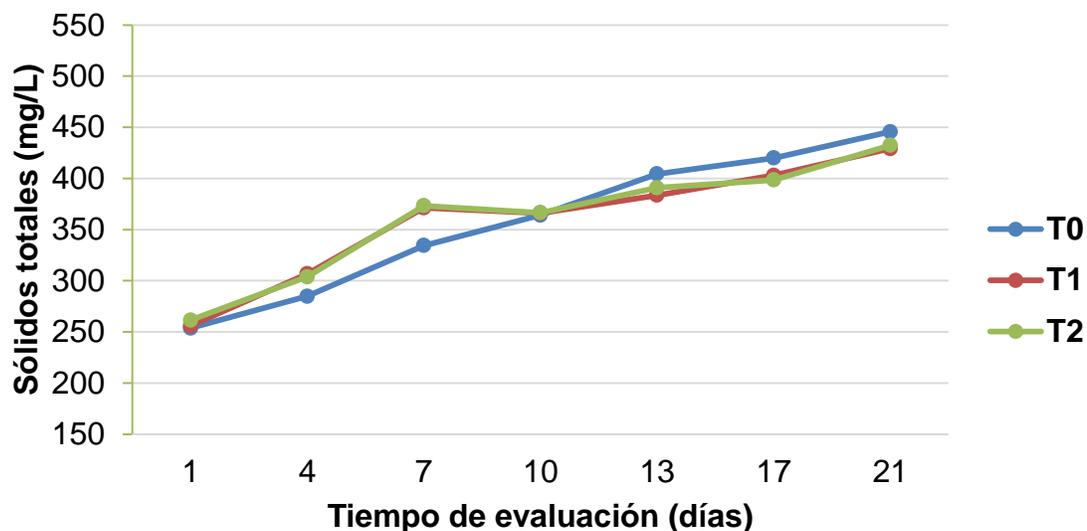


•**Sólidos totales.** En los resultados promedio obtenidos para sólidos totales, el análisis de varianza ($p < 0,05$) demostró que existen diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos (Anexo 35). De igual manera, la prueba de Tukey al 95% de confiabilidad (Anexo 37), demostró que el mayor contenido de sólidos totales fueron en el T1 con $368,03 \pm 35,34$ y el T2 con $368,97 \pm 35,35$ frente al T0 con $335,11 \pm 54,99$. En la Figura 40 se puede apreciar el comportamiento de los valores registrados para este parámetro durante el período de estudio.

¹⁷⁸ GARCÍA y CALVARIO. Óp. Cit., p.31.

¹⁷⁹ COUTURIER, *et al.* Op. cit., p.2.

Figura 40. Comportamiento de los sólidos totales en el SRA vs aireación convencional.



Como se puede apreciar en la Figura 40, los valores promedio registrados para los sólidos totales se mantuvieron en constante incremento para el T1 y T2, lo cual se encuentra en función del incremento de carga, y por lo tanto, existió mayor suministro de alimento que se traduce a mayor cantidad de desechos metabólicos producidos.

Según lo reportado por Summerfelt y Penne¹⁸⁰ la remoción rápida y eficiente de los residuos sólidos es el proceso más crítico en un SRA. Las partículas orgánicas pueden afectar la función de las branquias y nutrir patógenos facultativos de los peces, así como contribuir a la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), y en el caso de las unidades de tratamiento en los SRA proporcionan el sustrato para el crecimiento de microorganismos heterótrofos en el biofiltro que desplazan a las bacterias nitrificantes (*Nitrosomonas* y *Nitrobacter*), las cuales son esenciales para la conversión de amoníaco a nitrato.

Los anteriores autores afirman que en un SRA, los tanques de cultivo comprenden la primera secuencia para la acumulación y captura de sólidos. Para el caso de los

¹⁸⁰ SUMMERFELT, R. y PENNE, C. Solids removal in a recirculating aquaculture system where the majority of flow bypasses the microscreen filter. Department of Natural Resource Ecology and Management, Iowa State University. *En: Aquacultural Engineering* 33. USA 2005.p. 214–224.

tanques circulares, cuando estos cuentan con un diámetro apropiado en relación con la profundidad, un mecanismo eficaz de inyección de agua (flujo del sistema), y la velocidad de rotación adecuada para este, dicho flujo giratorio primario crea un flujo radial secundario que transporta rápidamente los sólidos sedimentables totales hacia el desagüe central, por tanto es apropiado utilizar tanques circulares en un SRA ya que poseen la característica importante y positiva de auto limpieza de eliminación rápida y eficiente de sólidos sedimentables. Además recomiendan que la adición apropiada de oxígeno puede contribuir a reducir significativamente las concentraciones de sólidos suspendidos totales llevándolos hacia niveles tolerables para las especies en cultivo.

5.5. ANÁLISIS PARCIAL DE RELACIÓN BENEFICIO/COSTO EN EL T1 Y T2

En este estudio se tuvo en cuenta los gastos relacionados con los costos de producción (Tabla 18 y 19) y los ingresos que se obtendrían por la venta de la biomasa producida, para lo cual se obtuvo que la relación beneficio/costo tuvo un valor de 0,14 lo que indica que el proyecto económicamente no es viable. Esto se puede explicar debido a que “la acuicultura es un negocio rentable solo si se manejan cargas en fases de finalización entre 30 y 40 kg/m³”¹⁸¹, y la carga máxima obtenida en esta investigación fue de 20,72 kg/m³.

Tabla 18. Costos de consumo de electricidad

Equipos	Potencia motor (kw)	Funcionamiento (h)	Costo (kw/h)	Costo total (\$)
Motobomba	0,13	504	\$ 380,45	\$ 24.927
Blower	0,373	504	\$ 380,45	\$ 71.522
Filtro UV	0,62	504	\$ 380,45	\$ 118.883
Timer	0,62	504	\$ 380,45	\$ 118.883
Compresor	0,363	504	\$ 380,45	\$ 69.604
Total (\$)				\$ 403.819

¹⁸¹ LÓPEZ-MACÍAS, J. Comunicación personal, 2013.

Tabla 19. Costos de alimento y semilla

Insumos	Cantidad	Costo (\$/unidad)	Costo total (\$)
Alimento (kg)	2,6	\$ 2.850	\$ 7.410
Semilla (pez)	82	\$ 400	\$ 32.800
			\$ 40.210

El valor de ingreso por la cantidad de biomasa producida y vendida se obtiene al multiplicar la cantidad de carne de pescado (en kg) por el valor comercial de un kg de pescado en el mercado. Para este caso se produjeron 5,166 kg por un precio de venta de \$ 12000 obteniendo un ingreso total de \$ 62.000

En la Tabla 18 en el cálculo de consumo de electricidad, ocasionado por la bomba y el compresor; se lo realizó con la potencia requerida utilizando las Ecuaciones 13 y 14 recomendadas por Saldarriaga¹⁸²,

5.5.1. Ecuaciones para el cálculo de potencia requerida en la bomba.

$$P = \rho \times g \times H \times Q \quad (13)$$

Donde:

P: Potencia requerida de la bomba

ρ : Densidad del fluido

g: Gravedad

H: perdidas

Q: Caudal utilizado en el sistema

$$H = HT + \Sigma hm + \Sigma hf \quad (13.1)$$

Donde:

HT: Altura total desde tanque de succión hasta caja de nivel constante

hm: Perdidas menores o por accesorios

hf: Pérdida de energía debida a fricción

¹⁸² SALDARRIAGA J. Hidráulica de tuberías. Abastecimiento de agua, riego y redes. Editorial. Alfaomega. Bogotá, D.C., 2007. p. 147 -178.

$$hf = f \times \frac{L}{D} \times \frac{V^2}{2g} \quad (13.2)$$

Donde:

D: Diámetro interno de la tubería
 f: Coeficiente de fricción adimensional
 L: Longitud de la tubería
 V: Velocidad media del flujo en la tubería

$$f = 0,1622 \times NR^{-0,189} \quad (13.3)$$

Donde:

NR : Número de Reynolds

5.5.2. Ecuaciones para el cálculo de potencia requerida en el compresor.

$$P = (L + Pc) \times Qa \times Y \quad (14)$$

Donde:

P: Presión requerida en el compresor
 L: Longitud de la manguera
 Pc: Presión del compresor
 Qa: Caudal real
 Y: Peso específico

$$Y = \frac{Pabs}{Valor R \times Temperatura} \quad (14.1)$$

$$Qa = Qs \times \left(\frac{Patm}{Patm + Pm} \right) \times \left(\frac{(T^\circ + 273)k}{285 k} \right) \quad (14.2)$$

Donde:

Qs: Caudal aire fuente
 Patm: Presión atmosférica
 Pm: Presión de trabajo

$$Pc = (P1 - P2) + Qa \quad (14.3)$$

$$P1 - P2 = hfT \times Y \quad (14.4)$$

$$hfT = hf + hfL \quad (14.5)$$

Donde:

hfT : Total pérdidas de fricción

P1 – P2 : Perdida de presión en la tubería

hf: Perdida fricción tubería

hfL: Perdida fricción accesorios

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- Se reportaron diferencias estadísticas significativas en las variables: incremento de peso, carga final y tasa de crecimiento específico. La prueba de Tukey demostró que los mejores tratamientos son T1 y T2; por lo tanto los TRH, no afectaron el crecimiento de las variables productivas de las truchas en SRA; vs el T0.

- El bienestar animal medido por medio de la sobrevivencia de los ejemplares que se mantuvieron en el SRA fue del 100%; a diferencia del T0 que fue del 8,13%, justificando el efecto de los TRH vs aireación convencional.

- La valoración del bienestar animal por medio de las aletas, es una técnica fácil y económica. Se encontraron diferencias significativas (95%) en la necrosis de aleta dorsal; los grados predominantes fueron el nivel 1, y 2, para el T1 y T2; el T0 reportó los grados de necrosis más bajos. En consecuencia los TRH y las altas cargas (kg/m^3) influyen en el bienestar animal.

- En la necrosis de la aleta caudal, el nivel más predominante es el A superior al 80% (buen estado), nivel B superior al 17%, el nivel C no se registró en la evaluación, por consiguiente no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos; por tanto los TRH no afectan la necrosis de la aleta caudal.

- Los parámetros físico-químicos del agua evaluados diariamente presentaron diferencias estadísticas significativas en los tratamientos T1 y T2 respecto al T0; las variaciones generadas se debieron a que la unidad de cultivo utilizada para el T0 se manejó por fuera del SRA.

- En cuanto a los parámetros fisicoquímicos muestreados dos veces por semana, se encontraron diferencias estadísticas significativas en el NAT, amonio y los sólidos totales para el T1 y T2 con respecto al T0, donde se obtuvieron valores por encima del límite soportado por la especie en cultivo debido a la ausencia de recambios.

- Los SRA representan una excelente alternativa en el tratamiento de aguas residuales, con fines de una acuicultura amigable con el medio ambiente; su efectividad está acompañada de altos costos de funcionamiento de equipos (motobombas, blower, compresor, timer y radiación UV), al igual que procesos operativos de mantenimiento, asociados al control de sólidos y materia orgánica.

6.2. RECOMENDACIONES

- Evaluar el presente sistema de recirculación acuícola iniciando con pesos de 60 g y carga de 20 kg/m³, hasta peso comercial; en función de las variables productivas y bienestar de la trucha arcoíris.

- Evaluar sistemas de recirculación acuícola, con tiempos de retención hidráulica superiores a una hora, en cuanto a los parámetros productivos de la trucha arcoíris, con fines de disminuir costos eléctricos ocasionados por bombeo.

- Se recomienda utilizar el método seleccionado para calibración de caudales por medio de orificios en la caja de nivel constante, debido a que en la presente investigación fue el adecuado; logrando así evitar uso de válvulas y por ende disminución de costos.

- Antes de seleccionar un medio filtrante, es recomendable hacer un análisis granulométrico y determinar sus características de resistencia y porosidad, para no tener problemas posteriores en el lecho filtrante.

- Realizar una etapa de pre-ensayo a partir del cual se estandaricen los protocolos de trabajo con la especie a cultivar, el sistema hidráulico, aireación y sistema eléctrico de respaldo (planta eléctrica), que sustentan al SRA, además de identificar posibles fallas que puedan intervenir de mala manera en el período de investigación.

7. BIBLIOGRAFÍA

ABARCA, J. Técnicas para evaluación y monitoreo del estado de los humedales y otros ecosistemas acuáticos Bogotá: Terranova. 2000. p. 124.

ABBOTT, J. y LAWRENCE, M. Patterns of Aggressive Attack in Juvenile Steelhead Trout (*Salmo gairdneri*). Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 42(11): 1985, p. 1702-1706

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA), AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA), WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 22 edition. Washington, D. C. 2012

ARREDONDO-FIGUEROA. J., BARRIGA-SOSA, L., NUÑEZ-GARCÍA, I. y PONCE-PALAFIX, J. Cultivo de Trucha Arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*, Walbaum) en un sistema cerrado de recirculación de agua. Planta Experimental de Producción Acuícola, Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa, México, Distrito Federal (México). En: CIVA 2006 1038-1047. 2006. p. 10 Disponible en: <http://www.civa2006.org>

ARZU, U. y MUHAMMED, A. The effects of natural (clove oil) and synthetical (2-phenoxyethanol) anesthesia substances on hematology parameters of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and brown trout (*Salmo trutta fario*). Journal of animal and veterinary advances 9 (14): Faculty of aquaculture engineering. Ataturk University. Erzurum, Turkey. 2010. p. 1925 – 1933

AURO, A. y OCAMPO, L. Diagnóstico del Estrés en Peces; Departamento de Especies Productivas no Tradicionales: Peces, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Nacional Autónoma de México, D.F., 30(4) 1999. p. 337-344.

ÁVILA, H. y SALDARRIAGA, J. Calibración de parámetros de fugas en fallas longitudinales en tuberías de PVC. En: Ingeniería & Desarrollo. Universidad del Norte. 2004 p. 32-44 Disponible en: <http://rcientificas.uninorte.edu.co>.

BALDWIN, L. The effects of stocking density on fish welfare. En: The Plymouth Student Scientist, 4, (1), School of Science, University of the West of Scotland. 2010, p. 372-383.

BLANCO, C. La trucha arcoíris, cría industrial. 2ª ed. Ediciones Mundiprensa. 1995. 503 p.

BUENO DOS REIS, C., AZEVEDO, F., y ULBRICHT, E. Toxicidade e Efeitos da Amônia em Peixes Neotropicais. Capítulo 6. Departamento de Ciências Fisiológicas; Universidade Estadual de Londrina. 15. p.

BUSCHMANN A. Impacto ambiental de la acuicultura el estado de la investigación en Chile y el mundo, un análisis bibliográfico de los avances y restricciones para una producción sustentable en los sistemas acuáticos. Universidad de los Lagos, Santiago de Chile. 2001. 67 p. Disponible en: <http://www.terram.cl>

CAÑÓN, H., NOBLE, C., DAMSGÅRD, B. y PEARCE, G. Social network analysis of the behavioural interactions that influence the development of fin damage in Atlantic salmon parr (*Salmo salar*) held at different stocking densities. En: Applied Animal Behaviour Science 133 (2011) p. 117– 126. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/applanim>

CARDENAS-CALVACHI, G. Guía de laboratorio de calidad de agua para acuicultura 1, métodos adaptados de los “Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales” 17 edición de la APHA, AWWA y WPCF, 1998 y de las guías de laboratorio de la Universidad del Valle. Universidad de Nariño, San Juan de Pasto 2009. 76 p.

CENTRO DE ESTUDIOS PARA EL DESARROLLO Y LA PARTICIPACIÓN (CEDEP). y ANTAMINA. Manual de Crianza de la Trucha (*Oncorhynchus mykiss*), Municipalidad distrital Ragash. Perú, 2009. p.1 -25. Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/45639651/Manual-Crianza-de-Truchas>.

COLT, J., ORWICZ, K. y BOUCK, G. Water quality considerations and criteria for high-density fish culture with supplemental oxygen. En: Fisheries Bioengineering Symposium 10. American Fisheries Society, Bethesda, Maryland, 1991 p. 372-385. Disponible en: <http://www.scholarworks.umass.edu>

COUTURIER, M., TROFIMENCOFF, T., UTGE BUIL, J. y CONROY, J. Solids removal at a recirculating salmon-smolt farm. Recirculating Aquaculture Research Group, Department of Chemical Engineering, University of New Brunswick. *Aquacultural Engineering* 41. 2009 p. 71–77.

CRAVEN, A., CARTON, A., McPHERSON, C. y McPHERSON, G. Determining and quantifying components of an aquaculture soundscape. *Aquacultural Engineering* 41. 2009. p. 158–165. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/aqua-online>.

CRIPPS, S. y BERGHEIM, A. Solids management and removal for intensive land-based aquaculture production systems. Stanger, Norway. En: *Aquacultural Engineering* 22. 2000. 33–56.

DAVID-RÚALES, C. y VÁSQUEZ-TORRES, W. Transporte iónico en el epitelio branquial de peces de agua dulce En: *Revista Lasallista de Investigación, Corporación Universitaria Lasallista–Colombia*. vol. 7, núm. 1, 2010, p. 9 -10. Disponible en: <http://www.redalyc.uaemex.mx>

DAVIDSON J, GOOD C, WELSH C, SUMMERFELT S. The effects of ozone and water exchange rates on water quality and rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* performance in replicated water recirculating systems. En: *Aquacultural Engineering* 44. United States. 2011 p. 80–96. Disponible en: www.elsevier.com/locate/aqua-online

DAVIDSON J. GOOD C. WELSH C. BRAZIL B. y SUMMERFELT S. Heavy metal and waste metabolite accumulation and their potential effect on rainbow trout performance in a replicated water reuse system operated at low or high system flushing rates. En: *Aquacultural Engineering* 41. United States. 2009 p. 136–145. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/aqua-online>

DAVIDSON, J., BEBAK, J. y MAZIK, P. The effects of aquaculture production noise on the growth, condition factor, feed conversion, and survival of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. En: *Aquaculture* 288 (2009) p. 337–343. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/aqua-online>

DAVIS, KB. y PARKER, NC. Physiological stress in striped bass: effect of the acclimation temperature. *Aquaculture*, 91. 1990. p. 349-358.

DOCAN, A., CRISTEA, V., DEDIU, L., MOCANU, M. Y GRECU, L. The impact of level of the stocking density on the haematological parameters of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) reared in recirculating aquaculture systems. En: AACL Bioflux, Volume 4, Issue 4. Aquaculture, Environmental Sciences and Cadastre Department, "Dunarea de Jos" University of Galați, Galați, Romania, European Union. 2011, p. 536 – 541. Disponible en: <http://www.bioflux.com.ro/aacl>

DURBOROW, R., CROSBY, D., y BRUNSON M. ammonia in Fish Ponds. Southern Regional Aquaculture Center SRAC. SRAC Publication No. 463. 1997. p.1.

EDING, E.H., KAMSTRA, A., VERRETH, J., HUISMAN, E. y KLAPWIJK, A. Design and operation of nitrifying trickling filters in recirculating aquaculture: A review. Aquacultural Engineering 34 (2006) p. 234 –260. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/aqua-online>.

ELLIS, T., NORTH, B., SCOTT, A., BROMAGE, N., PORTER, M. y GADD, D. The relationships between stocking density and welfare in farmed rainbow trout. J. Fish Biol. 61, 2002, 493-531.

ESLAVA-MOCHA, P. Una aproximación sistemática a los peces dulceacuícolas de Colombia. p. 21. En: XIV Jornada de Acuicultura. Jornada internacional de Sanidad y producción de peces. Universidad de los Llanos, instituto de acuicultura. Villavicencio octubre 10 del 2008. p.59 Disponible en: <http://www.patobiologaveterinaria.unal.edu.co/html/publicaciones.html>.

__ __ __ __. Correlación de variables nutricionales y de calidad de agua con la presentación de problemas sanitarios, clínicos y subclínicos en sistemas de producción comercial de cachama blanca y tilapia roja. Instituto de acuicultura. Universidad de los Llanos, Villavicencio .2009 68 p.

FAO. El estado de la inseguridad alimentaria en el mundo, La erradicación de hambre en el mundo: evaluación de la situación 10 años después de la cumbre mundial de la alimentación. Depósitos de documentos de la FAO. 2006. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/009/a0750s/a0750s00.htm>

__ __ __ __. El estado mundial de la pesca y la acuicultura. En: Parte 1. Examen mundial de la pesca y la acuicultura. 2002. p.22. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/005/y7300s/y7300s00.htm>

_ _ _ _ . The State of World Fisheries and Aquaculture. Rome, Italy 2004. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/007/y5600e/y5600e00.htm>.

FAURE, A. y LABBÉ, L. Práctica de la alimentación en los peces. p.399 – 411 En: Nutrición y alimentación de peces y crustáceos. Ediciones Mundi-Prensa. México 2004. 482 p.

GALLI-MERINO, O. y MIGUEL-SAL, O.; Sistemas de Recirculación y Tratamiento de agua (SENEDAC); Argentina-Santa Ana; 2007. p. 18- 20. Disponible en: <http://www.minagri.gob.ar>

GARCÍA, A. y CALVARIO, O. Manual de Buenas Prácticas de Producción Acuícola de Trucha para la Inocuidad Alimentaria. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Unidad Mazatlán en Acuicultura y Manejo Ambiental SENASIACA. Primera edición. México. 2003. 86. p.

GARCÍA-CRIOLLO, R., GÓMEZ-CERÓN A., SÁNCHEZ-ORTÍZ, I., SALAZAR-CANO, R., SANGUINO-ORTÍZ, W., *et al.* Evaluación de un sistema de recirculación de agua para el levante de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) en el laboratorio de organismos vivos y productividad primaria del Programa de Ingeniería en Producción Acuícola de la Universidad de Nariño. En: Revista electrónica de Ingeniería en Producción Acuícola. Año IV. Vol. 4 del 2009. 40 p.

GOOD, C., DAVIDSON, J., WELSH, C., BRAZIL, B., SNKVIK, K. y SUMMERFELT, S. The impact of water exchange rate on the health and performance of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* in water recirculation aquaculture systems. En: Aquaculture 294 2009 p. 80–85. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/aqua-online>

GOOD, C., DAVIDSON, J., WELSH, C., SNEKVIK, K. y SUMMERFELT, S. The effects of ozonation on performance, health and welfare of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* in low-exchange water recirculation aquaculture systems. En: Aquacultural Engineering 44 2011 p. 97–102. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/aqua-online>

GOYENOLA, G. Red de Monitoreo Ambiental Participativo de Sistemas Acuáticos. RED MAPSA. 2007.

GUERDAT, C. A Large Scale Evaluation of Commercially Available Biological Filters for Recirculating Aquaculture Systems, A thesis submitted to the Graduate Faculty of North Carolina State University In partial fulfillment of the Requirements for the degree of Master of Science. Raleigh, North Carolina. 2008. p. 18 – 19. Disponible en: <http://repository.lib.ncsu.edu>.

GUTIERREZ, M. y MALONE, R. Biological filters in aquaculture: Trends and research directions for freshwater and marine applications. 2006 p. 163–171 En: Aquacultural Engineering. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com> o <http://www.elsevier.com/locate/aqua-online>.

HERNANDEZ, T. Coeficiente de transferencia de oxígeno em reatores aeróbios de tubos concéntricos e leito fluidizado. Ilha Solteira. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Editorial Universidade Estadual Paulista. 2002. p. 125.

INGLE DE LA MORA, G., VILLAREAL, E., ARREDONDO, J., PONCE, J. y BARRIGA, I. Evaluation of some water quality parameters in a closed aquaculture recirculating-water system, submitted to different loads of fish. *Hidrobiológica* 13 (4): 247-253. 2003. p. 8.

JOJOA-CABRERA, G. IBARRA-CHAVEZ, E. y SÁNCHEZ-ORTIZ, I. Efecto del tiempo de retención hidráulica en reactores de lecho fijo para el tratamiento de efluentes del cultivo de Trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*). Univeridad de Nariño, Pasto, Colombia. En: *Livestock Research for Rural Development* 25 (10) 2013. p. 1 – 16.

KINKELIN, P., MICHEL, C., y GHITTINO, P. Tratado de las enfermedades de los peces, Ed. Acribia S.A. Zaragoza – España 1991. p. 1.

LARSEN, B., SKOV, P., MCKENZIE, D. Y JOKUMSEN A. The effects of stocking density and low level sustained exercise on the energetic efficiency of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) reared at 19 °C. En: *Aquaculture*. 2012 p. 226–233. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/aqua-online>

LATREMOUILLE, D. Fin erosion in aquaculture and natural environments. En: *Reviews in Fisheries Science*, 11 (4). 2003 p. 315 -335

LAURSEN D. ANDERSSON M. SILVA P. PETERSSON E Y HÖGLUND E. Utilising spatial distribution in two-tank systems to investigate the level of aversiveness to crowding in farmed rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*. En: Applied Animal Behaviour Science 144 2013 p. 163– 170. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/applanim>

LAURSEN D. PATRICIA I. BODIL S. LARSEN K y HÖGLUND E. High oxygen consumption rates and scale loss indicate elevated aggressive behavior at low rearing density, while elevated serotonergic activity suggests chronic stress at high rearing densities in farmed rainbow trout. En: Journal: physiology & Behavior Revision submitted. 2013. p. 23 – 33. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com>.

LÓPEZ-MACÍAS, J. Nutrición y alimentación acuícola. Editorial Universidad de Nariño, 2ª edición, Pasto, Colombia. 2011. p. 202-203.

__ __ __. Nutrición Acuícola. Fisiología digestiva de los organismos hidrobiológicos de cultivo. Ed. Universidad de Nariño, Pasto, Colombia. 1997 211 p.

LÓPEZ-MACÍAS, J. y RUALES, E. Manejo preventivo de la flavobacteriosis de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) en cultivos intensivos en jaulas flotantes y superintensivos en raceways. En: Acta Biol. Par., Curitiba, 41 (1-2): 2012. p. 25-51.

LÓPEZ-MACÍAS, J., SALAS-BENAVIDES, J., GOMEZ-NIEVES, V., GÓMEZ-CERÓN, A., LÓPEZ-ERASO, H., ORTEGA-SALAS, A., SANGUINO-ORTÍZ, W., BELTRÁN-TUMAL, D., LÓPEZ-MORENO, W., PAZ-ARGOTY, M., GAMEZ-CASTRILLÓN, A. y GUERRERO-ROMERO, C. Diagnóstico del estado de trofización, según la variabilidad fisicoquímica, bacteriológica y fitoplanctónica del lago Guamuez y su interrelación con la producción de trucha arcoíris en jaulas flotantes. Departamento de Recursos Hidrobiológicos, Universidad de Nariño, Pasto, Colombia. 2008. 36 p.

LÓPEZ, Y., TRUJILLO, E., FONSECA, Ma. y MARTÍNEZ, V. Identificación de las características físicas, químicas y microbiológicas del agua, que se alteran por uso acuícola. Centro Interamericano de Recursos del Agua, Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de México. Edo. De México, México. 2005. 38 p.

MACITYRE, C.M.; ELLIS, T.; NORTH, B.P. & TUMBULL, J.F. The influences of water quality on the welfare of farmed rainbow trout: a review. En: "Fish Welfare". Editado por Branson, E.J. Blackwell Publishing Ltd. Oxford, U.K. 2008. p. 311.

MACLEAN, A., NEIL, B., METCALFE, A., y MITCHELL, D. Alternative competitive strategies in juvenile Atlantic salmon *Salmo salar*: evidence from fin damage. En: Aquaculture 184 2000. p. 291–302. Disponible en: <http://www.elsevier.nl/locate/aqua-online>

McKENZIE, D., HÖGLUND, E., DUPONT-PRINET, A., LARSEN, A., SKOV, P., PEDERSEN, P. y JOKUMSEN, A. Effects of stocking density and sustained aerobic exercise on growth, energetics and welfare of rainbow trout. En: Aquaculture 338–341. 2012 p.216–222 Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/aqua-online>

MOCANU, V., DEDIU, L., DESIMIRA, D., DOCAN, A. y IONESCU, T. The influence of different stocking densities on growth performances of *Oncorhynchus mykiss* (walbaum, 1792) in a recirculating Aquaculture system. En: Lucrări Științifice - vol. 56, Seria Zootehnie. Aquaculture, Environmental Sciences and Cadastre Department, "Dunarea de Jos" University of Galati, Romania. 2010. p. 326 – 331.

MORADYAN, H., KARIMI, H., ALLAH, H. The Effect of Stocking Density on Growth Parameters and Survival Rate of Rainbow Trout Alevins (*Oncorhynchus mykiss*). En: World Journal of Fish and Marine Sciences. ISSN 2078-4589. Vol 4. 2012. 6 p.

MORALES, G. y QUIRÓS, R. Desempeño productivo de la trucha arcoíris en jaulas bajo diferentes estrategias de alimentación. En: Asociación Latinoamericana de Producción Animal. Vol. 15, Núm. 4. Universidad de Buenos Aires, Argentina. 2007. P. 121 – 129. Disponible en: <http://www.alpa.org.ve/ojs.index/php>

NOBLE y SUMMERFELT. Diseases encountered in rainbow trout cultured in recirculating systems. Elsevier Science Ltd. Annual Review of Fish Diseases, Vol. 6. 1996. p. 65-92.

NORTH, B., TURNBULL, J., ELLIS, T., PORTER, M., MIGAUD, H., BRON, J. y BROMAGE N. The impact of stocking density on the welfare of rainbow trout

(*Oncorhynchus mykiss*). En: *Aquaculture*, Volume 255, Issues 1–4, 31 May 2006, P. 466-479. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com>

ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD (OPS). Guía para Diseño de Sistemas de Tratamiento de Filtración en Múltiples Etapas. Lima: 2005. p. 16.

PADRÓS, F. Manual de técnicas básicas de diagnóstico patológico en peces. V Curso de Ictiopatología Práctica para Piscicultores Situación Sanitaria Actual del Cultivo de la Dorada y Lubina. Universidad Autónoma de Barcelona. España 2005. 90 p.

PARADA, G. Sistemas de recirculación para acuicultura, Instalaciones acuícolas. Fundación Chile. 2004. p. 1- 65. En: Revista electrónica de Ingeniería en Producción Acuícola. Año I. Vol. I del 2004. Disponible en: http://akane.udenar.edu.co/siweb/acuicola/revista/m_cnf1.html.

PEARSON-LE RUYET, J., LE BAYON, N. y GROS, S. How to assess fin damage in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. En: *Aquat Living Resources*. 20. 2007 p. 191 – 195. Disponible en: <http://www.alr-journal.org>.

PEDREIRA, M., LUZ, R., EPAMINONDAS DOS SANTOS, J., SAMPAIO VIERA, E. y SILVA SÁ FORTES, R. Biofiltração da água e tipos de substrato na larvicultura do pacamã. En: *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v.44, n.5, mayo 2009 p.511-518. Disponible en: <http://www.scielo>.

PELIS, R. y McCORMICK, S. Fin development in stream- and hatchery reared Atlantic salmon. En: *Aquaculture*. 2003 p. 525 – 536. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/aqua-online> o <http://www.sciencedirect.com>.

PEREIRA, L. y MERCANTE, C. A amônia nos sistemas de criação de peixes e seus efeitos sobre a qualidade da água. uma revisão. En: *Inst. Pesca*, São Paulo, 31(1). 2005 p. 81 – 88.

PERSON-LE RUYET, J. CHARTOIS, H y QUEMENER, L. Comparative acute ammonia toxicity in marine fish and plasma ammonia response. En: *Aquaculture* 136. 1995 p. 181-194.

PIEDRAHITA, R. Reducing the potential environmental impact of tank aquaculture effluents through intensification and recirculation. En: Aquaculture: Vol. 226. 31 Octubre 2003. p. 35-44. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com>

PROGRAMA IBEROAMERICANO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA EL DESARROLLO (CYTED). Sistema de recirculación de agua para cría de alevín de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) y carpa común (*Cyprinus carpio*). Agua potable para comunidades rurales, reuso y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas. Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua. Capítulo 7. 12 p.

RECALDE, P y ARAYA, J. Diseño de tecnologías para la descontaminación de aguas residuales en sistemas agropecuarios. Tesis de grado: Universidad Earth, Ingeniero agrónomo. Guacimo, Costa Rica. 2006. p. 35-46.

ROQUE D'ORBCASTEL, E., BLANCHETON, J. y BELAUD, A. Water quality and rainbow trout performance in a Danish Model Farm recirculating system: Comparison with a flow through system. Aquacultural Engineering. Elsevier B.V, Volume 40, Issue 3, 2009. p. 135-143.

ROQUE D'ORBCASTEL E, PERSON-LE RUYET J, LE BAYON N y BLANCHETON J. Comparative growth and welfare in rainbow trout reared in recirculating and flow through rearing systems. Aquacultural Engineering 40 2009 p. 79–86. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/aqua-online>

SAID, L. Relação ambiente e sanidade de peixes. Trabalho monográfico do curso de pós-graduação "Lato Sensu" em Medicina de Animais Selvagens e Exóticos apresentado á UCB como requisito parcial para a obtenção de título de Especialista em Clínica Médica e Cirúrgica de Animais Selvagens e Exóticos. Universidade Castelo Branco 2008. p. 38.

SALDARRIAGA J. Hidráulica de tuberías. Abastecimiento de agua, riego y redes. Editorial. Alfaomega. Bogotá, D.C., 2007. 671 p.

SÁNCHEZ-ORTÍZ, I. Remoção de nitrogênio de água residuária de Produção intensiva de tilápias com recirculação Utilizando reator de leito fluidizado com circulação Em tubos concêntricos. Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil – Ênfase em Recursos Hídricos e

Tecnologias Ambientais. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Faculdade de engenharia de ilha solteira. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Área de concentração em Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais. 2009. 170 p.

SÁNCHEZ, I., TEIXEIRA, G., SANTOS DE ARAÚJO, L., GEBARA, D., DALL'AGLIO, M., y MATSUMOTO, T. Reactores aeróbios de lecho fluidizado trifásico con circulación interna: caracterización hidrodinámica y del soporte. En: Revista Facultad de Ingeniería – Universidad de Antioquia N.º 56. Diciembre, 2010. p. 68-77. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/rfiua/n56/n56a07.pdf>.

SANDOVAL, J. Fundamentos de piscicultura continental y calidad de aguas naturales. Fundación Eco-Ambiental de Colombia. Universidad del Cauca. Popayán. 2007. p. 15.

SCHLOTTFELDT H.J. Some clinical findings of a several years survey of intensive aquaculture systems in northern Germany, with special emphasis on gill pathology and nephrocalcinosis. En: Aquaculture in heated effluents and recirculation systems, Vol. 2. Heenemann Verlagsgesellschaft, Berlín, Germany. 1981. p. 110-119.

SIPAÚBA-TAVARES, H. Qualidade da água em aqüicultura. Centro de Aqüicultura, Laboratório de Limnologia e Produção e Plâncton (LLPP), Jaboticabal, UNESP. p. 3. En: Revista electrónica de Ingeniería en Producción Acuícola. ISSN 1909 – 8138, Año 1, Vol. I del 2004. Disponible en: http://akane.udenar.edu.co/siweb/acuicola/revista/m_cnf1.html.

SIRAKOV, I. y IVANCHEVA, E. Influence of stocking density on the growth performance of rainbow trout and brown trout grown in recirculation system. En: Bulgarian Journal of Agricultural Science, 14 (No 2). National Centre for Agrarian Sciences. 2008, 150-154. Disponible en: <http://www.agrojournal.org>

SKOV P, LARSEN B, FRISK M, y JOKUMSEN A. Effects of rearing density and water current on the respiratory physiology and haematology in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* at high temperature. En: Aquaculture. Technical University of Denmark. Aquaculture 319. 2011 p. 446–452. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/aqua-online>

SNEDECOR, G. y COCHRAN W. Analysis of frequencies in one-way and two-way classifications. 196 – 213 p. En: Statistical Methods, Iowa State University Press, 1980. 507 p.

SOLARTE, C., GARCÍA, H. & IMUEZ, M. Bioestadística, Aplicaciones en Producción y Salud Animal. Universidad de Nariño. San Juan de Pasto. 2008 p.108.

SOUZA, R., BRESOLIN, I., BIONI, T., GIMENES, M., y DIAS-FILHO, B. The performance of a three-phase fluidized bed reactor in treatment of wastewater with high organic load. En: Revista Brasileira de Engenharia Química. No. 02. Vol. 21. Junio 2004. p. 219 – 227. Disponible en: <http://www.scielo.br/pdf/bjce/v21n2/a11v21n2.pdf>

ST-HILAIRE S. ELLIS A. COOKE B. NORTH P. TURNBULL F. KNOWLES T y KESTIN S. Fin erosion on rainbow trout on commercial trout farms in the United Kingdom. En: veterinaryrecord.bmj.com on January 7, 2012. p. 447 – 452. Disponible en: <http://journals.bmj.com/cgi/reprintform>

SUMMERFELT, R. y PENNE, C. Solids removal in a recirculating aquaculture system where the majority of flow bypasses the microscreen filter. Department of Natural Resource Ecology and Management, Iowa State University. En: Aquacultural Engineering 33. USA 2005.p. 214–224.

SUMMERFELT, S., DAVIDSON, J., WALDROP, T., TSUKUDA, S. y BEBAK-WILLIAMS, J. A partial-reuse system for coldwater aquaculture. The Conservation Fund Freshwater Institute. En: Aquacultural Engineering 31. 2004. p. 157–181.

TESKEREDŽIĆ, Z., TESKEREDŽIĆ, I., TOMEĆ, M., HACMANJEK, M. y McLEAN, E. The impact of restricted rationing upon growth, food conversion efficiency and body composition of rainbow trout. Original Research Article Water Science and Technology, Volume 31, Issue 10, 1995, p. 219-223.

TILNEY, L. y HOCUTT, CH. Changes in gill epithelia of *Oreochromis mossambicus* subjected to cold shock. Environmental biology of fishes Volume 19, Number 1 (1987). p. 35-44.

TIMMONS, M., EBELING, J., WHEATON, F., SUMMERFELT, S. y VINCI, B. Sistemas de recirculación para la acuicultura. Santiago: Fundación Chile. 2002. 450 p.

TRENZADO-ROMERO, C. Selección parental y dieta como estrategias de atenuación del estrés crónico en la trucha *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum, 1792). Tesis doctoral. Universidad de Granada, Facultad de Ciencias. 2004. p. 70

TURNBULL, J., BELL, I., ADAMS, C., BRON, J., y HUNTINGFORD, F. Stocking density and welfare of cage farmed Atlantic salmon: application of a multivariate analysis. *Aquaculture* 243 (2005) p. 121– 132. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/aqua-online>

USTAOĞLU, S. y ALAGİL, F. Effects of feeding frequency on nutrient digestibility and growth performance of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed a high lipid diet. En: *Revista, Turk. J. Vet. Anim. Sci.* 33(4). Department of Aquaculture, Faculty of Fisheries, Sinop University, Turkey 2009; p.317-322

VENEGAS, P., SOBENES, C., y ORTIZ, C. Efecto de Tiempos de retención Hidráulico de Agua, en un Sistema de cultivo Experimental de un Paso para Trucha Arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*). En: *Información Tecnológica* Vol. 19(6), Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile. 2008. p. 71-82

VOSYLIENÉ, M. y KAZLAUSKIENÉ, N. Comparative Studies of Sublethal Effects of Ammonia on Rainbow Trout (*Oncorhynchus Mykiss*) at Different Stages of its Development. Institute of Ecology of Vilnius University, *Akademijus* 2. *Acta Zoológica Lituanica*. Volume 14, Issue 1. Lithuania 2004. 6. p.

WEDLER, E. *Introducción en la Acuicultura con énfasis en los Neotrópicos*. Primera Edición., Santa Marta, Col. 1998. 324 p.

WHEATON, F. *Acuicultura "Diseño y construcción de sistemas"*. Ed AGT editor, SA. DF México 1993. p. 460-675.

_____. *Recirculating Aquaculture Systems: An Overview of Waste Management*. Department of Biological Resources Engineering. University of Maryland. p. 57- 68.

WYSOCKI, L., DAVIDSON, J., SMITH, M., FRANKEL, A., ELLISON, T., MAZIK P., POPPER, A. y BEBAK, J. Effects of aquaculture production noise on hearing, growth, and disease resistance of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*. En: Aquacultural Engineering 272. 2007 p. 687–697. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/aqua-online>.

YANG-ZHANG, S., LI, G., WUA, H., XING-GUO, L., YAN-HONG, Y., LING, T., HUANG, L. An integrated recirculating aquaculture system (RAS) for land-based fish farming: The effects on water quality and fish production. Aquacultural Engineering 45. p. 2011 93–102.

ANEXOS

Anexo 1. Datos promedios peso inicial y final (g), en los tratamientos.

Bloques	Peso inicio(g) de investigación			Peso fin(g) de investigación		
	T0	T1	T2	T0	T1	T2
1	30,99	30,99	30,99	35,68	65,54	63,46
2	30,68	30,68	30,68	36,15	62,37	62,91
3	31,34	31,34	31,34	39,08	62,98	61,84
Promedio	31,00±0,26	31,00±0,26	31,00±0,26	36,97±1,5	63,63±	1,3762,74±0,67

Anexo 2. Datos promedios incremento de peso en gramos, y análisis de varianza y Tukey.

Bloques	Incremento de peso periodo (g) de investigación		
	T0	T1	T2
1	4,70	34,56	32,48
2	5,47	31,69	32,23
3	7,75	31,64	30,51
Promedio	5,97±1,68	32,63±1,86	31,74±0,77

Análisis de Varianza para Inc. peso - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
Tiempo de retención hidráulica	1375,29	2	687,646	231,11	0,0001
BLOQUE	1,01869	2	0,509344	0,17	0,8485
RESIDUOS	11,9018	4	2,97544		
TOTAL (CORREGIDO)	1388,21	8			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Tiempo de retención hidráulica	Casos	Media LS	Grupos Homogéneos
T0	3	8,08	X
T2	3	31,74	X
T1	3	32,63	X

Anexo 3. Datos promedios longitud inicial y final (mm), en los tratamientos.

Bloques	Talla inicio (mm) de investigación			Talla fin (mm) de investigación		
	T0	T1	T2	T0	T1	T2
1	141,83	141,83	141,83	146,40	174,20	172,59
2	139,31	139,31	139,31	145,29	167,50	167,92
3	141,79	141,79	141,79	153,65	168,20	165,40
Promedio	140,98±1,18	140,98±1,18	140,98±1,18	148,45±3,71	169,97±3,01	168,64±2,98

Anexo 4. Datos promedios carga kg/m³ inicial y final, y análisis de varianza y Tukey.

Bloques	Carga inicio (Kg/m ³) de investigación			Carga final (Kg/m ³) de investigación		
	T0	T1	T2	T0	T1	T2
1	10,06	10,06	10,06	0,00	21,50	20,82
2	10,28	10,28	10,28	0,00	20,46	20,64
3	10,17	10,17	10,17	3,75	20,66	20,28
Promedio	10,17±0,09	10,17±0,09	10,17±0,09	1,25±1,77	20,87±0,45	20,58±0,22

Análisis de Varianza para Carga final (Kg/m³) - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
Tiempo de retención hidráulica	758,81	2	379,405	191,77	0,0001
BLOQUE	2,22149	2	1,11074	0,56	0,6097
RESIDUOS	7,91378	4	1,97844		
TOTAL (CORREGIDO)	768,945	8			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Tiempo de retención hidráulica	Casos	Media LS	Grupos Homogéneos
T0	3	1,25	X
T2	3	20,58	X
T1	3	20,8733	X

Anexo 5. Datos promedios y análisis de varianza y Tukey, para tasa de crecimiento específico (TCE).

TCE (%/día) periodo de investigación			
Bloques	T0	T1	T2
1	1,76	3,57	3,41
2	1,64	3,38	3,42
3	1,05	3,32	3,24
Promedio	1,49±0,380	3,42±0,128	3,36±0,103

Análisis de Varianza para Tasa de crecimiento específico - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
Tiempo de retención hidráulica	7,27742	2	3,63871	126,59	0,0002
BLOQUE	0,228422	2	0,114211	3,97	0,1121
RESIDUOS	0,114978	4	0,0287444		
TOTAL (CORREGIDO)	7,62082	8			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Tiempo de retención hidráulica	Casos	Media LS	Grupos Homogéneos
T0	3	1,48333	X
T2	3	3,35667	X
T1	3	3,42333	X

Anexo 6. Datos promedios, bienestar animal medido por medio de la necrosis de la aleta dorsal (%).

		Nivel de necrosis aleta dorsal (%)									
		0		1		2		3		4	
		Día 0	Día 21	Día 0	Día 21	Día 0	Día 21	Día 0	Día 21	Día 0	Día 21
T0		92,86	50,00	10,00	39,44	0,00	9,23	0,00	1,33	0,00	0,00
T1		92,86	36,00	10,00	42,67	0,00	13,33	0,00	5,33	0,00	2,67
T2		92,86	24,64	10,00	55,85	0,00	12,94	0,00	5,23	0,00	1,33

Anexo 7. Análisis de varianza y Tukey de aleta dorsal para grado de necrosis 0.

Análisis de Varianza para Necrosis aleta dorsal grado 0 - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
Tiempo de retención hidráulica	967,934	2	483,967	22,93	0,0064
BLOQUE	86,0678	2	43,0339	2,04	0,2452
RESIDUOS	84,4155	4	21,1039		
TOTAL (CORREGIDO)	1138,42	8			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Tiempo de retención	Casos	Media LS	Grupos Homogéneos
T2	3	24,6433	X
T1	3	36,0	X
T0	3	50,0	X

Anexo 8. Análisis de varianza y Tukey de aleta dorsal para grado de necrosis 1.

Análisis de Varianza para Necrosis aleta dorsal grado 1 - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
Tiempo de retención hidráulica	442,846	2	221,423	33,09	0,0032
BLOQUE	196,952	2	98,4762	14,72	0,0143
RESIDUOS	26,7649	4	6,69123		
TOTAL (CORREGIDO)	666,563	8			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Tiempo de retención	Casos	Media LS	Grupos Homogéneos
T0	3	39,4367	X
T1	3	42,6667	X
T2	3	55,6667	X

Anexo 9. Análisis de varianza y Tukey de aleta dorsal para grado de necrosis 2.

Análisis de Varianza para Necrosis aleta dorsal grado 2 - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
Tiempo de retención	30,2156	2	15,1078	3,85	0,1168
BLOQUE	11,4956	2	5,74781	1,47	0,3331
RESIDUOS	15,6912	4	3,92279		
TOTAL (CORREGIDO)	57,4024	8			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Anexo 10. Análisis de varianza y Tukey de aleta dorsal para grado de necrosis 3.

Análisis de Varianza para Necrosis aleta dorsal grado 3 - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
Tiempo de retención hidráulica	30,9689	2	15,4844	2,76	0,1768
BLOQUE	10,7022	2	5,35111	0,95	0,4589
RESIDUOS	22,4711	4	5,61778		
TOTAL (CORREGIDO)	64,1422	8			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Anexo 11. Análisis de varianza y Tukey de aleta dorsal para grado de necrosis 4.

Análisis de Varianza para Necrosis aleta dorsal grado 4 - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
Tiempo de retención hidráulica	10,6667	2	5,33333	2,00	0,2500
BLOQUE	10,6667	2	5,33333	2,00	0,2500
RESIDUOS	10,6667	4	2,66667		
TOTAL (CORREGIDO)	32,0	8			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Anexo 12. Datos promedios del bienestar animal por medio de necrosis de la aleta pectoral (%).

	Nivel de necrosis aleta pectoral (%)									
	0		1		2		3		4	
	Día 0	Día 21	Día 0	Día 21	Día 0	Día 21	Día 0	Día 21	Día 0	Día 21
T0	92,86	51,33	7,14	35,49	0,00	11,85	0,00	1,33	0,00	0,00
T1	92,86	46,67	7,14	38,67	0,00	10,67	0,00	1,33	0,00	2,67
T2	92,86	39,11	7,14	37,58	0,00	18,17	0,00	5,14	0,00	0,00

Anexo 13. Análisis de varianza y Tukey de aleta pectoral para grado de necrosis 0.

Análisis de Varianza para Necrosis aleta pectoral grado 0 - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
Tiempo de retención hidráulica	228,291	2	114,145	2,11	0,2369
BLOQUE	270,931	2	135,465	2,50	0,1973
RESIDUOS	216,515	4	54,1288		
TOTAL (CORREGIDO)	715,737	8			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Anexo 14. Análisis de varianza y Tukey de aleta pectoral para grado de necrosis 1.

Análisis de Varianza para Necrosis aleta pectoral grado 1 - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES				
Tiempo de retención hidráulica	15,6753	2 7,83764	0,72	0,5407
BLOQUE	35,3553	2 17,6776	1,62	0,3046
RESIDUOS	43,5508	4 10,8877		
TOTAL (CORREGIDO)	94,5814	8		

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Anexo 15. Análisis de varianza y Tukey de aleta pectoral para grado de necrosis 2.

Análisis de Varianza para Necrosis aleta pectoral grado 2 - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES				
Tiempo de retención hidráulica	97,7692	2 48,8846	1,67	0,2967
BLOQUE	94,0358	2 47,0179	1,61	0,3073
RESIDUOS	116,952	4 29,238		
TOTAL (CORREGIDO)	308,757	8		

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Anexo 16. Análisis de varianza y Tukey de aleta pectoral para grado de necrosis 3.

Análisis de Varianza para Necrosis aleta pectoral grado 3 - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	de GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
Tiempo de retención hidráulica	28,9307	2	14,4653	2,91	0,1662
BLOQUE	9,17069	2	4,58534	0,92	0,4688
RESIDUOS	19,9147	4	4,97868		
TOTAL (CORREGIDO)	58,0161	8			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Anexo 17. Análisis de varianza y Tukey de aleta pectoral para grado de necrosis 4.

Análisis de Varianza para Necrosis aleta pectoral grado 4 - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
Tiempo de retención hidráulica	14,2222	2	7,11111	4,00	0,1111
BLOQUE	3,55556	2	1,77778	1,00	0,4444
RESIDUOS	7,11111	4	1,77778		
TOTAL (CORREGIDO)	24,8889	8			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Anexo 18. Datos promedios del bienestar animal por medio de índice de mercado de aleta caudal (%).

	Nivel de necrosis aleta caudal (%)					
	A		B		C	
	Día 0	Día 21	Día 0	Día 21	Día 0	Día 21
T0	92,86	82,87	7,14	17,13	0,00	0,00
T1	92,86	81,33	7,14	18,67	0,00	0,00
T2	92,86	80,30	7,14	19,70	0,00	0,00

Anexo 19. Análisis de varianza y Tukey de aleta dorsal para análisis de mercado A.

Análisis de Varianza para Necrosis aleta dorsal nivel A - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
Tiempo de retención hidráulica	10,0855	2	5,04274	0,20	0,8233
BLOQUE	35,2322	2	17,6161	0,71	0,5433
RESIDUOS	98,7788	4	24,6947		
TOTAL (CORREGIDO)	144,096	8			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Anexo 20. Análisis de varianza y Tukey de aleta dorsal para análisis de mercado B.

Análisis de Varianza para Necrosis aleta dorsal nivel B, Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
Tiempo de retención hidráulica	10,0855	2	5,04274	0,20	0,8233
BLOQUE	35,2322	2	17,6161	0,71	0,5433
RESIDUOS	98,7788	4	24,6947		
TOTAL (CORREGIDO)	144,096	8			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Anexo 21. Datos promedios oxígeno disuelto, y análisis de varianza y Tukey.

Bloques	Oxígeno disuelto en mg/L		
	T0	T1	T2
B1	6,44	5,53	5,48
B2	4,89	4,5	4,6
B3	5,86	5,15	5,25
Promedio	5,73±0,64	5,06±0,42	5,11±0,37

Análisis de Varianza para Oxígeno Disuelto - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
Tiempo de retención hidráulica	0,8358	2	0,4179	13,29	0,0171
BLOQUE	2,06007	2	1,03003	32,77	0,0033
RESIDUOS	0,125733	4	0,0314333		
TOTAL (CORREGIDO)	3,0216	8			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Tiempo de retención hidráulica	Casos	Media LS	Grupos Homogéneos
T1	3	5,06	X
T2	3	5,11	X
T0	3	5,73	X

Anexo 22. Datos promedios de temperatura, y análisis de varianza y Tukey.

Bloques	Temperatura en °C		
	T0	T1	T2
B1	15,41	17,51	17,48
B2	14,81	16,67	16,53
B3	14,71	16,96	17,07
Promedio	14,98±0,31	17,05±0,34	17,03±0,34

Análisis de Varianza para Temperatura - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
Tiempo de retención hidráulica	8,4878	2	4,2439	162,08	0,0001
BLOQUE	1,00007	2	0,500033	19,10	0,0090
RESIDUOS	0,104733	4	0,0261833		
TOTAL (CORREGIDO)	9,5926	8			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Tiempo de retención hidráulica	Casos	Media LS	Grupos Homogéneos
T0	3	14,9767	X
T2	3	17,0267	X
T1	3	17,0467	X

Anexo 23. Datos promedios de pH, y análisis de varianza y Tukey.

Bloques	pH		
	T0	T1	T2
B1	8,16	7,83	7,8
B2	8,29	7,73	7,78
B3	8,32	7,83	7,84
Promedio	8,26±0,06	7,8±0,04	7,81±0,03

Análisis de Varianza para pH - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
Tiempo de retención hidráulica	0,4142	2	0,2071	57,00	0,0011
BLOQUE	0,00846667	2	0,00423333	1,17	0,3993
RESIDUOS	0,0145333	4	0,00363333		
TOTAL (CORREGIDO)	0,4372	8			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Tiempo de retención hidráulica	Casos	Media LS	Grupos Homogéneos
T1	3	7,79667	X
T2	3	7,80667	X
T0	3	8,25667	X

Anexo 24. Datos promedios de conductividad, y análisis de varianza y Tukey.

Bloques	Conductividad en mg/L		
	T0	T1	T2
B1	405	529	535
B2	424	447	447
B3	425	462	460
Promedio	418±9,3	479±35,92	481±38,98

Análisis de Varianza para Conductividad - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	de GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
Tiempo de retención hidráulica	33112,9	2	16556,4	866,33	0,0000
BLOQUE	1036,22	2	518,111	27,11	0,0047
RESIDUOS	76,4444	4	19,1111		
TOTAL (CORREGIDO)	34225,6	8			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Tiempo de retención hidráulica	Casos	Media LS	Grupos Homogéneos
T0	3	418,0	X
T1	3	546,0	X
T2	3	547,333	X

Anexo 25. Datos promedios de nitrógeno amoniacal total, y análisis de varianza y Tukey.

Bloques	Nitrógeno amoniacal total en mg/L		
	T0	T1	T2
B1	19,27	13,76	13,53
B2	13,42	13,68	13,63
B3	17,99	23,97	23,4
Promedio	16,9±2,51	17,14±4,83	16,85±4,63

Análisis de Varianza para NAT - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
Tiempo de retención hidráulica	0,141089	2	0,0705444	0,01	0,9934
BLOQUE	110,452	2	55,2259	5,16	0,0780
RESIDUOS	42,8016	4	10,7004		
TOTAL (CORREGIDO)	153,394	8			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Anexo 26. Datos promedios de amonio, y análisis de varianza y Tukey.

Bloques	Amonio en mg/L		
	T0	T1	T2
B1	13,16	0,42	0,49
B2	4,48	0,57	0,5
B3	9,13	0,61	0,15
Promedio	8,92±3,55	0,53±0,08	0,38±0,16

Análisis de Varianza para AMONIO - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
Tiempo de retención hidráulica	143,404	2	71,7021	11,14	0,0232
BLOQUE	12,0998	2	6,04991	0,94	0,4627
RESIDUOS	25,7349	4	6,43373		
TOTAL (CORREGIDO)	181,239	8			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Tiempo de retención hidráulica	Casos	Media LS	Grupos Homogéneos
T2	3	0,38	X
T1	3	0,533333	X
T0	3	8,92333	X

Anexo 27. Datos promedios de nitritos, y análisis de varianza y Tukey.

Bloques	Nitritos en mg/L		
	T0	T1	T2
B1	0,42	0,5	0,49
B2	0,52	0,54	0,55
B3	0,08	0,12	0,13
Promedio	0,34±0,19	0,39±0,19	0,39±0,19

Análisis de Varianza para NITRITOS - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
Tiempo de retención hidráulica	0,00468889	2	0,00234444	9,59	0,0298
BLOQUE	0,316089	2	0,158044	646,55	0,0000
RESIDUOS	0,000977778	4	0,000244444		
TOTAL (CORREGIDO)	0,321756	8			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Tiempo de retención hidráulica	Casos	Media LS	Grupos Homogéneos
T0	3	0,34	X
T1	3	0,386667	X
T2	3	0,39	X

Anexo 28. Datos promedios de nitratos, y análisis de varianza y Tukey.

Bloques	Nitratos en mg/L		
	T0	T1	T2
B1	2,89	6,99	6,99
B2	2,1	6,66	6,67
B3	3,49	15,46	15,34
Promedio	2,82±0,57	9,7±4,07	9,67±4,02

Análisis de Varianza para NITRATOS - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
Tiempo de retención hidráulica	94,0755	2	47,0377	7,35	0,0457
BLOQUE	73,47	2	36,735	5,74	0,0668
RESIDUOS	25,5966	4	6,39916		
TOTAL (CORREGIDO)	193,142	8			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Tiempo de retención hidráulica	Casos	Media LS	Grupos Homogéneos
T0	3	2,82667	X
T2	3	9,66667	X
T1	3	9,70333	X

Anexo 29. Datos promedios de DQO (mg/L) y DBO₅ (mg/L)

Bloques	DQO (mg/L)			DBO ₅ (mg/L)		
	T0	T1	T2	T0	T1	T2
B1	115,32	112,17	111,95	15,95	4,42	4,91
B2	101,22	141,90	166,18	14,99	4,75	4,72
B3	160,35	148,51	115,05	23,76	4,41	4,71
Promedio	125,63±25,21	134,19±15,81	131,06±24,87	18,23±3,93	4,53±0,16	4,78±0,09

Anexo 30. Análisis de varianza y Tukey para DBO₅ (mg/L)

Análisis de Varianza para DBO (mg/L) - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES				
Tiempo de retención hidráulica	368,929	2 184,465	23,05	0,0064
BLOQUE	14,3699	2 7,18493	0,90	0,4763
RESIDUOS	32,0073	4 8,00182		
TOTAL (CORREGIDO)	415,306	8		

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Tiempo de retención hidráulica	Casos	Media LS	Grupos Homogéneos
T1	3	4,52667	X
T2	3	4,78	X
T0	3	18,2333	X

Anexo 31. Análisis de varianza y Tukey para DQO (mg/L)

Análisis de Varianza para DQO (mg/L) - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES				
Tiempo de retención hidráulica	92,4223	2 46,2111	0,11	0,8975
BLOQUE	252,062	2 126,031	0,30	0,7542
RESIDUOS	1663,79	4 415,948		
TOTAL (CORREGIDO)	2008,28	8		

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Anexo 32. Datos promedios de alcalinidad CaCO₃ en mg/L, y análisis de varianza y Tukey.

Bloques	Alcalinidad CaCO ₃ en mg/L		
	T0	T1	T2
B1	180,56	102,98	98,10
B2	118,30	86,81	86,85
B3	107,75	74,43	74,69
Promedio	135,54±32,12	88,08±11,69	86,55±9,56

Análisis de Varianza para Alcalinidad - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES				
Tiempo de retención hidráulica	4655,12	2 2327,56	9,13	0,0323
BLOQUE	2760,15	2 1380,08	5,41	0,0728
RESIDUOS	1020,25	4 255,062		
TOTAL (CORREGIDO)	8435,52	8		

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Tiempo de retención hidráulica	Casos	Media LS	Grupos Homogéneos
T2	3	86,5467	X
T1	3	88,0733	X
T0	3	135,537	X

Anexo 33. Datos promedios de sólidos suspendidos en mg/L, y análisis de varianza y Tukey.

Bloques	Sólidos suspendidos en mg/L		
	T0	T1	T2
B1	74,89	88,97	86,72
B2	89,62	70,57	73,24
B3	72,52	67,68	66,73
Promedio	79,01±7,57	75,74±9,43	75,56±8,33

Análisis de Varianza para Sólidos suspendidos - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	de GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A:Tiempo de retención hidráulica	22,6036	2	11,3018	0,14	0,8738
B:BLOQUE	322,411	2	161,205	1,99	0,2511
RESIDUOS	323,878	4	80,9696		
TOTAL (CORREGIDO)	668,892	8			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Anexo 34.Datos promedios de sólidos disueltos en mg/L, y análisis de varianza y Tukey.

Bloques	Sólidos disueltos mg/L		
	T0	T1	T2
B1	169,5	256,57	250
B2	234,5	234,29	231,43
B3	227	198	190,33
Promedio	210,33±29,04	229,62±24,14	223,92±24,93

Análisis de Varianza para Sólidos disueltos - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	de GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
Tiempo de retención hidráulica	589,063	2	294,532	0,24	0,7957
BLOQUE	1275,43	2	637,716	0,52	0,6278
RESIDUOS	4866,53	4	1216,63		
TOTAL (CORREGIDO)	6731,02	8			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Anexo 35. Datos promedios de sólidos totales en mg/L, y análisis de varianza y Tukey.

Bloques	Sólidos totales en mg/L		
	T0	T1	T2
B1	280,28	329,72	329,05
B2	314,77	359,39	362,87
B3	410,29	414,99	415
Promedio	335,11±54,99	368,03±35,34	368,97±35,35

Análisis de Varianza para Sólidos totales - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	de GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
Tiempo de retención hidráulica	2231,11	2	1115,55	5,37	0,0736
BLOQUE	15738,9	2	7869,45	37,91	0,0025
RESIDUOS	830,295	4	207,574		
TOTAL (CORREGIDO)	18800,3	8			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual