

**DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE LA ACUMULACIÓN DE SÓLIDOS SOBRE
LA GENERACIÓN DE CONTAMINACIÓN DISUELTA Y LA TASA DE
CRECIMIENTO DE LOS PECES EN UN ESTANQUE MODIFICADO PARA EL
CULTIVO DE TRUCHA.**



Universidad
del Cauca

**JUAN MANUEL PENAGOS
EDUARDO ANDRÉS CEPEDA CARDOZO**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
POPAYÁN
2011**

**DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE LA ACUMULACIÓN DE SÓLIDOS SOBRE
LA GENERACIÓN DE CONTAMINACIÓN DISUELTA Y LA TASA DE
CRECIMIENTO DE LOS PECES EN UN ESTANQUE MODIFICADO PARA EL
CULTIVO DE TRUCHA.**

**JUAN MANUEL PENAGOS
EDUARDO ANDRÉS CEPEDA CARDOZO**

Proyecto de grado para aspirar al título de Ingeniero Ambiental

**Director de Trabajo:
MSc. JAVIER ERNESTO FERNÁNDEZ.**

**Codirector de trabajo:
Qco. DARWIN HOYOS MARTÍNEZ**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
POPAYÁN
2011**

Nota de aceptación:

Firma del director de trabajo de grado

Firma del codirector de trabajo de grado

Firma del jurado

Firma del jurado

Popayán, Agosto de 2011

HOJA DE DEDICATORIA

A mis padres Cilia Hortensia y Reinel por la confianza y apoyo incondicional en todo mi proceso académico y personal.

A mis hermanos Christian y Andrea por su colaboración cuando más los necesité.

A todos mis familiares que de una u otra forma contribuyeron para que este sueño se hiciera realidad.

A todos mis compañeros, profesores y amigos que me acompañaron en este proceso

JUAN MANUEL PENAGOS

A Dios por darme la oportunidad de culminar mi carrera.

A mis padres Narciso Cepeda y Beatriz Cardozo por apoyo incondicional y por los esfuerzos realizados para cumplir mis metas.

A mi hija Valeria Cepeda por su amor, por brindarme su alegría cuando más la necesite y darme la razón más importante para alcanzar este logro.

A mis hermanos Carlos y Sandra Cepeda por sus conocimientos y comprensión brindados.

A Clara Inés por brindarme su apoyo y por darme fuerzas para alcanzar este meta en mi vida.

EDUARDO ANDRÉS CEPEDA CARDOZO

HOJA DE AGRADECIMIENTOS

Los autores de este documento agradecen su apoyo y colaboración a:

Director de proyecto de grado Ing. Javier Ernesto Fernández, por confiar en nosotros, por brindarnos con sus conocimientos y por su apoyo durante todo el proyecto.

Codirector de proyecto de grado Qco. Darwin Hoyos Martínez por su guía durante todo este proceso.

Henry Guañarita por brindarnos una amistad y apoyo en la realización de este estudio.

A todos los profesores del programa por todas sus enseñanzas brindadas a lo largo de nuestra carrera.

A nuestras familias por su constante apoyo.

A nuestros compañeros y a todas las personas que de una u otra manera nos acompañaron en nuestro proceso académico.

Al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia, a la Universidad del Cauca, la Universidad del Valle, al Centro Regional de Productividad e Innovación del Cauca - CREPIC y a la Piscícola Chiliglo, quienes vienen apoyando el proyecto ESTUDIO, DISEÑO Y EVALUACION DE UN PROTOTIPO DE ESTANQUE PISCICOLA, en el marco del cual se presenta este documento.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE FOTOS	xi
LISTA DE ANEXOS	xii
ABREVIATURAS	xiii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
3. JUSTIFICACIÓN.....	4
4. OBJETIVOS.....	6
4.1 OBJETIVO GENERAL	6
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
5. MARCO TEÓRICO	7
5.1 GENERALIDADES.....	7
5.2 PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DE IMPORTANCIA EN LA PRODUCCIÓN DE TRUCHA.....	8
5.2.1 Temperatura:	8
5.2.2 Oxígeno disuelto.....	8
5.2.3 pH.....	8
5.2.4 Turbiedad.....	9
5.2.5 Amonio.....	9
5.2.6 Compuestos inorgánicos.....	9
5.3 ALIMENTACIÓN Y CRECIMIENTO	10
5.4 FUENTES DE CONTAMINACIÓN SÓLIDA AL INTERIOR DEL ESTANQUE	11
5.4.1 Excretas.....	11
5.4.2 Alimento no consumido	11
5.4.3 Peces muertos.....	11
5.5 FACTORES FISICOQUÍMICOS ALTERADOS POR EL CULTIVO DE TRUCHA	12
5.5.1 Reducción de oxígeno disuelto	12

5.5.2 Sólidos suspendidos.....	12
5.5.3 Sólidos disueltos.....	14
5.5.4 Dióxido de carbono.....	15
5.5.5 Nitrógeno	15
5.5.6 Fósforo.....	18
5.6 CONSECUENCIAS DE UN EQUIVOCADO MANEJO DEL CULTIVO.	20
5.6.1 Enfermedades	20
5.6.2 Eutrofización aguas abajo.....	21
6. METODOLOGÍA	23
6.1 DESCRIPCIÓN GENERAL Y UBICACIÓN	23
6.2 DESCRIPCIÓN DE LA ESTACIÓN	23
6.3 CARACTERÍSTICAS DEL ESTANQUE PROTOTIPO.....	24
6.4 DESARROLLO PRIMER OBJETIVO.....	25
6.5 DESARROLLO SEGUNDO OBJETIVO	27
6.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.....	29
7. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	31
7.1 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS PRIMER OBJETIVO.....	31
7.1.1 Variables controladas.....	31
7.1.2 Variables no controladas.....	32
7.1.3 Parámetros de control	34
7.2 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS SEGUNDO OBJETIVO	56
7.2.1 Análisis fisicoquímico del agua	56
8. CONCLUSIONES	65
9. RECOMENDACIONES.....	67
REFERENCIAS.....	68
ANEXOS	77

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Composición alimento truchas	10
Tabla 2. Características del estanque prototipo.	24
Tabla 3. Condiciones operación inicial	25
Tabla 4. Medición de parámetros con muestras compuestas.....	26
Tabla 5. Medición de parámetros con muestras puntuales.....	27
Tabla 6. Condiciones iniciales de operación.....	28
Tabla 7. Medición de parámetros fisicoquímicos.....	29
Tabla 8. Tiempos de trabajo.	29
Tabla 9. Datos estadísticos del caudal.....	32
Tabla 10. Datos estadísticos de temperatura.....	33
Tabla 11. Estadísticas descriptivas sólidos suspendidos totales	38
Tabla 12. Estadística descriptiva sólidos disueltos.....	41
Tabla 13. Estadística descriptiva fósforo fracción suspendida.	44
Tabla 14. Estadística descriptiva fósforo fracción disuelta	46
Tabla 15. Estadística descriptiva nitrógeno total fracción suspendida	48
Tabla 16. Estadística descriptiva nitrógeno total fracción disuelta	51
Tabla 17. Estadística descriptiva nitrógeno amoniacal	53
Tabla 18. Datos de caudal medidos en campo	81
Tabla 19. Datos de caudal promedio corrido.....	82
Tabla 20. Datos de temperatura.....	82
Tabla 21. Datos de potencial de hidrógeno	83
Tabla 22. Datos de sólidos disueltos	83
Tabla 23. Datos de oxígeno disuelto	84
Tabla 24. Datos de sólidos suspendidos	85
Tabla 25. Datos de nitrógeno total fracción suspendida y disuelta	85
Tabla 26. Datos de nitrógeno amoniacal	86
Tabla 27. Datos fósforo total fracción suspendida y disuelta	86
Tabla 28. Datos de caudal	89
Tabla 29. Datos de temperatura.....	89
Tabla 30. Datos de potencial de hidrógeno	89
Tabla 31. Datos de sólidos disueltos	90
Tabla 32. Datos de oxígeno disuelto	91
Tabla 33. Datos de sólidos suspendidos	92
Tabla 34. Datos de nitrógeno total fracción total	92
Tabla 35. Datos de nitrógeno amoniacal	92
Tabla 36. Datos fósforo total fracción total	93
Tabla 37. Prueba de normalidad de temperatura	94
Tabla 38. Prueba de normalidad de potencial de hidrógeno	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo de nitrógeno.....	18
Figura 2. Ciclo del fósforo en un lago.....	20
Figura 3. Dimensiones del estanque prototipo.....	24
Figura 4. Toma de muestra por el método de muestreo compuesto	26
Figura 5. Puntos y profundidades para la toma de oxígeno disuelto en el estanque	27
Figura 6. Concentración de OD en diferentes sectores del estanque Ensayo 1	34
Figura 7. Concentración de OD en diferentes sectores del estanque Ensayo 2	35
Figura 8. Consumo de OD a través del tiempo Ensayo1.....	36
Figura 9. Consumo de OD a través del tiempo Ensayo 2	37
Figura 10. Porcentaje consumo de OD por fenómenos de degradación y oxidación para los ensayos 1 y 2.....	38
Figura 11. Porcentaje de retención sólidos suspendidos.	39
Figura 12. Tasa Acumulación al interior del estanque	40
Figura 13. Incremento en la tasa de generación de SD para Ensayo 1 y 2.....	42
Figura 14. Incremento en la tasa SD por degradación y disolución para el Ensayo 1 y 2.	43
Figura 15. Porcentaje de retención fósforo total.	45
Figura 16. Tasa acumulación fósforo total.....	46
Figura 17. Tasa de generación de fósforo disuelto.	47
Figura 18. Porcentaje de transferencia de la fase sólida a disuelta para ensayo 1 y 2.	48
Figura 19. Porcentaje de retención de nitrógeno total Kjeldahl	49
Figura 20. Tasa de acumulación de nitrógeno total.	50
Figura 21. Tasa de generación de nitrógeno disuelto.	52
Figura 22. Porcentaje transferencia nitrógeno fase solida a disuelta para ensayo 1 y 2.	52
Figura 23. Incremento nitrógeno amoniacal para ensayo 1 y 2.....	54
Figura 24. Tasa de generación nitrógeno amoniacal.	55
Figura 25. Tasa acumulación SST.....	57
Figura 26. Tasa de generación SD.....	57
Figura 27. Comportamiento OD para el 100% del caudal suministrado.....	59
Figura 28. Comportamiento OD para el 90% del caudal suministrado.....	60
Figura 29. Comportamiento OD para el 85% del caudal suministrado.....	61
Figura 30. Comportamiento OD para el 80% del caudal suministrado.....	62
Figura 31. Consumo total de OD a diferentes caudales.....	62
Figura 32. Comparación OD presente en el sistema con las reducciones de caudal.	63
Figura 33. Tasa de crecimiento g/día.....	64
Figura 34. Crecimiento global peces.....	64

Figura 35. Curva de calibración para nitrógeno total y amoniacal ensayo 187

Figura 36. Curva de calibración fósforo total ensayo 1.....87

Figura 37. Curva de calibración nitrógeno total y amoniacal ensayo 288

Figura 38. Curva de calibración fósforo total ensayo 2.....88

Figura 39. Gráfica consumo de oxígeno por la trucha arcoíris, en mg Kg^{-1} de peso hora⁻¹, en temperaturas comprendidas entre 5 y 20°C y de 1 a 1000 gramos de peso. Fuente: Blanco (1995).95

Figura 40. Curva de crecimiento teórico a temperatura constante de 11 °C, en un tiempo de 20 meses y de 0 y 200 gramos de peso. Fuente : Blanco (1995).....96

LISTA DE FOTOS

Foto 1. Estanque modificado	97
Foto 2. Estanque modificado con polisombra	97
Foto 3. Válvula de extracción de lodos	97

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A: Fórmulas de cálculo para los parámetros de análisis.....	77
ANEXO B: Cálculo de las tasas empleadas en el análisis	79
ANEXO C: Datos de campo obtenidos de cada parámetro en la estación piscícola para cada uno de los Ensayos	81
ANEXO D: Datos laboratorio para los parámetros estudiados en el objetivo 1.....	85
ANEXO E: Curvas de calibración para el fósforo total, nitrógeno total y amoniacal.....	87
ANEXO F: Datos de campo obtenidos de cada parámetro en la estación piscícola para el objetivo 2	89
ANEXO G: Datos laboratorio para los parámetros estudiados en el objetivo 2	92
ANEXO H. Resultados de la prueba de normalidad.....	94
ANEXO I: Gráficas utilizadas para el análisis del segundo objetivo.	95
ANEXO J: Fotos estación piscícola Chiliglo y estanque modificado.....	97

ABREVIATURAS

AFL= Afluente

BH = Base Húmeda

BS = Base Seca

C = Concentración (mg/L)

CL₅₀ = Concentración Letal 50

EFL= Efluente

IC = Intervalo de confianza

L = litro

NAT = Nitrógeno Amoniacal Total

NT = Nitrógeno Total

OD = Oxígeno Disuelto

PT = Fósforo Total

SD = Sólidos Disueltos

SMWW = Standard Methods for the Examination of Water and Wastewaters

SST = Sólidos Suspendidos Totales

t = tiempo

W = Peso

1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial la disminución de la pesca de captura conlleva a convertir la acuicultura en una buena fuente alterna de proteína para consumo humano y como productora de nuevos empleos particularmente en zona rural (SIPA, 2009). Una rama importante de la acuicultura es la piscicultura cuyo objetivo es el cultivo racional de los peces, comprendiendo particularmente el control de su crecimiento y su reproducción. Y una de las más utilizadas es la piscicultura intensiva la cual consiste en la producción a un control lo más completo posible, la cual se realiza con fines netamente comerciales realizando controles permanentes de la calidad de agua y suministrando alimento con mayores niveles de proteína en forma permanente (Espinoza, 2004).

En Colombia, la Región Andina cuenta con 13933 hectáreas, aptas para el cultivo de peces. Siendo Antioquia, Valle del Cauca, Tolima y Huila los departamentos de mayor potencial para la piscicultura, donde están siendo utilizadas 2000 hectáreas, aproximadamente el 14% del total. La piscicultura en esta región está comprendida por tres especies importantes de cultivo las cuales son tilapia, cachama y trucha (Ministerio de agricultura y desarrollo rural MADR *et al.*, 2010), con crecimiento en producción de 12, 29 y 6% respectivamente en los últimos años (SIPA, 2009).

De estas tres especies cultivadas en el país, la trucha utiliza la mayor parte del recurso hídrico, puesto que por concesión de aguas a nivel nacional esta especie cuenta con aproximadamente 138 millones de m³/año para una producción de 4873 Ton, mientras que la tilapia utiliza 604 millones de m³/año para producir 33274 Ton (IDEAM, 2010). En el primer semestre del 2010 la producción de trucha se realizó en 1404 de los 8813 estanques y en 184 las 1327 jaulas existentes en el país para la producción piscícola, siendo Antioquia el mayor productor con 1093 Ton (MADR *et al.*, 2010).

La piscicultura en estanques presenta dos tipos de contaminación, uno en forma sólida generada por heces, materia orgánica, alimento no consumido, peces muertos y otra forma disuelta originada por la orina, degradación y disolución de los sólidos (True *et al.*,

2004). El efecto principal que genera la contaminación sólida es la acumulación de partículas sedimentables, la cual ayuda a la generación de fenómenos de degradación y disolución, incrementando los nutrientes en el efluente, disminuyendo el oxígeno disuelto y la eutrofización prematura aguas abajo (McDaniel *et al.*, 2005). Todo esto traslada la contaminación a la forma disuelta produciendo un problema ambiental importante, ya que el tratamiento de estos efluentes no es posible por medio de sistemas convencionales de remoción mecánica (Cripps Y Bergheim, 2000), debido a los altos volúmenes y flujos muy diluidos con concentraciones muy bajas, pero con cargas grandes (Davidson *et al.*, 2008).

El presente documento contiene un estudio orientado a determinar el efecto de la acumulación de sólidos sobre la generación de contaminación disuelta y la tasa de crecimiento de los peces en un estanque prototipo, a medida que se acumulan los sólidos; realizando seguimientos periódicos a los parámetros fisicoquímicos tales como temperatura, pH, sólidos suspendidos, sólidos disueltos, oxígeno disuelto, y los macro nutrientes nitrógeno y fósforo en la fracción suspendida y disuelta.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Colombia cuenta con una demanda hídrica nacional de 35877 millones de m³ anuales, de los cuales la mayor demanda del recurso corresponde al uso agrícola con 54 %, seguido en orden de importancia del sector energía 19.4 %, doméstico con 7.3%, el sector acuícola con el 7.2 %, el sector pecuario con el 6.2 % y otros 5.9 % (IDEAM, 2010),

Esta capacidad hídrica ha beneficiado la explotación de la piscicultura, aumentando el consumo per cápita anual de peces en el país, pasando de 4.3 kg en el 2001 a 6.2 kg en el 2006 (Torres, 2006). La producción anual ha pasado de 921 toneladas en el año 1985 a 66400 toneladas para 2008 (FAO, 2009); sin embargo, el crecimiento no ha sido acompañado de la implementación de sistemas de tratamiento de la contaminación generada.

Los efluentes de las estaciones truchícolas se caracterizan por poseer caudales alrededor de 1800 m³/día - Ton pez producido (Blanco, 1995), presencia de materia orgánica, nutrientes y microorganismos patógenos, que potencialmente pueden afectar las fuentes hídricas receptoras en la cuenca alta de los ríos, dada la ubicación de las estaciones truchícolas por encima de los 2000 msnm. La presencia de dichos compuestos en el efluente se da por la masificación de los procesos de degradación y disolución de los sólidos al interior de los estanque, liberando nutrientes que pueden generar problemas de eutrofización en la fuente receptora (Naylor *et al.*, 2000; Piedrahita, 2003; Stephens and Farris, 2004, citados por Maillard *et al.*, 2005), así como un incremento notable en la población de patógenos limitando el uso del recurso hídrico aguas abajo.

3. JUSTIFICACIÓN

En la última década la producción piscícola en Colombia se convirtió en la fuente de proteína animal que presentó mayor crecimiento, con un incremento anual del 16.4%, para una producción de 21641 Ton en el año 2000 (Espinal y Martínez, 2005), la cual fue incrementando hasta alcanzar su máximo de 70132 Ton en el 2006, para 2009 y 2010 la producción fue de 55000 y 58348 Ton respectivamente (MADR *et al.*, 2010).

Una de las especies cultivadas en la piscicultura es la trucha, la cual requiere altitudes superiores a los 2,000 metros sobre el nivel del mar, temperaturas entre los 12 y 18°C siendo estas regiones generalmente zonas de páramo, con alta calidad y cantidad de agua (INCODER, 2005). Esta actividad pecuaria impacta negativamente las cuencas altas de los ríos ya que sus vertimientos contienen materia orgánica y nutrientes provenientes en su mayoría del alimento no consumido, peces muertos y material vegetal aportado por el afluente (Maillard *et al.*, 2005), así como de las heces de los peces, donde la digestibilidad del alimento es del orden del 75%, generando un 25 % de residuo fecal (Hussar *et al.*, 2005). Las partículas presentan tamaños y densidades que facilitan su sedimentación dentro del estanque, permitiendo la acumulación de material orgánico que se degrada y disuelve fácilmente, consumiendo el oxígeno disuelto e incrementando la contaminación disuelta. Por esta razón se ve la necesidad de implementar un estanque de producción que además de la cría de peces, proporcione un adecuado almacenamiento y una fácil extracción del lodo. Un prototipo de estanque que cumple con estas características viene siendo desarrollando en el marco del proyecto de investigación ESTUDIO, DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN PROTOTIPO DE ESTANQUE PISCÍCOLA , con la participación del Centro Regional de Productividad e Innovación del Cauca CREPIC, Universidad del Cauca, Universidad del Valle, INCODER, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.

La contaminación disuelta es uno de los mayores problemas que presenta el cultivo de trucha ya que se compone de residuos líquidos como la orina de los peces y de los sólidos disueltos que se generan de la descomposición fisicoquímica y microbiológica que sufren los sólidos acumulados al interior del estanque (Wetzel y Likens, 1999). Con la

degradación de los sólidos se incrementa el consumo de oxígeno, la concentración de nitrógeno amoniacal, la presencia de microorganismos patógenos, la concentración de sólidos suspendidos y nutrientes (Ryding y Rast, 1992), disminuyendo la calidad del agua al interior del estanque y generando reducciones en las tasas de crecimiento de los peces (Arce, 2006). Por ende la degradación y disolución no controlada de los sólidos incrementa los costos de producción de la trucha, además se impacta en mayor proporción el ecosistema acuático de la fuente receptora (Bilotta y Brazier, 2008).

Para evitar la transferencia de los contaminantes desde la fracción suspendida a la disuelta se debe determinar el comportamiento de las dos fracciones para estimar el tiempo de permanencia de los lodos en el estanque, así como determinar las tasas de crecimiento de los peces en condiciones que no se permita la masificación de los procesos de degradación y disolución.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar el efecto de la acumulación de sólidos sobre la generación de contaminación disuelta y la tasa de crecimiento de los peces en un estanque prototipo para el cultivo de trucha construido en concreto con sistema para la acumulación y extracción del lodo.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer las tasas de transferencia de los contaminantes generados desde la fracción suspendida a la disuelta al interior de un estanque prototipo.
- Determinar el impacto de la variación de caudales sobre la tasa de crecimiento de los peces.

5. MARCO TEÓRICO

5.1 GENERALIDADES

En Colombia la acuicultura de agua dulce inicia en 1939, con la introducción de la trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*) en el Lago Tota y después en el embalse Neusa (Brenner y Referat, 1994) con fines deportivos, posteriormente por su aceptación en el mercado, se constituyó en un pez de cultivo (Espinal *et al*, 2005). Creándose la primera estación truchícola en el año 1939 en las Cintas (Lago Tota) y posteriormente la Estación de los Pozos (Boyacá) en 1942, convirtiéndose en proveedores importantes de alevinos en la región (SIPA, 2009).

La actividad acuícola está comprendida por el cultivo de peces, repoblamiento en cuerpos de aguas naturales y artificiales, cultivo de mariscos y crustáceos. Una rama importante de la acuicultura es la piscicultura cuyo objetivo es el cultivo racional de los peces, comprendiendo particularmente el control de su crecimiento y su reproducción, además vigila y regula la multiplicación, alimentación y el crecimiento de los peces; la cual se realiza en estanques naturales o artificiales y en jaulas (Espinoza, 2004). En el país la piscicultura está comprendida por tres especies importantes de cultivo las cuales son tilapia, cachama y trucha que para el primer semestre del año 2010 reportan 16.105, 4.399 y 1.588 Ton respectivamente alcanzando el 84% del total de la producción nacional (MADR *et al.*, 2010).

La trucha Arco Iris es un pez teleósteo perteneciente a la familia *Salmonidae* y género *Oncorhynchus*, nativo de California Estados Unidos (Aquino, 2008); esta especie es de forma alargada con una longitud que varía entre 30 y 50 cm, presentando el dorso grisáceo azulado, los lados con franjas rojizas ó anaranjadas con puntos negros o rojos y manchas en las aletas (Camacho *et al.*, 2000), este pez en hábitat natural es depredador de otras especies, siendo netamente carnívoro (Kim, 1997).

Para un óptimo desarrollo de los cultivos de trucha se requiere de agua con condiciones físico químicas determinadas, es decir, con valores de pH, temperatura y concentraciones de oxígeno disuelto específicos (Camacho *et al.*, 2000).

5.2 PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DE IMPORTANCIA EN LA PRODUCCIÓN DE TRUCHA

5.2.1 Temperatura: la trucha presenta un amplio rango de sobrevivencia que va desde 1°C hasta los 21°C, y para los juveniles en desarrollo se tiene una temperatura óptima entre 9 y 17°C. La temperatura es el factor más influyente dentro de un cultivo de trucha, ya que estos peces no pueden regular la temperatura corporal, es decir, son ectotermos (Morales, 2004), al mismo tiempo incide sobre el crecimiento y desarrollo de los mismos, en especial afectando su actividad metabólica; e incide en la concentración de oxígeno disuelto (OD) en el agua, puesto que a mayor temperatura la concentración de OD disminuye y por ende el sistema requiere de mayor cantidad de agua o de aireación constante, para evitar condiciones anóxicas (Aquino, 2008). La temperatura además de influir sobre los peces también lo hace sobre los procesos aeróbicos microbianos y su cinética de degradación (Vollertsen *et al.*, 1999). Para lograr la temperatura óptima necesaria en los cultivos de trucha, dicha actividad se desarrolla en zonas con alturas superiores a 2000 msnm, generalmente siendo zonas de páramo y cuencas altas de los ríos (INCODER, 2005)

5.2.2 Oxígeno disuelto: este parámetro está muy relacionado con la temperatura del entorno, presencia de microorganismos estabilizadores de los sólidos acumulados en el sistema, el caudal del afluente y la caída del agua al inicio del estanque (Camacho, 2000). La trucha necesita concentraciones de OD mínimo de 5,5 mg/L para su desarrollo, ya que con concentraciones más bajas los peces corren el riesgo de no poder extraer el oxígeno del agua ni transportarlo a través de las branquias (Aquino, 2008). La reducción del oxígeno generalmente se presenta por deficiencia en el recambio de agua, acumulación de alimento, sobrecarga de peces en el sistema y falta de limpieza de los estanques (Camacho, 2000)

5.2.3 pH: para el cultivo de trucha se acepta un rango de pH entre 6.5 y 9 (Malison y Hartleb, 2005), con variaciones muy altas (pH > 11) o muy bajas (pH < 4) se produce la muerte alcalina o la muerte ácida respectivamente. Además con valores de pH fuera del rango no hay reproducción y el crecimiento es lento, ocasionando sobrecostos por concepto de alimentación al productor. Afluentes con pH de 6 producen trastornos renales en los peces (Camacho, 2000).

5.2.4 Turbiedad: es causada por los sólidos suspendidos que ingresan al sistema o se producen en él; generalmente se compone por material arrastrado desde el suelo y vegetación especialmente en épocas de lluvia, además de organismos planctónicos, micro y macro fotosintéticos. La turbiedad expresada en unidades nefelométricas totales (NTU) disminuye la absorción de oxígeno por parte de los peces afectando sus branquias y originando infecciones en las mismas por irritaciones, reduciendo la tasa de crecimiento de los peces por estrés (Aquino, 2008).

5.2.5 Amonio: es producido por los desechos metabólicos de los peces y la degradación de la materia orgánica acumulada en el sistema. La concentración máxima aceptable para la producción de trucha es de 0,012 mg/L en forma de amoníaco. Los compuestos amoniacales se encuentran en dos estados los cuales son amonio ionizado (NH_4^+) y amoníaco libre (NH_3) (Camacho, 2000), este último es el más tóxico de las dos formas, ocasionando lesiones en las branquias, es decir, destrucción del epitelio branquial; estimulación de la glucólisis, inhibición de la producción de ATP, alteración de la actividad osmorreguladora, supresión del sistema inmunológico y retardo del crecimiento (Camargo y Alonso, 2007). El pH del agua determina la toxicidad del amoníaco, puesto que al aumentarlo en una unidad causa que se incremente 10 veces la producción de amonio tóxico (Aquino, 2008).

5.2.6 Compuestos inorgánicos: se requiere que las condiciones hidrológicas para el cultivo de trucha contengan ciertas concentraciones de compuestos inorgánicos tales como:

- Calcio: contenido mayor a 52 mg/L
- Cobre: en aguas blandas, concentraciones menores a 0.006 mg/L y para aguas duras concentraciones menores a 0.3 mg/L
- Hierro: concentración menor a 1,0 mg/L
- Nitritos: concentraciones menores a 0.55 mg/L
- Ácido sulfhídrico: concentración menor a 0.002 mg/L

5.3 ALIMENTACIÓN Y CRECIMIENTO

El beneficio económico de la acuicultura intensiva y semi intensiva se encuentra íntimamente relacionado con el suministro y el costo del alimento, puesto que estos cultivos requieren alimentos con niveles elevados de proteína, entre 30 y 60% debido a que esta especie de pez es carnívora (Kim, 1997). La trucha es una especie muy eficiente que aprovecha de su dieta la proteína y los lípidos para convertirlos en energía, pero asimila pobremente los carbohidratos por lo que es necesario que el alimento contenga menos del 12% de estos últimos. Las truchas necesitan en su dieta vitaminas como la A, D, E, K, Complejo B; y varios minerales como el fósforo, manganeso, zinc y cobre, los cuales son utilizados para el desarrollo estructural, osmorregulación, y como co-factores en las reacciones metabólicas (Lovell, 2002).

La composición del alimento utilizado para la ceba de trucha, es decir, individuos con peso entre 150 y 250 gramos, esta referenciado en la Tabla 1

Tabla 1. Composición alimento truchas

Proteína promedio	43%
Grasa mínimo	2.5%
Fibra máximo	4.0%
Cenizas máximo	12%
Humedad máxima	13%
Tamaño Pellet	3.5 y 5.5 mm

Fuente: SOLLA (2009). Registro ICA 6239 AL

Del alimento suministrado a las truchas, la digestión oscila entre el 70 y 75% convirtiendo un máximo del 30% en residuo fecal, el cual es fuente de diversos compuestos orgánicos que generan contaminación microbiológica y el efecto de reducción del oxígeno disuelto disponible en el agua afectando la respiración de los peces (Hussar *et al.*, 2005).

El crecimiento es uno de los factores importantes en el cultivo de trucha ya que éste depende de un buen funcionamiento en el estanque, porque la calidad del agua afecta de manera directa la tasas de crecimiento de los peces; al no tener condiciones adecuadas se va perdiendo el apetito, se estresan y proliferan enfermedades, con lo que el pez utiliza sus energías en la supervivencia y no para su crecimiento (Mallya, 2007). Otro aspecto que influye en el crecimiento es la densidad en el estanque ya que un sobre

poblamiento produce un reducción en el espacio del pez, por lo tanto no se alimentan de manera uniforme (Hosfeld *et al.*, 2009).

En el ciclo de vida de la trucha arco iris se describen generalmente cinco etapas: ovas, alevín, cría, juvenil y adulto; presentando un mayor crecimiento en la etapa juvenil que en la de adultez, debido a que los peces adultos utilizan su alimento en la producción de huevos o esperma, por eso el crecimiento es más rápido en la etapa juvenil (Aquino, 2008)

5.4 FUENTES DE CONTAMINACIÓN SÓLIDA AL INTERIOR DEL ESTANQUE

5.4.1 Excretas: aproximadamente el 30% del alimento consumido por el pez se convierte en residuos fecales, estos desechos están compuestos por 13% de la proteína, el 8% de la grasa, 40% de los carbohidratos, y 50% de las cenizas ingeridas (Asgard *et al.*, citados por Cripps y Bergheim, 2000). Además se excreta alrededor del 40% de la proteína ingerida como nitrógeno disuelto en forma de NH_3 y NH_4^+ a través de las agallas y la orina (Cripps y Bergheim, 2000).

5.4.2 Alimento no consumido: el suministro de alimento en las estaciones piscícolas se realiza mediante el método de boleo, el cual consiste en tomar la ración de alimento y arrojarla al estanque tratando de distribuirlo uniformemente, evitando que los peces se agrupen en un solo lugar (Chimbor, 2009). Del total de la ración suministrada entre el 5 y 10% no es consumido por los peces, de este porcentaje una parte es transformada por acción de las bacterias en compuestos solubles en el agua tales como amonio, fosfatos y dióxido de carbono; y el resto se acumula en el fondo del estanque como sedimento (Rodríguez y Anzola, 2001).

5.4.3 Peces muertos: la muerte de los peces se convierte en foco de riesgo sanitario puesto que se descomponen fácilmente, por lo tanto para el bienestar del sistema es conveniente la rápida extracción de ellos (Asociación civil LABOR, 2010), además de contabilizarlos diariamente para realizar un diagnóstico de enfermedades y restarlos al inventario de la producción. La muerte de los peces está alrededor de 7,9% (Blanco, 1995).

5.5 FACTORES FISICOQUÍMICOS ALTERADOS POR EL CULTIVO DE TRUCHA

5.5.1 Reducción de oxígeno disuelto: Para el cultivo de trucha se requieren concentraciones de oxígeno disuelto entre 5,5 y 9 mg/L y presión de oxígeno en el agua de 157 mm Hg para que éste se pueda difundir a la sangre por medio de las branquias y así transportarse al interior del cuerpo a través del sistema circulatorio, la presión del oxígeno en el agua debe ser superior a 122 mm Hg puesto que esta es la presión que tiene la sangre del pez y 35 mm Hg en los órganos y tejidos del animal. Además del oxígeno necesario para la respiración, las truchas requieren entre 0.3 y 0.5 Kg de oxígeno por cada Kg de alimento consumido (SOLLA, 2009), además estudios de Kindschi *et al.* (1991) citado por Colt *et al.*, 2009, demuestran que la especie *Oncorhynchus mykiss* requiere entre 200 y 280 $\frac{\text{g O}_2}{\text{Kg alimento}}$ (Colt *et al.*, 2009). Una conversión estable de alimento requiere buena saturación de oxígeno en el agua puesto que al reducir esta saturación al 70 y 50% la tasa de conversión se incrementa 20 y 44% respectivamente, lo cual disminuye el crecimiento de los peces (Brons, 1986, citado por SOLLA, 2009).

Una de las causas de la reducción del oxígeno disuelto es la degradación in situ del contenido orgánico tanto del alimento como de las excretas de los peces (Bilotta y Brazier, 2008), lo que conlleva a condiciones anóxicas permitiendo que gases como amoníaco, dióxido de carbono, metano y sulfuro de hidrógeno puedan ser generados (Buryniuk *et al.*, 2006) además del incremento de la tasa metabólica debida al aumento en la temperatura del estanque, es decir, la variación de la temperatura del día con respecto a la noche y factores como densidad de siembra, disminución de caudal y salida de oxígeno del agua a la atmósfera.

5.5.2 Sólidos suspendidos: El término sólidos suspendidos (SS) se refiere a la masa (mg) o concentración (mg/L) de la materia inorgánica y orgánica, que por la turbulencia se encuentra en la columna de agua de un río, lago o estanque. Los SS son el resultado de alimento no consumido, heces fecales (Buryniuk *et al.*, 2006), medicamentos, peces muertos (Cripps y Bergheim, 2000) que se van acumulando a lo largo del estanque (Malison y Hartleb, 2005), normalmente son agrupaciones de partículas finas, con diámetro inferior a 62 μm (Bilotta y Brazier, 2008); por lo que Kelly (1997) usando filtros de 100 y 30 μm consigue reducciones en SST del 77 y 71% respectivamente (Cripps y Bergheim, 2000), además dichos sólidos presentan velocidad de decantación de 1 cm/s,

con la cual el alimento no consumido y las heces son separados por sedimentación (Loix, 2005).

Dentro del alimento consumido por la trucha del 48% del nitrógeno ingerido el 79% es excretado en forma de nitrógeno amoniacal total NAT (Dalsgaard *et al.*, 2011), además estos sólidos contienen entre 7 y 32% de nitrógeno total y 30 a 84% de fósforo total en fracción sólida, asimismo de microorganismos y materia orgánica causante de los incrementos en la DBO (Cripps y Bergheim, 2000). El exceso de sólidos suspendidos genera alteraciones físicas en el agua tales como la reducción de la penetración de la luz y cambios de temperatura; y químicas como la liberación de contaminantes (metales pesados y pesticidas), nutrientes (fósforo y nitrógeno) y la consecuente reducción del oxígeno disuelto (Bilotta y Brazier, 2008), debido a esto las concentraciones superiores a 80 mg/L son perjudiciales para la salud de los peces (Aquino, 2008)

Los efectos de los SS sobre los organismos acuáticos son directamente proporcionales a las concentraciones de los sólidos, no obstante otros factores como el tiempo de exposición, el tamaño de partículas y la composición química son parámetros que influyen sobre el efecto real de los SS hacia la biota acuática (Bilotta y Brazier, 2008). En el caso de los peces los SS afectan directamente las agallas causando lesión, congestión e irritación de las mismas (Malison y Hartleb, 2005) además de la sofocación y adecuando el ambiente para la proliferación de organismos patógenos (Cripps y Bergheim, 2000); conduciendo a que este parámetro sea causa importante del deterioro de la calidad del agua (Bilotta y Brazier, 2008) disminuyendo la productividad primaria en el estanque y las fuentes receptoras (Malison y Hartleb, 2005) cuando no se tratan adecuadamente los efluentes

Los sólidos suspendidos al interior del estanque sufren el proceso físico de disolución, el cual es producido por fuerzas cortantes como la turbulencia del agua, movimiento de los peces y bombeo del agua (Brinker *et al.*, 2005).

Además de la disolución, las excreciones sólidas y el alimento no consumido depositados en el fondo de los estanques sufren procesos de fermentación y degradación orgánica. El resultado final es la aparición de una serie de elementos químicos que se incorporan al agua y en la última fase al sustrato del medio (Blanco, 1995). El material es de origen

orgánico, por lo tanto su proceso de degradación se realiza de acuerdo con estas características, cuyo resultado final es la mineralización o transformación en sales minerales, incrementando la aparición de sólidos disueltos (Aquino, 2008).

La generación anual de sólidos suspendidos en una estación piscícola fluctúa según Axler (1997) entre 289 y 839 Kg SS/Ton de pez producido; Bureau (2003) reporta un rango más pequeño, el cual oscila de 240 a 318 Kg SS/Ton de pez producido (Roque *et al.*, 2008), y Stewart (2006) reportan para la especie *Oncorhynchus mykiss* una generación de SST que oscila entre 150 y 200 g SS/Kg de alimento consumido (Stewart *et al.*, 2006).

Con esta generación varios autores reportan concentraciones de SS en los efluentes piscícolas mostrando coincidencias como Muir y Solbe (1982) citados Cripps y Bergheim (2000), los cuales obtienen rangos entre 5 y 50 mg/L, Cripps (2000) reporta concentraciones mínimas de 6.9 mg/L (Cripps y Bergheim, 2000).

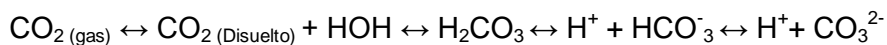
La presencia de dos tipos de efluente en el proceso de cultivo de peces hace que se obtengan dos valores diferentes de sólidos suspendidos. Un tipo de efluente es el del proceso de levante y engorde del pez, el cual maneja cerca del 95% del agua con concentraciones aproximadas de 6 mg/L; mientras que el segundo efluente se da en la operación de lavado del estanque, utilizando menor cantidad de agua pero a la vez incrementando la concentración de sólidos suspendidos a 793 mg/L aproximadamente. (De la Cruz y Salazar, 2007).

Estos tipos de efluentes cargados de sólidos suspendidos hacen que las fuentes receptoras disminuyan su calidad, conduciendo a mayores costos de tratamiento de las mismas, reducción de los recursos pesqueros, degradación ecológica de los ambientes acuáticos y descenso del aspecto estético (Bilotta y Brazier, 2008).

5.5.3 Sólidos disueltos: Los sólidos disueltos en el agua están compuestos por iones inorgánicos como cloruros, sulfatos, fosfatos, nitratos, calcio, magnesio, y orgánicos como bicarbonatos, entre los más característicos (Brix, 2010); los cuales están relacionados con el grado de mineralización del agua ya que son iones de sales minerales que el agua ha conseguido disolver a su paso (Roldán y Ramírez, 2008), presentando un diámetro menor a 1 μ (SAGPyA, 2006).

La trucha puede tolerar concentraciones menores a 500 mg/L, no obstante un incremento de los sólidos disueltos puede ocasionar diversos efectos perjudiciales para el pez como el endurecimiento en el agua (Brix, 2010), y problemas de osmorregulación debido al aumento en la salinidad producida principalmente por los cloruros (Roldán y Ramírez, 2008). Es por ello que los sólidos disueltos son un problema importante que se genera en los cultivos de trucha y su tratamiento no es posible por medio de sistemas convencionales de remoción mecánica (Cripps y Bergheim, 2000).

5.5.4 Dióxido de carbono: El dióxido de carbono es excretado hacia el agua como $\text{CO}_2(\text{gas})$ por lo peces a través de sus agallas, al ser liberado, este compuesto reacciona disolviéndose y formando bicarbonatos, carbonatos y ácido carbónico (Colt *et al.*, 2009); mediante las reacciones



Altas concentraciones de dióxido de carbono pueden reducir el pH e interferir en el transporte de oxígeno a través de las agallas de los peces (Malison y Hartleb, 2005), además de formar depósitos calcáreos en los riñones o nefrocalcinosis, con concentraciones de 24 mg/L y exposición por 58 días para salmónidos, en especial para la especie *Salmo salar* (Fivelstad, 1988; citado por Colt, 2006). Para el caso de la trucha especie *Oncorhynchus mykiss*, Kutty en 1968 determinó que el coeficiente de respiración es de $1320 \frac{\text{gCO}_2}{\text{kgO}_2}$ (Colt *et al.*, 2009).

Otro efecto de las altas concentraciones de CO_2 es un elevado ritmo cardíaco que incrementa el volumen de sangre en las agallas, reduciendo el tiempo de tránsito de la sangre en las mismas de 3 a 1 segundo, limitando la duración necesaria para realizar los procesos de asimilación del oxígeno (Brauner *et al.*, 2000).

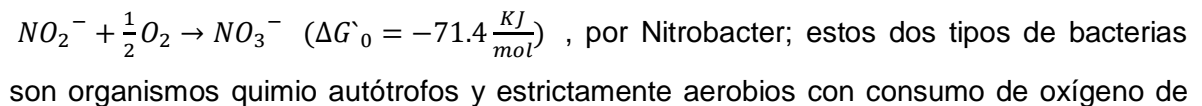
5.5.5 Nitrógeno: El nitrógeno se encuentra presente en los aminoácidos, base de las proteínas, las cuales son componentes importantes de todas las células y en promedio contienen 16% en peso de este nutriente (Henry y Heinke, 1999). Las proteínas al ser consumidas por los peces, son sintetizadas y una parte es metabolizada para convertirse en tejido y energía, mientras que el resto es excretada mediante las branquias y la orina

en forma de amonio, siendo éste el mayor desecho metabólico producido por los peces (Francis y Watson, 2005). Además, el alimento de los peces es la principal fuente de nitrógeno constituyendo entre el 52 y 72% del total de los nutrientes presentes en los efluentes piscícolas (Gal *et al.*, 2003), el cual genera problemas ambientales en las fuentes receptoras, con concentraciones críticas entre 0.30 a 0.93 mg N/L (Tello, 2010).

El amonio es uno de los tóxicos comúnmente presentes en los efluentes (Hofer, 1995), este se presenta en forma de NH_4^+ o también llamado amonio ionizado, y NH_3 o amoniaco, estas dos formas de amonio representan el nitrógeno amoniacal total NAT (Francis y Watson, 2005). El NH_4^+ es la forma menos tóxica y predomina a pH bajo mientras que el amoniaco es la forma más tóxica y predomina con pH relativamente altos, estando en menos del 10% para pH menores de 8 (Hargreaves y Tucker, 2004).

En pequeñas cantidades el amoniaco causa estrés y leve daño a las agallas de los peces, mientras que estando expuestos a altos niveles, los peces son susceptibles a infecciones bacterianas (Francis y Watson, 2005), pobre conversión alimenticia puesto que los peces no pueden extraer eficientemente la energía del alimento (Hargreaves y Tucker, 2004), efectos neurotóxicos, desbalance osmótico, hipertrofia e hiperplasia de las agallas e incluso la muerte de los peces (Hofer, 1995). Para la especie *Oncorhynchus mykiss* se tiene que la toxicidad del amoniaco o CL_{50} está entre 0.16 y 0.37 mg N- NH_3 /L para una exposición de 96 horas y de 0.05 mg N- NH_3 /L para 72 días (Camargo y Alonso, 2007).

La forma tóxica del nitrógeno amoniacal predomina durante el final de la tarde mientras que el NH_4^+ predomina desde el amanecer hasta media mañana (Hargreaves y Tucker, 2004), esto debido al ciclo del nitrógeno en el agua el cual elimina amoniaco transformándolo en nitrito o NO_2^- por medio de bacterias del grupo Nitrosomas que usan como sustrato el NH_4^+ , dicho NO_2^- es convertido a nitrato o NO_3^- por las bacterias Nitrobacter, las cuales usan como sustrato dicho nitrito (Hargreaves y Tucker, 2004), mediante las reacciones de nitrificación



4.57gO₂/gNH₄ oxidado y consumo de alcalinidad de 7.14 mgCaCO₃/mg NH₄oxidado, además ambas bacterias siguen la cinética de crecimiento tipo Monod, las cuales tienen tasas de formación de 1 a 30 millones y de 5 a 70 millones µgN/día-g seco de célula, correspondientemente (Atlas y Bartha, 2002).

El nitrato en bajas concentraciones puede ser considerado inofensivo para los peces, esto debido a la baja permeabilidad branquial, lo cual hace que su absorción a través de las branquias sea limitada (Camargo y Alonso, 2007), dicho nitrato es tomado y metabolizado como alimento por las algas (Francis y Watson, 2005). El inconveniente del ciclo del nitrógeno para la piscicultura es que estas bacterias necesitan oxígeno para realizar su función de conversión, por lo tanto si el oxígeno disuelto es limitado el ciclo se rompe y solo se transforma el nitrógeno amoniacal en nitrito que es tóxico para los peces (Hargreaves y Tucker, 2004). La toxicidad del nitrito o CL₅₀ para la trucha de la especie *Oncorhynchus mykiss* es de 0.1 a 0.4 mg NO₂/L en un periodo de 96 horas, conllevando a afectar la conversión de los pigmentos respiratorios a formas incapaces de transportar y liberar oxígeno causando asfixia y la muerte de los peces (Camargo y Alonso, 2007).

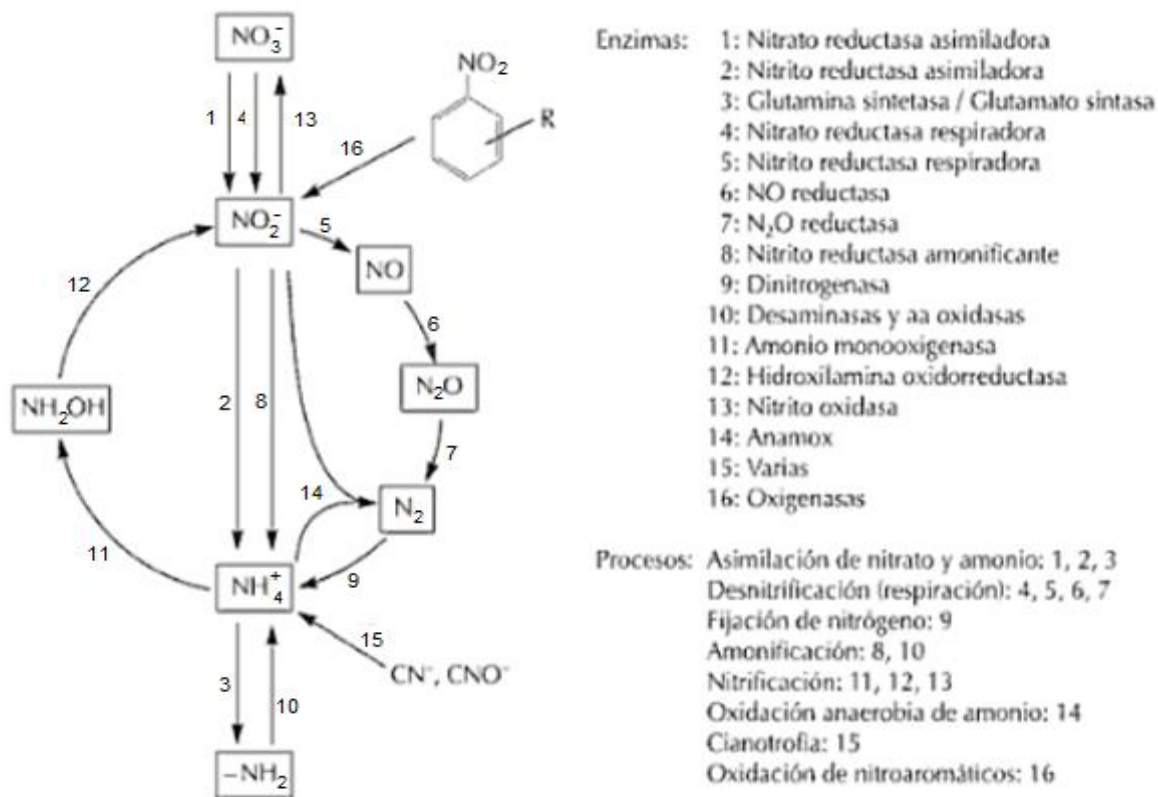


Figura 1. Ciclo de nitrógeno

Fuente: (Castillo *et al.*, 2005)

5.5.6 Fósforo: El fósforo total PT está compuesto por cantidades de fósforo disuelto o reactivo y en forma particulada como orto fosfatos, poli fosfatos y fósforo orgánico. Alrededor del 30 al 80% de los sólidos suspendidos en los efluentes de trucha están compuestos por fósforo (Stewart *et al.*, 2006).

El alimento comercial para la ceba de trucha generalmente contiene más fósforo que lo requerido por el pez (McDaniel *et al.*, 2005), en relación de 4:7 (N, P) cuando lo normal es de 1:1 (Stewart *et al.*, 2006); este nutriente es excretado por medio de la orina o las heces fecales en forma de fosfatos inorgánicos (Coloso *et al.*, 2003). Entre el 30 y 84% del total de fósforo descargado en los efluentes piscícolas es generado por la excreta del pez, alimento no consumido y restos de peces muertos (Lefrançois *et al.*, 2010). Dicho

alimento no consumido aporta la mayor parte del fósforo ya que tiene concentración promedio en base seca de 16.06 mg P/g de alimento (García – Ruiz y Hall, 1996).

A nivel general en la piscicultura se tiene que la retención de fósforo está en un rango del 17 al 40% expresado con respecto a la cantidad de éste en el alimento; análogamente las heces fecales contienen entre el 15 y 70% y las excreciones de fósforo en forma disuelta presentan del 1 al 62% (Piedrahita, 2003), para el cultivo de trucha se tiene que el 25% del fósforo total en el alimento es asimilado por el pez y de éste el 44% es excretado como materia fecal (García – Ruiz y Hall, 1996); experimentalmente en reactores tipo Batch la degradación del fósforo inicia en las primeras 24 horas de funcionamiento (García – Ruiz; citado por Lefrançois *et al.*, 2010), teniendo incremento lineal y continuando con esta tendencia de 2 a 7 días más de funcionamiento del reactor (Stewart *et al.*, 2006).

Estudios realizados en el departamento del Cauca reportan cargas contaminantes de fósforo de $9.86 \frac{\text{Kg P}}{\text{Ton}_{\text{pez producido}}}$ al mes, siendo la estación piscícola el Diviso la que mayor contribuye con $2.73 \frac{\text{Kg P}}{\text{Ton}_{\text{pez producido}}}$ al mes (Fernández *et al.*, 2010), valores superiores al reportado por Bureau *et al.* (2003) de $1.3 \frac{\text{Kg P}}{\text{Ton}_{\text{pez producido}}}$ (Roque *et al.*, 2008). Estos aportes de fósforo en los efluentes causan el excesivo crecimiento de algas en las fuentes receptoras ocasionando la eutrofización prematura (McDaniel *et al.*, 2005), con concentraciones de 0.071 a 0.075 mg/L (Camargo y Alonso, 2007), Tello (2010) reporta valores de 0.04 a 0.29mg/L, proceso que se puede reducir limitando la provisión de fósforo descargado, (Henry y Heinke, 1999).

El fósforo sólido acumulado en el estanque como poli fosfatos, forma parte del detritus, el cual bajo condiciones aeróbicas es asimilado y sintetizado intracelularmente por el metabolismo de las bacterias presentes (Barak y Rijn, 2000), sin embargo existen otros factores que afectan la disolución del fósforo, los cuales son la concentración de oxígeno disuelto (McDaniel *et al.*, 2005), pH alto y dureza del agua (Lefrançois *et al.*, 2010).

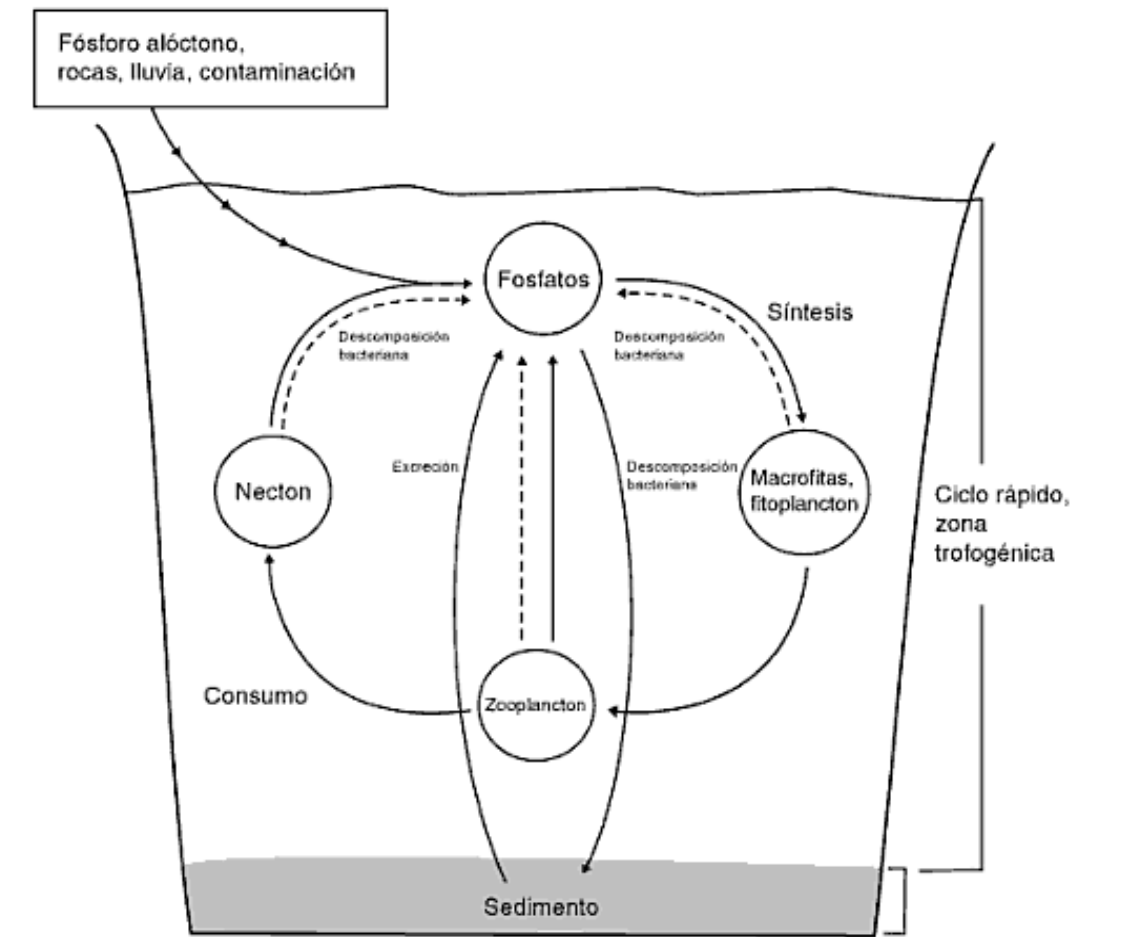


Figura 2. Ciclo del fósforo en un lago.

Fuente (Roldán y Ramírez, 2008).

5.6 CONSECUENCIAS DE UN EQUIVOCADO MANEJO DEL CULTIVO.

5.6.1 Enfermedades: la aparición de enfermedades es uno de los principales problemas que se presenta en los cultivos de trucha debido a que constantemente requieren agua de buena calidad, estas se desencadenan de forma natural o inducida debido a un mal manejo del cultivo. Los principales factores que ayudan a esta aparición son de orden fisiológico, químico y biológico (Chimbor, 2009).

Según Aquino (2008) los factores más comunes en la propagación de enfermedades son:

- Suministro de aguas contaminadas.
- Acumulación de restos de alimento y excremento en los estanques.
- Deficiencias en la cantidad, calidad y frecuencia del alimento.
- Falta o inadecuada limpieza de los estanques.
- Deficiencia en el recambio del agua de los estanques.
- Estrés por condiciones hidrológicas inadecuadas.
- Presencia de animales silvestres transmisores de enfermedades.

La cantidad de alimento suministrado es un factor muy importante para tener en cuenta, ya que un exceso de alimento provoca mayor acumulación de sólidos en el fondo del estanque (Aquino, 2008), ayudando a la masificación de procesos de degradación y disolución los cuales incrementan la proliferación de patógenos.

Las enfermedades más comunes que se presentan en los cultivos de trucha, son generadas por virus, bacterias y parásitos (Chimbor, 2009), por lo cual la utilización de fármacos se hace de forma continua para su control, haciendo que el efluente del cultivo contenga niveles perjudiciales de antibióticos (Rodríguez y Anzola, 2001).

5.6.2 Eutrofización aguas abajo: Las estaciones truchícolas debido a su ubicación en zonas de cuenca alta son una fuente importante de contaminación antropogénica, debido a que su efluente genera procesos de eutrofización aguas abajo por medio del enriquecimiento excesivo de nutrientes, como fósforo y nitrógeno presentes en el alimento no consumido y las heces, llevando al aumento de la demanda bioquímica de oxígeno, sólidos suspendidos, patógenos y residuos químicos producto de los antibióticos (Tello *et al.*, 2010). Este exceso de nutrientes en la fuente receptora ayuda a un crecimiento excesivo de fitoplancton (Fernández, 2008), ya que su fuente principal es la descomposición de la materia orgánica, la cual al mineralizarse coloca de nuevo los iones nitratos y fosfatos a disposición de las algas (Roldán y Ramírez, 2008).

La contaminación generada por los efluentes piscícolas provoca un importante efecto aguas abajo del vertimiento, generando la disminución del oxígeno disuelto, debido al aporte de sólidos suspendidos que estos efluente generan (Tello *et al.*, 2010), otro factor limitante para el oxígeno es la descomposición de las algas muertas, generando la muerte masiva de los peces, por efectos de anoxia que se presentan en ecosistemas eutróficos (Camargo y Alonso, 2007). Estos efluentes son generalmente vertidos sin un tratamiento adecuado a la fuente receptora limitando su uso para actividades como, riego, recreación (Arce, 2006) y especialmente para el consumo humano, ya que una alta concentración de nitratos en el agua produce especialmente a los niños menores de 6 meses de edad reducciones en la capacidad de transporte de oxígeno en la sangre, debido a que el nitrato se transforma en nitrito en el estómago (Crites y Tchobanoglouss, 2000 citado por Fernández, 2008).

6. METODOLOGÍA

6.1 DESCRIPCIÓN GENERAL Y UBICACIÓN

El presente estudio se realizó usando un estanque prototipo a escala real para el cultivo de trucha en la estación piscícola Chiliglo, desarrollado en el marco del proyecto de investigación ESTUDIO, DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN PROTOTIPO DE ESTANQUE PISCÍCOLA el cual contó con la participación del Centro Regional de Productividad e Innovación del Cauca CREPIC, Universidad del Cauca, Universidad del Valle, INCODER, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. La estación piscícola Chiliglo se encuentra ubicada en el Departamento del Cauca municipio de Puracé en el resguardo indígena de Coconuco, localizado a 02° 20' 53" de latitud norte y 76° 30' 03" de longitud oeste. La altura sobre el nivel del mar es de 2.850 m y la temperatura media de 16°C. Los niveles de precipitación media anual alcanzan los 1.811 mm (IGAC, 2005).

6.2 DESCRIPCIÓN DE LA ESTACIÓN

La estación piscícola Chiliglo “Templo de Dios” se abastece de agua del río Changue utilizando 20 % del caudal total del río, aproximadamente 60 L/s. La cual presenta concentraciones promedio de oxígeno disuelto de 8 mg/L al ingresar a la estación, pH entre 7 y 8, temperatura entre 11 y 13°C; fuente que cumple con los requerimientos necesarios para el cultivo de trucha; además, cuenta con obras civiles hidráulicas como bocatoma lateral, conducción en canales por gravedad, desarenador – sedimentador, canales de distribución a los estanques, canales de desagüe y drenaje. Posee 15 estanques rectangulares en tierra, 1 estanque circular en concreto, 6 estanques convencionales en concreto, 1 estanque prototipo hecho en concreto y 1 laguna utilizada como estanque para pesca deportiva.

6.3 CARACTERÍSTICAS DEL ESTANQUE PROTOTIPO

Es un estanque construido en concreto, cuyas paredes laterales están inclinadas 45° con respecto a la vertical, las cuales convergen a un canal de 50 cm de ancho y 30 cm de alto el cual funciona como sistema para la acumulación y extracción del lodo, sobre el cual se colocó una malla con el fin de evitar la resuspensión de los sólidos por la actividad de los peces. El ingreso del agua al estanque se hizo mediante un vertedero rectangular. Conjuntamente se instaló polisombra con el objetivo de hacer control sobre micro y macro fotosintéticos. Las características de diseño del estanque se resumen en la Tabla 2 y en la Figura 3.

Tabla 2. Características del estanque prototipo.

CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN
Dimensiones del estanque	Largo: 14 m
	Ancho: 2 m
	Alto: 1 m
	Profundidad del agua: 0.76 m
	Pendiente paredes: 45°
	Pendiente fondo: 1.4 %
	Volumen de agua: 12 m^3

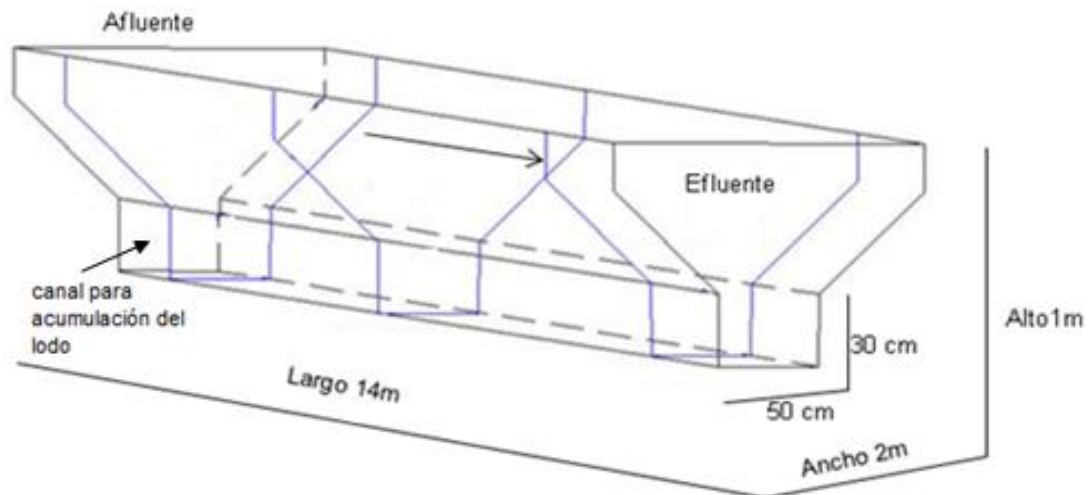


Figura 3. Dimensiones del estanque prototipo.

6.4 DESARROLLO PRIMER OBJETIVO

Para el desarrollo del primer objetivo específico, se inició con la limpieza manual del estanque. Posteriormente se introdujeron 960 peces previamente seleccionadas, con peso promedio de 111 g. Con la cantidad de biomasa, mediciones del oxígeno disuelto del agua en el afluente y los consumos promedios de las truchas reportados por Blanco (1995), se determinó el caudal requerido. El estanque fue operado en un periodo de 6 días o 144 horas continuas por Ensayo, realizando 2 ensayos. Los peces fueron alimentados con 5 raciones diarias establecidas para la densidad de siembra, estas condiciones de operación inicial del estanque se encuentran descritas en la Tabla 3.

Tabla 3. Condiciones operación inicial

CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN	
	Ensayo 1	Ensayo 2
Caudal entrada	2.4 L/s	2.7 L/s
Cantidad de peces	960	960
Peso promedio inicial	111 g	109 g
Densidad de siembra	8,88 Kg pez/m ³	8,71 Kg pez/m ³
Frecuencia de alimentación	5 veces al día	5 veces al día
Cantidad de alimento por porción	388 g	380 g
Ración por pez	0.40 g de alimento / ración *pez	0.39 g de alimento / ración *pez

El estanque se monitoreó permanentemente con muestreos compuestos cada 12 horas, tomados a las 6:00 am y 6:00 pm, los cuales fueron hechos con ayuda de 2 bombas peristálticas previamente calibradas. Para la toma de la muestra se utilizaron dos colectores de plástico de 28 L, uno para el afluente y otro para el efluente tal como se detalla en la Figura 4; posteriormente, el volumen fue homogeneizado y luego se tomó la muestra para ser analizada en el laboratorio con la cual se midieron los parámetros nitrógeno total y amoniacal, fósforo total, sólidos suspendidos totales, con los procedimientos del Standar Methods for the Examination of Water and Wastewaters (20 ed. 1999) descritos en la Tabla 4. La medición de estos parámetros incluyó dos tipos de análisis los cuales se realizaron tanto para muestras totales como para muestras filtradas con el fin de establecer la transferencia de los contaminantes desde la fracción suspendida a la disuelta con el transcurso del tiempo de acumulación de los sólidos al interior del estanque.

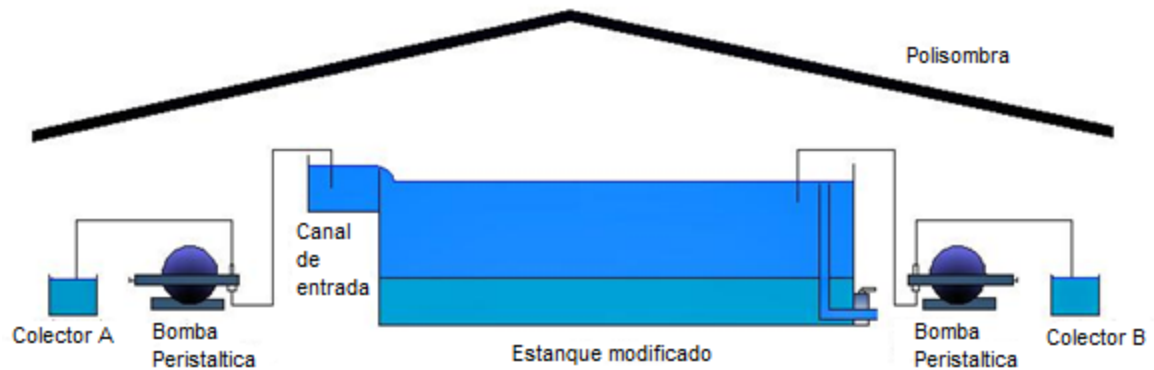


Figura 4. Toma de muestra por el método de muestreo compuesto

Tabla 4. Medición de parámetros con muestras compuestas.

Parámetro	Muestra		Punto de Muestreo		Procedimiento Standard Methods
	Filtrada	No Filtrada	Afluente	Efluente	
Sólidos suspendidos	--	X	X	X	2540 D
Fósforo total	X	X	X	X	4500 – P C
Nitrógeno total	X	X	X	X	4500 - NH _{org} B
Nitrógeno amoniacal	X	--	X	X	4500 – NH ₃ D

Otros parámetros como sólidos disueltos determinados por conductividad eléctrica, así como la temperatura y pH, se tomaron de manera puntual cada seis horas durante el periodo de luz solar, es decir, 6:00 am, 12:00 m y 6:00 pm con sondas calibradas, como se resume en la Tabla 5, estos parámetros se midieron 15 cm por debajo de la lámina de agua en el canal de entrada, en el estanque y en el colector de las muestras compuestas. Para el parámetro oxígeno disuelto se tomó la medida en el canal de entrada y en el estanque se tomó en 3 secciones a diferentes profundidades, las cuales fueron: a la entrada, en el intermedio y al final del mismo, se realizaron 7 mediciones para cada sección del estanque a diferentes profundidades como lo muestra la Figura 5, donde cada círculo indica el punto de lectura de OD.

Tabla 5. Medición de parámetros con muestras puntuales.

Parámetro	Punto de muestreo				Procedimiento Standard Methods
	Canal de entrada	Inicio estanque	Intermedio estanque	Final estanque	
Oxígeno disuelto (mg/L)	X	X	X	X	4500 – O G
Temperatura °C	X	X	--	X	--
pH	X	X	--	X	4500 H
Sólidos disueltos (mg/L)	X	X	--	X	--

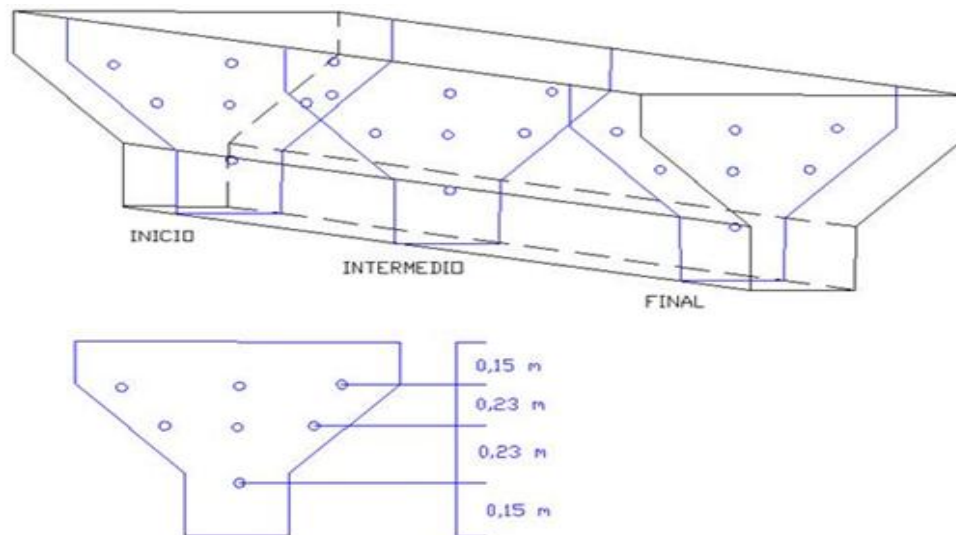


Figura 5. Puntos y profundidades para la toma de oxígeno disuelto en el estanque

6.5 DESARROLLO SEGUNDO OBJETIVO

Para el desarrollo del segundo objetivo específico en el cual se determinó el impacto de la disminución de caudales sobre la tasa de crecimiento de los peces, se realizó limpieza manual al estanque en cada periodo de operación, para tener una calidad de agua adecuada que no afectara el crecimiento del pez. Para el primer periodo de operación, el cual contó con el 100% del caudal, se tuvo un valor de 2.4 L/s; sembrando en el estanque una densidad de 8,81 Kg pez/m³. Posteriormente se adecuaron las raciones de

alimentación teniendo en cuenta el peso inicial, las cuales constan de 5 raciones diarias de 388 g cada una, tal como se detalla en la Tabla 6.

Tabla 6. Condiciones iniciales de operación.

CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN
Caudal entrada	2,4 L/s
Cantidad de peces	960
Peso promedio inicial	110,16 g
Densidad de siembra	8,81 kg/m ³
Frecuencia de alimentación	5 veces al día
Cantidad de alimento por ración	388 g
Horarios de alimentación	8 am -10 am - 12 m - 2 pm - 4 pm

Se realizaron 4 seguimientos por periodos de 15 días para cada periodo, en cada uno de ellos se fue reduciendo el caudal requerido en un 10, 15 y 20%, ajustado de acuerdo con el peso y la concentración de oxígeno disuelto de la entrada del sistema. El caudal se calculó como se muestra en el Anexo A, con las tablas de consumo y temperatura aportadas por el libro La Trucha: Cría industrial de Blanco C (Ver Anexo I, Figura 39).

Se realizaron biometrías o pesaje de los peces cada 6 días, mediante el método de captura por red (atarraya) en la cual se tomó una muestra de 32 individuos al azar. Para garantizar que la calidad fisicoquímica del agua es la requerida para un óptimo desarrollo de los peces, es decir, que no se vea afectado el crecimiento de los mismos por contaminantes derivados de los sólidos en descomposición, se midieron los parámetros descritos en el primer objetivo cada 3 días, los cuales se tomaron tanto con muestreo puntual como con muestreo compuesto (Ver Tabla 7), componiendo la muestra en un periodo de 2 horas; dichos parámetros se midieron únicamente con muestras totales. Adicionalmente a estos parámetros se controló la variación de la concentración de oxígeno disuelto y así se determinó realizar el lavado del estanque cada 3 días o cada vez que la concentración de OD fuera inferior a 5.5 mg/L.

Tabla 7. Medición de parámetros fisicoquímicos.

Parámetro	Muestreo compuesto	Muestreo puntual	Tipo de muestra	
			Filtrada	No filtrada
Nitrógeno total	X	--		X
Fósforo total	X	--		X
Sólidos suspendidos totales	X	--	X	
Nitrógeno amoniacal	X	--	X	
Sólidos disueltos y pH	X	X		X
Oxígeno disuelto	--	X		

Los tiempos de trabajo para el segundo objetivo se encuentran resumidos en la Tabla 8.

Tabla 8. Tiempos de trabajo.

Tiempo de Trabajo	Tiempo
Análisis fisicoquímico del agua	Cada 3 días
Biometría	Cada 3 días
Duración de carrera	15 días
Lavado	Cada 6 días o cuando el Oxígeno Disuelto sea < 5.5 mg/L
Cambio de caudal	Cada 15 días

6.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.

El análisis de datos se hizo con ayuda de la estadística descriptiva la cual incluye gráficos, medidas de tendencia central y dispersión, distribución de frecuencias, mínimos y máximos; además del uso de la estadística inferencial que aporta intervalos de confianza, pruebas de hipótesis, pruebas T, coeficiente de correlación de Pearson y análisis de varianzas.

El procesamiento de la información se realizó utilizando el programa SPSS versión 15.0 para Windows, donde se compararon grupos independientes (afluente y efluente) con una variable cuantitativa dependiente en cada fracción (suspendida y disuelta) de los parámetros medidos.

Así mismo, se utilizó la prueba de Shapiro – Wilk, para determinar la normalidad de la distribución, para una cantidad de datos menor o igual a 50; para lo cual se requiere que el nivel crítico (significancia) sea mayor a 0,05. Además se utilizó el método del promedio corrido que consiste en calcular el promedio por cada muestra adicionada. Al agregar las primeras muestras, los promedios suelen ser muy variables entre sí, pero, a medida que se va añadiendo más muestras el promedio tiende a estabilizarse (Mostacedo y Fredericksen, 2000).

La tasa de acumulación se calculó considerando el balance de masa para la acumulación total, el tiempo de acumulación y el peso promedio de biomasa en el estanque, un ejemplo del cálculo de la tasa de acumulación para sólidos suspendidos se encuentra en el Anexo B.

Para el cálculo de la tasa de generación de la contaminación disuelta se tuvo en cuenta el contenido de contaminante tanto en el afluente como en el efluente, balance de masa y biomasa total presente en el estanque, ejemplo de dicha tasa se encuentra en el Anexo B.

Adicionalmente a la tasa de acumulación y tasa de generación de contaminación disuelta se utilizó la tasa base, la cual consiste en el promedio del incremento de la tasa de generación de contaminación disuelta en las primeras 24 horas de funcionamiento del estanque, fenómeno exclusivamente producido por la actividad de los peces, debido a la limpieza del estanque. Con la tasa base se encontró por diferencia con el incremento las tasas de degradación y disolución para el parámetro sólidos disueltos.

La tasa de crecimiento se obtuvo mediante el cálculo de la biomasa acumulada por unidad de tiempo, medida como gramos por día, un ejemplo del cálculo de la tasa de crecimiento se muestra en el Anexo B.

7. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se hará la presentación y análisis de los resultados obtenidos en la sección experimental planteada en la metodología, para dar respuesta a los objetivos propuestos, apoyados por los cálculos presentes en el Anexo A.

En la primera sección se abordará la información correspondiente al primer objetivo, el cual es determinar las tasas de transferencia de la contaminación en fracción suspendida a la disuelta, analizando los parámetros sólidos suspendidos (SS), sólidos disueltos (SD), fósforo total (PT), nitrógeno total (NT) y nitrógeno amoniacal total (NAT). Además de considerar dos tipos de variables para iniciar este estudio, las cuales son: variables controladas y no controladas. Dentro de las variables controladas se tiene: el caudal, la cantidad de alimento suministrado y la frecuencia de alimentación; y las no controladas: temperatura y pH.

La segunda sección del capítulo se enfocará en determinar el impacto de la variación del caudal sobre la tasa de crecimiento de los peces, discutiendo el comportamiento del oxígeno disuelto durante el día, además de la medición de caudal, SS, SD, PT, NT y NAT, temperatura y pH como parámetros de control; y comparando las diferentes biometrías con las tasas de conversión alimenticias arrojadas durante los periodos de muestreo.

7.1 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS PRIMER OBJETIVO

7.1.1 Variables controladas

- **Caudal**

EL caudal medido durante los dos periodos de muestreo se encuentra alrededor del valor óptimo para la densidad de siembra presente en el estanque, según Blanco 1995 es de 2,4 L/s para el ensayo 1 y de 2,7 L/s para el ensayo 2, cuyos datos están descritos en el Anexo C. Los parámetros estadísticos se relacionan en la Tabla 9.

Tabla 9. Datos estadísticos del caudal

	Ensayo 1	Ensayo 2
Máximo(L/s)	2,56	2,80
Mínimo(L/s)	2,26	2,59
Promedio (L/s) ± IC	2,386 ± 0,035	2,712 ± 0,024
Desviación Típica	0,073	0,049
N° de datos	19	19

- **Ración alimento**

Los peces fueron alimentados con una frecuencia de 5 raciones al día, para el ensayo 1 la cantidad de alimento suministrada fue de 388 gr de alimento/ración para una densidad presente en el estanque de 8,88 Kg de biomasa/m³ y para el ensayo 2 de 380 gr de alimento/ración para una densidad de 8,71 Kg de biomasa/m³. La variación en la cantidad de alimento suministrado se presentó debido a la diferencia de peso de los peces utilizados en cada ensayo los cuales fueron de 111 gr y 109 gr, para el ensayo 1 y 2 respectivamente.

7.1.2 Variables no controladas

- **Temperatura**

La temperatura en los dos periodos de muestreo estuvo entre el rango para el desarrollo de los peces el cual es de 9 a 17°C según Aquino 2008, siendo 15°C el valor óptimo de crecimiento. Los datos tomados en campo se presentan en el Anexo C. Obteniendo para el ensayo 1 un rango de 10,5 a 13,1°C en el afluente mientras que en el efluente es de 10,7 a 13°C; y en el ensayo 2 se tiene que el afluente oscila entre 9,5 y 12,8°C y de 9,5 a 12,9°C en el efluente, tal como se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10. Datos estadísticos de temperatura

	ENSAYO 1		ENSAYO 2	
	Afluyente	Efluente	Afluyente	Efluente
Máximo (°C)	13,10	13,00	12,80	12,9
Mínimo (°C)	10,50	10,70	9,50	9,50
Promedio (°C) ± IC	11,753 ± 0,389	11,774 ± 0,367	11,511 ± 0,547	11,526 ± 0,458
Desviación	0,80717	0,76146	0,94804	0,95035
N° datos	19	19	19	19

Los datos de temperatura obtenidos presentaron distribución normal, puesto que al aplicarle la prueba de Shapiro – Wilk la significancia obtenida es mayor a 0,05 como se reporta en el Anexo H. Puesto que los datos son normales se les aplicó la prueba t pareada para determinar si hay diferencias entre el afluyente y efluente en cada ensayo, obteniendo una significancia de 0,725 para el Ensayo 1, y 0,716 para el Ensayo 2; por lo tanto no existen diferencias significativas entre afluyente y efluente en cada ensayo, demostrando que ni la actividad de los peces ni los procesos de degradación aumentan o disminuyen la temperatura al interior del estanque, y probablemente existan pequeñas variaciones de temperatura al fondo del estanque las cuales son imposible medirlas por la precisión del equipo y el alto volumen de agua manejado, el cual se recambia cada 84 minutos a razón de 2,4 L/s, para el Ensayo 1 y 74 minutos a razón de 2,7 L/s para el Ensayo 2.

- **Potencial de hidrógeno**

El pH medido en cada uno de los ensayos se mantuvo en el rango óptimo para el desarrollo de los peces el cual es de 6.5 a 9 (Malison y Hartleb, 2005), para el ensayo 1 se obtuvo un máximo de 8,20 y un mínimo de 7,20 para el afluyente; para el efluente se tiene un máximo de 7,9 y mínimo de 7,0. Para el ensayo 2 se obtuvo un máximo de 7,7 y mínimo de 6,5 para el afluyente y para el efluente 7,5 y 6,5 como máximo y mínimo respectivamente, los datos medidos en campo se encuentran reportados en el Anexo C.

A los datos obtenidos de pH se aplicó la prueba de Shapiro – Wilk, la cual presenta distribución normal como se observa en el Anexo H, por lo tanto se realizó el análisis mediante la prueba t pareada para determinar si presentaban diferencias significativas

entre el afluente y efluente para cada ensayo, reportando significancias de 0,154 para el Ensayo 1 y 0,830 para el Ensayo 2, indicando que no hay diferencias significativas, por lo tanto el efecto del consumo de la alcalinidad por parte de bacterias presentes en el sistema y la producción de ácido carbónico proveniente de la reacción del CO₂ excretado por los peces con el agua, es contrarrestado por la capacidad Buffer del agua y el alto volumen utilizado.

7.1.3 Parámetros de control

- Oxígeno disuelto

Este parámetro fue tomado en campo en las diferentes secciones del estanque cuyos datos obtenidos se encuentran resumidos en el Anexo C, Las concentraciones medidas demuestran que desde el canal de entrada hasta la zona intermedia del estanque el oxígeno es suficiente tanto para los peces como para los fenómenos de degradación durante los periodos de estudio, con concentraciones de OD superiores a 5.5 mg/L. Y desde la zona intermedia hasta el final del estanque las concentraciones disminuyen a 4.3 y 5.4 mg/L para los ensayos 1 y 2 respectivamente (ver Figuras 6 y 7).

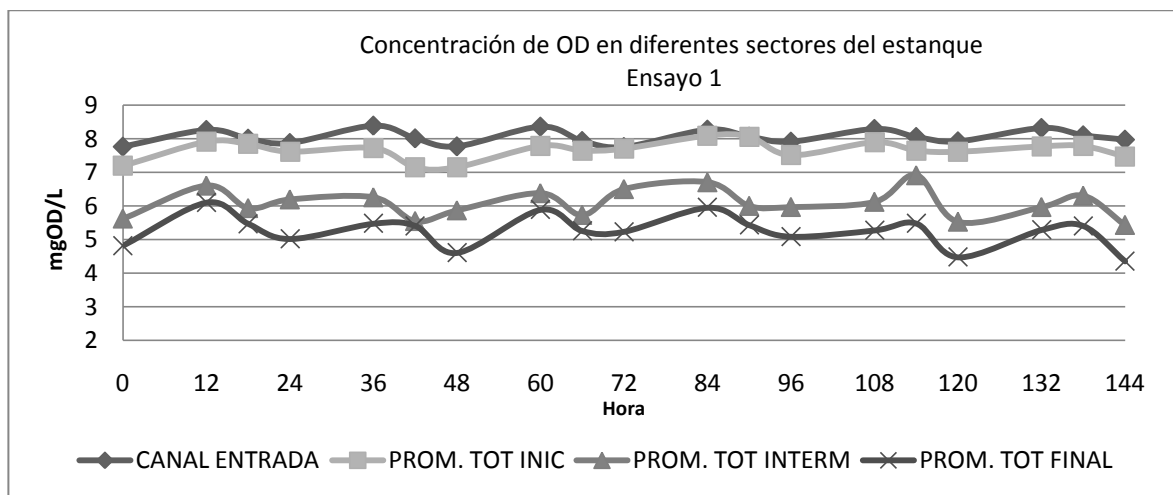


Figura 6. Concentración de OD en diferentes sectores del estanque Ensayo 1

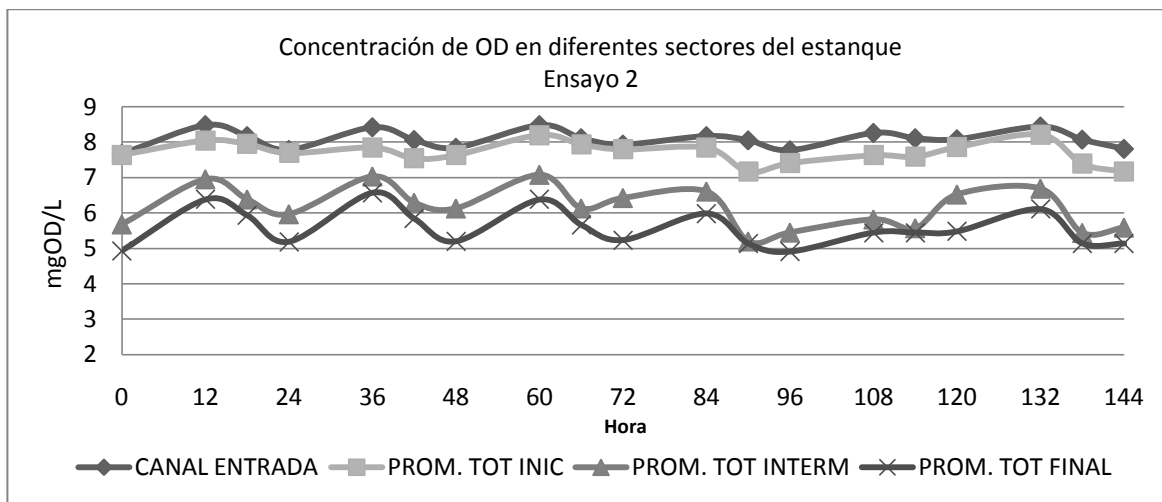


Figura 7. Concentración de OD en diferentes sectores del estanque Ensayo 2

Con las concentraciones encontradas en campo y el caudal suministrado al estanque se calculó el consumo de OD en cada sección del estanque, observándose que entre el canal de entrada y la zona inicial del estanque el consumo de OD como máximo presenta un valor de 64 y 75 g OD consumido/h-Ton pez para los ensayos 1 y 2 respectivamente, puesto que la aireación es constante con la caída de agua, la cual tiene una altura de 0,24 m. En la zona entre el canal de entrada y la mitad del estanque se presenta un consumo mayor a través del día, fenómeno observado con mayor intensidad hacia las 18:00 horas de cada día, llegando incluso a consumos máximos de 184 g/h-Ton registrado en la hora 42 para el Ensayo 1 y de 243 g/h-Ton hacia la hora 90 para el Ensayo 2, indicando igualmente que los peces se encuentran en una zona adecuada para su crecimiento, estando en una concentración remanente mayor a 5.5 mg/L lo que hace que a través de las 144 horas de estudio en esta sección del estanque los peces no se estresen y mantengan un desarrollo adecuado, condiciones descritas por Mallya (2007), donde el porcentaje de saturación de oxígeno para peces de agua dulce debe ser superior a 80% o concentración remanentes de 5 mg/L.

En la sección final del estanque se evidencian cambios en el consumo de oxígeno, presentando máximos de 268 y 255 g/h-Ton, lo que en ocasiones pudo colocar en riesgo el cultivo, ya que las concentraciones remanentes de oxígeno fueron de 4.35 y 5.44 mg/L cuando se presentaron los consumos máximos en cada uno de los ensayos, efecto que

se observa en las mediciones registradas hacia las horas del medio día y las 18:00 horas, donde dichas disminuciones en el periodo de muestreo se deben al mayor consumo de oxígeno por el metabolismo de los peces, puesto que requieren entre 200 y 280 gO₂/ Kg alimento consumido (Colt *et al.*, 2009), además de la acumulación de sólidos al interior del estanque que comienzan con su degradación y oxidación (Bilotta y Brazier, 2008) y la agrupación de los peces en una sola zona del estanque donde sea mayor la disposición de oxígeno agotándolo rápidamente (Blanco, 1995). El comportamiento global del consumo de oxígeno en las tres secciones del estanque a través del tiempo de muestreo se visualiza en las Figuras 8 y 9.

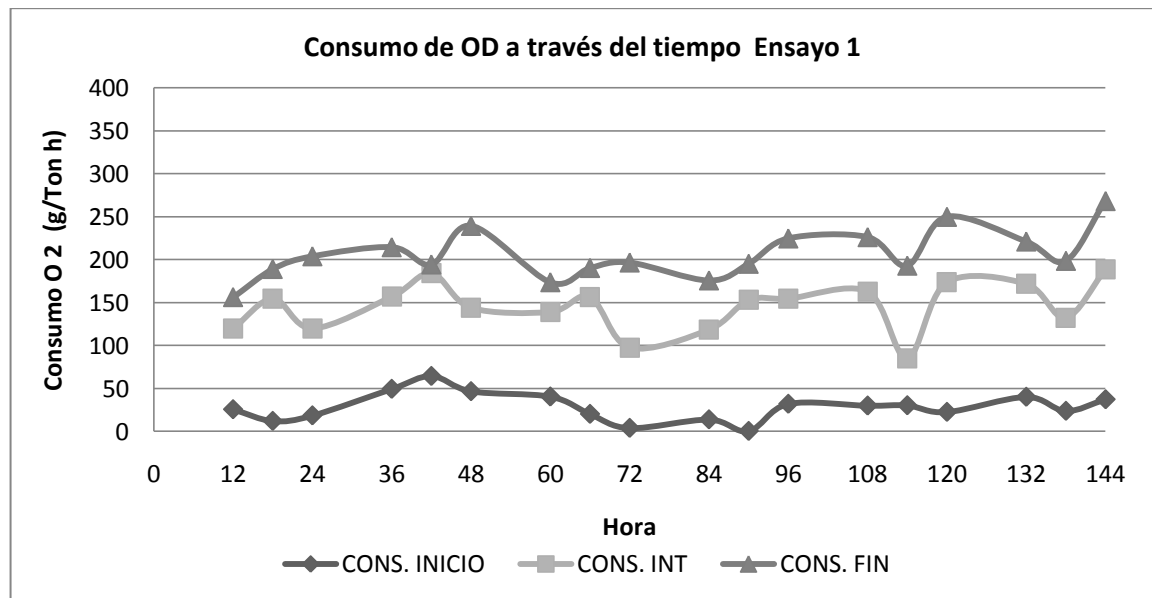


Figura 8. Consumo de OD a través del tiempo Ensayo1

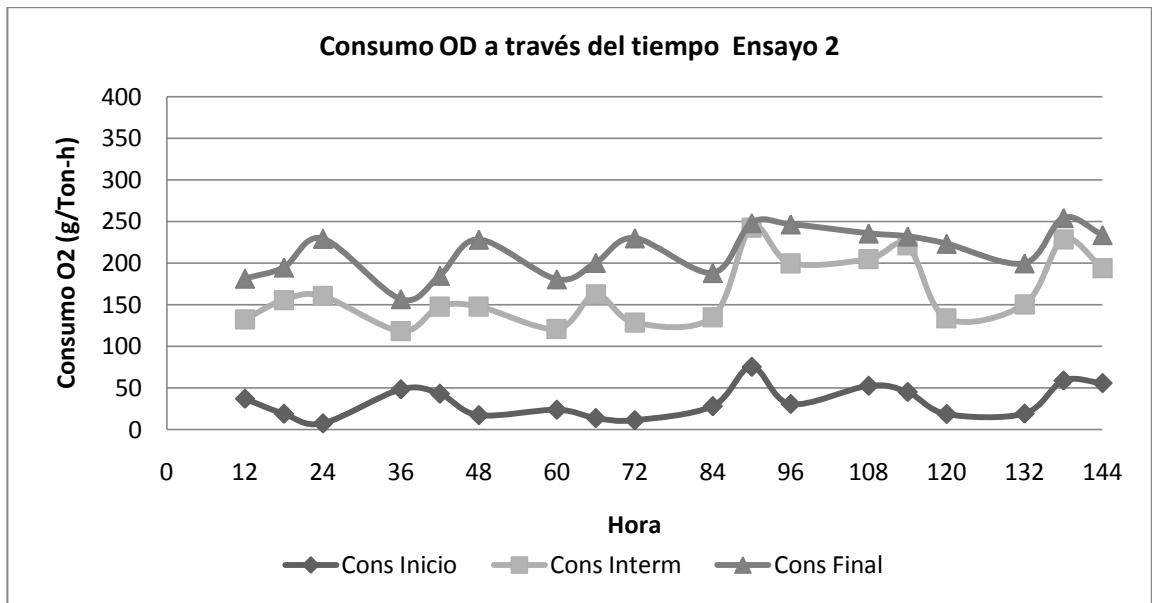


Figura 9. Consumo de OD a través del tiempo Ensayo 2

Para el análisis de OD se asumió un consumo base, correspondiente a las primeras 24 horas de funcionamiento del estanque, es decir, el consumo de oxígeno exclusivamente por parte de los peces; puesto que se inició cada ensayo con el estanque totalmente limpio y la acumulación de sólidos al interior del mismo en este tiempo es insignificante. Para ello se calculó el consumo base de 172,62 y 188,44 Kg/h-Ton pez para los ensayos 1 y 2 respectivamente, con lo que se pudo determinar el porcentaje de consumo de oxígeno disuelto por fenómenos de degradación y oxidación de los sólidos al interior del estanque para cada uno de los ensayos. Dicho consumo en los dos periodos de muestreo se incrementó con el tiempo ya que la cantidad de sólidos acumulados al interior del estanque aumenta progresivamente al no haber resuspensión de los mismos, adicionalmente los sólidos presentan oxidación de la materia orgánica cuando ésta se disuelve y tiene contacto con el OD transformándose en sales minerales (Roldán y Ramirez, 2008) y las colonias de bacterias degradadoras se intensifican obteniendo de los sólidos el sustrato para su supervivencia (Torres, 2005), por lo tanto dichos procesos limitan y compiten por el oxígeno con los peces, fenómeno que se ilustra en la Figura 10.

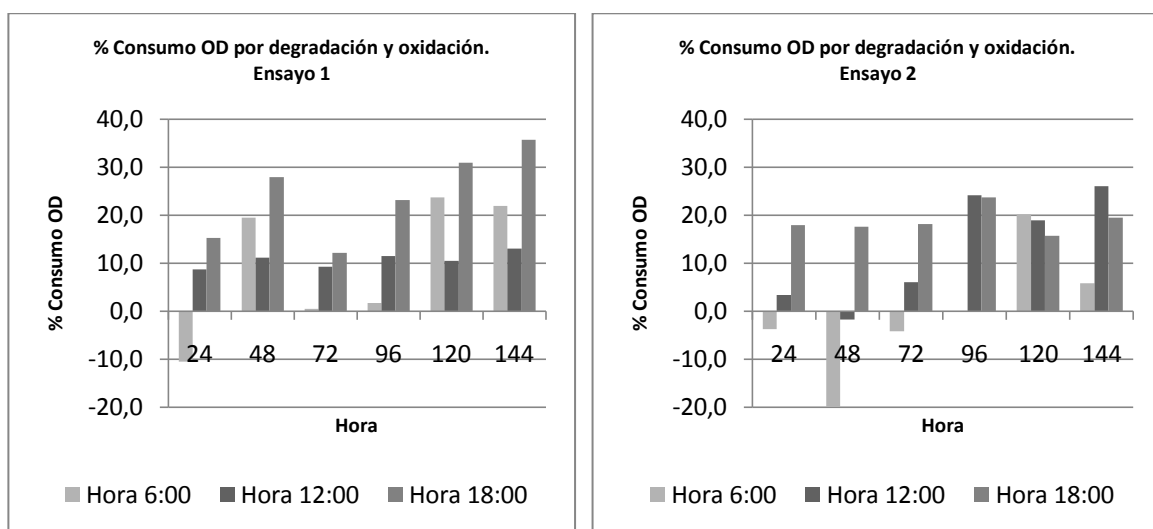


Figura 10. Porcentaje consumo de OD por fenómenos de degradación y oxidación para los ensayos 1 y 2.

En este caso se observa que el porcentaje de consumo de OD por procesos de degradación y oxidación son más pequeños hacia las 6:00 AM, fenómeno provocado probablemente por las bajas temperaturas asociadas al afluente, además que en esta hora de medición los peces no han sido alimentados. Mientras que hacia las horas 12:00 M y 18:00 PM los consumos van aumentando posiblemente a la temperatura con la que ingresa el afluente, el cual determina la actividad de los microorganismos a la hora de realizar los procesos de degradación (Lonborg, 2009), y la alimentación de los peces.

- **Sólidos suspendidos**

Los datos obtenidos en laboratorio se presentan en el Anexo D, a los cuales se les determinó estadística descriptiva resumida en la Tabla 11 para cada uno de los ensayos.

Tabla 11. Estadísticas descriptivas sólidos suspendidos totales

	ENSAYO 1		ENSAYO 2	
	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente
Promedio (mg/L) ± IC	2,338 ± 0,652	3,145 ± 0,632	3,546 ± 0,601	3,488 ± 0,409
Desviación	1,079	1,046	0,995	0,678
Mínimo (mg/L)	0,40	0,80	1,60	2,40
Máximo (mg/L)	3,72	4,18	4,60	4,52
N° datos	13	13	13	13

En los efluentes de los ensayos 1 y 2, se presentan concentraciones máximas de 4,18 y 4,52 mg/L respectivamente; valores inferiores a los registrados por Cripps y Bergheim (2000) de 6.9 mg/L, e inferiores a los obtenidos por De la cruz y Salazar (2007) en la piscifactoría el Diviso de 6 mg/L, este efecto probablemente es producido por una mejor eficiencia de sedimentación del estanque.

Con los datos obtenidos de SS, se realizó balance de materia encontrando la acumulación total de sólidos al interior del estanque, y haciendo la relación con los caudales de cada ensayo se determinó el porcentaje de retención de los mismos, el cual en los periodos de muestreo presenta uniformidad en dicho porcentaje, con valores promedio de 68,802 % \pm 1,646 y 67,564 % \pm 2,702 para los ensayos 1 y 2 respectivamente. A través del tiempo el porcentaje de retención disminuye a razón de 0,046 en el ensayo 1 y 0,078 en el ensayo 2; encontrándose eficiencia de retención máxima de 75,45 % y 72,90 %, y mínimo de 65,97 % y 62,10 % para cada uno de los ensayos, como se observa en la Figura 11.

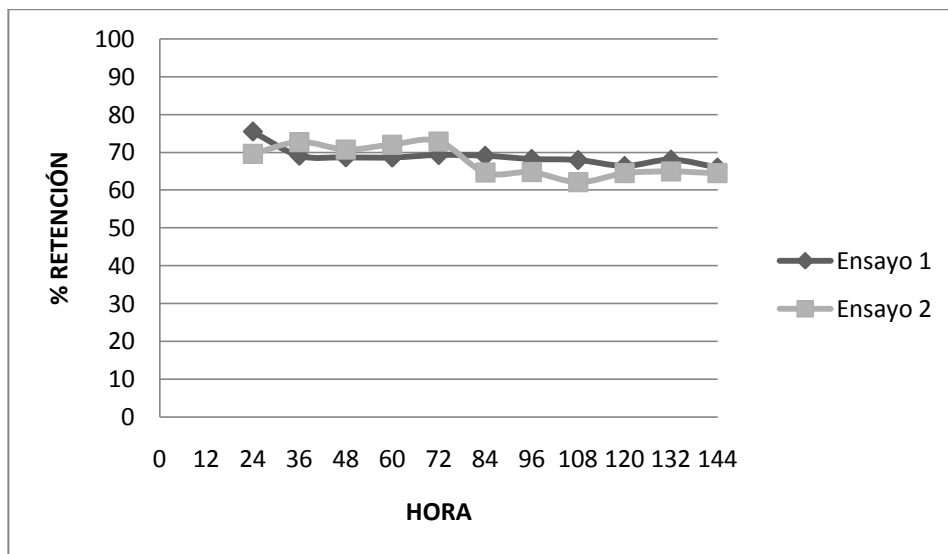


Figura 11. Porcentaje de retención sólidos suspendidos.

El estanque prototipo vierte mensualmente 24.41 Kg SS, aproximadamente el 5 % del sólidos suspendidos generados en la estación piscícola Chiliglo, el cual es de 493 Kg SS/mes determinado por Fernández *et al.* (2010).

En los periodos de muestreo se encontró que el porcentaje de acumulación se presenta en dos formas los cuales son en el fondo del estanque 37 y 39% de los SS para los ensayos 1 y 2; y como biomasa con porcentajes de 48 y 46% de los SS para cada uno de los ensayos respectivamente. Al calcular las tasas de acumulación de los sólidos suspendidos totales (SST) al interior del estanque se encontró que presentan un comportamiento similar de estabilidad en los dos periodos de muestreo, esto posiblemente se debe al ingreso constante en la cantidad de alimento suministrado a los peces, siendo éste el mayor contribuyente de SST, puesto que el aporte se presenta tanto como alimento no consumido del orden del 5 al 10% del suministrado (Rodríguez y Anzola, 2001) y 30% del total consumido que no es digerido (Cripps y Bergheim, 2000); comparado con el aporte por el afluente que es de 4615 g y 6030 g al cabo de los 6 días de cada ensayo; con esto se obtiene una tasa de acumulación final de 604 gSST/Ton-h y 643 gSST/Ton-h respectivamente, como se ilustra en la Figura 12.

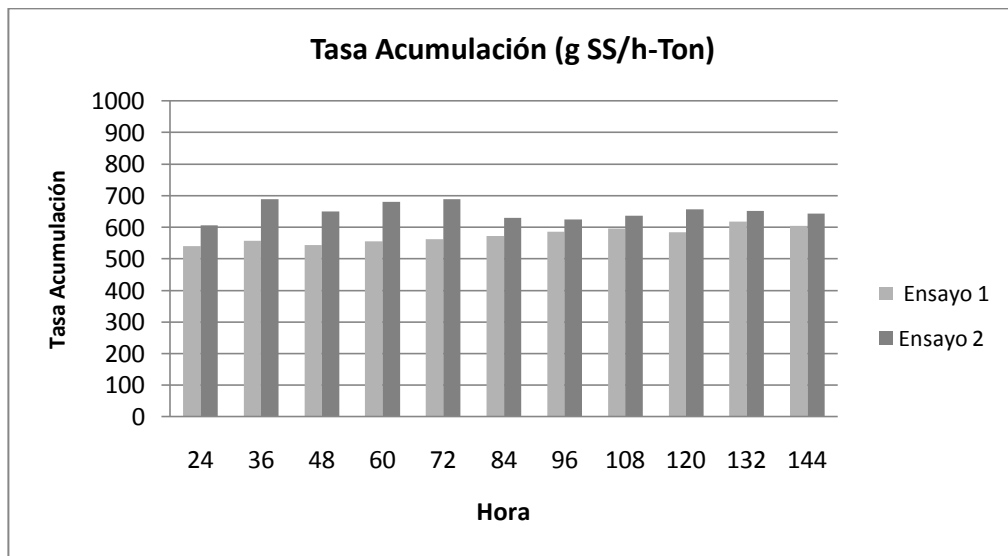


Figura 12. Tasa Acumulación al interior del estanque

La tasa de acumulación de sólidos suspendidos tiende a disminuir con el tiempo puesto que los peces al interior del estanque, al estar en condiciones óptimas de desarrollo asimilan mejor el alimento y lo transforman en tejido (Mallya, 2007), representado en el aumento de la biomasa presente en el estanque. Además los sólidos acumulados al interior del canal al estar compuestos principalmente por fósforo total entre 30 – 80 % y

nitrógeno total entre 15 a 31 %, son susceptibles a degradación biológica y asimilación bacteriana a través del tiempo, lo que conlleva a la generación de contaminación disuelta (Stewart *et al.*, 2006).

- **Sólidos disueltos**

Este parámetro fue medido en campo obteniendo los datos registrados en el Anexo C, a los cuales se les determino estadística descriptiva resumida en la Tabla 12.

Tabla 12. Estadística descriptiva sólidos disueltos

	ENSAYO 1		ENSAYO 2	
	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente
Promedio (mg/l) ± IC	77,65 ± 0,364	78,69 ± 0,339	88,85 ± 0,473	89,77 ± 0,404
Desviación	0,603	0,563	0,784	0,669
Mínimo (mg/l)	76,44	77,69	87,24	88,34
Máximo (mg/l)	78,31	79,31	89,60	90,33
N° datos	13	13	13	13

Los sólidos disueltos que ingresan al sistema por el afluente básicamente son el resultado de la escorrentía del agua antes y después de la bocatoma hasta la llegada al estanque, mientras que los SD registrados en el efluente están compuestos por los generados en el cultivo, o sea, fluidos corporales y respiración (Brix, 2010), además por los procesos de disolución y degradación de los sólidos acumulados. Experimentalmente se encontró que la contribución de sólidos disueltos presentes en el efluente del estanque prototipo alcanzó los 629 Kg SD/mes para una biomasa de 8.71 Kg biomasa/m³.

Las concentraciones de sólidos disueltos medidos en campo tanto en el afluente como en el efluente en los dos ensayos no presentan riesgo para los peces ya que se encuentran por debajo de los 500 mgSD/L, concentración perjudicial para los organismos acuáticos (CONAMA, 2005).

En cada uno de los ensayos se presenta similitud en la tendencia del incremento logarítmico en la tasa de generación de sólidos disueltos tal como se ilustra en la Figura 13, con coeficientes de correlación de 0,89 y 0,92 para cada uno de los ensayos.

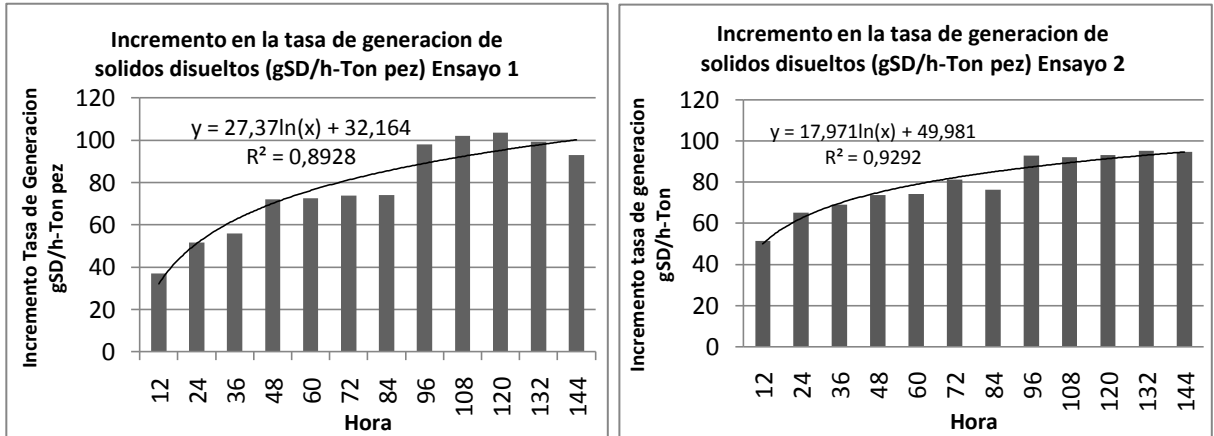


Figura 13. Incremento en la tasa de generación de SD para Ensayo 1 y 2

Se asumió como tasa base el incremento en la tasa de generación de SD en las primeras 24 horas de funcionamiento del estanque, es decir, la generación exclusivamente de SD por el metabolismo de los peces, ya que se realizó la medición con el estanque limpio, adicionalmente, se consideró que procesos de degradación y disolución generados por los sólidos acumulados en este tiempo son bajos, al no presentarse estudios sobre estos procesos en sistemas con flujos continuos, se apoya con lo propuesto por Stewart (2006) ya que en su estudio al utilizar lodos acumulados por 7 días los cuales en 3,5 días de vida media, no encontró procesos de degradación y disolución.

Dicha tasa base para el Ensayo 1 es de 35 gSD/h-Ton pez y para el Ensayo 2 es de 56 gSD/h-Ton pez. La tasa de generación de SD realizada por los procesos de degradación y disolución tienden a incrementarse con el tiempo (ver Figura 14), puesto que la cantidad de sólidos acumulados al interior del estanque aumenta las condiciones fisicoquímicas y biológicas para la propagación de microorganismos degradadores de materia orgánica; además las fuerzas hidrodinámicas, en especial el esfuerzo cortante contribuye a la disolución de los sólidos en suspensión en la columna de agua (Brinker *et al*, 2005).

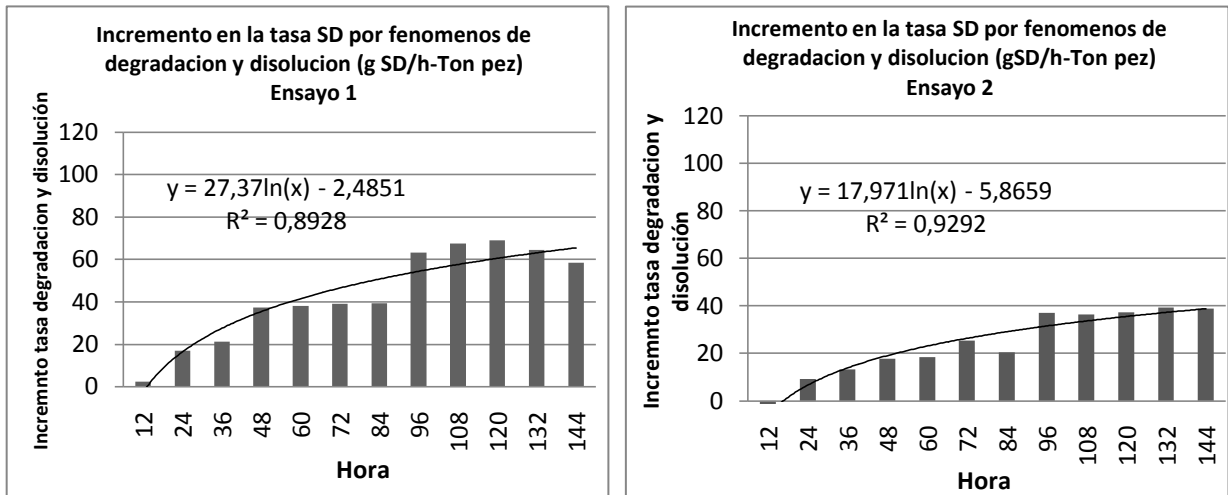


Figura 14. Incremento en la tasa SD por degradación y disolución para el Ensayo 1 y 2.

En el ensayo 1 los fenómenos de degradación presentan un crecimiento mayor a partir de la hora 96 de estudio, esto posiblemente a la actividad microbiana existente en el estanque, lo cual se apoya con el consecuente incremento del consumo de oxígeno disponible y la hora de toma de la medición, realizada hacia las 18:00 pm en la cual se registra la mayor temperatura del día 4 de estudio. Este comportamiento de la degradación de sólidos se observa en el ensayo 2 hacia la misma hora de estudio; aunque, la magnitud del incremento es menor se evidencian las mismas características que en el ensayo 1, donde el consumo de oxígeno está alrededor del 25% del suministrado.

La degradación de los sólidos en pequeñas partículas, hace que con el transcurrir del tiempo y el contacto con el agua algunos nutrientes sean disueltos.

- **Fósforo Total**

Este parámetro fue determinado en laboratorio obteniendo los datos registrados en el Anexo D. Para el análisis de las tasas de transferencia se tiene en cuenta la fracción en las que se presenta este nutriente, las cuales son suspendida y disuelta.

- **Fósforo fracción suspendida**

Una vez tomada la muestra compuesta en campo se analizó la fracción suspendida en el laboratorio, a cuyos datos se les determinó la estadística descriptiva resumida en la Tabla 13.

Tabla 13. Estadística descriptiva fósforo fracción suspendida.

	ENSAYO 1		ENSAYO 2	
	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente
Promedio (mg/l) ± IC	0,103 ± 0,0054	0,102 ± 0,0102	0,143 ± 0,020	0,159 ± 0,023
Desviación	0,0088	0,0170	0,0335	0,0391
Mínimo (mg/l)	0,090	0,082	0,087	0,099
Máximo (mg/l)	0,120	0,130	0,184	0,204
N° datos	13	13	13	13

Al presentarse un porcentaje de retención de sólidos al interior del estanque alrededor de 75 % y 72 % para el ensayo 1 y 2 respectivamente, se observa que la retención del fósforo es alta con un máximo de 63,88 % y 51,18 % para cada uno de los ensayos, ya que aproximadamente del 30 al 80% del fósforo se encuentra en los sólidos suspendidos procedente del alimento suministrado (Stewart *et al.*, 2006), pero con el paso del tiempo se evidencia una disminución en este porcentaje, posiblemente se debe a que los procesos de degradación química y microbiológica que plantean Roldán y Ramírez (2008) facilitan la transferencia de fracción sólida a disuelta de este nutriente en el agua, efecto observado en la Figura 15.

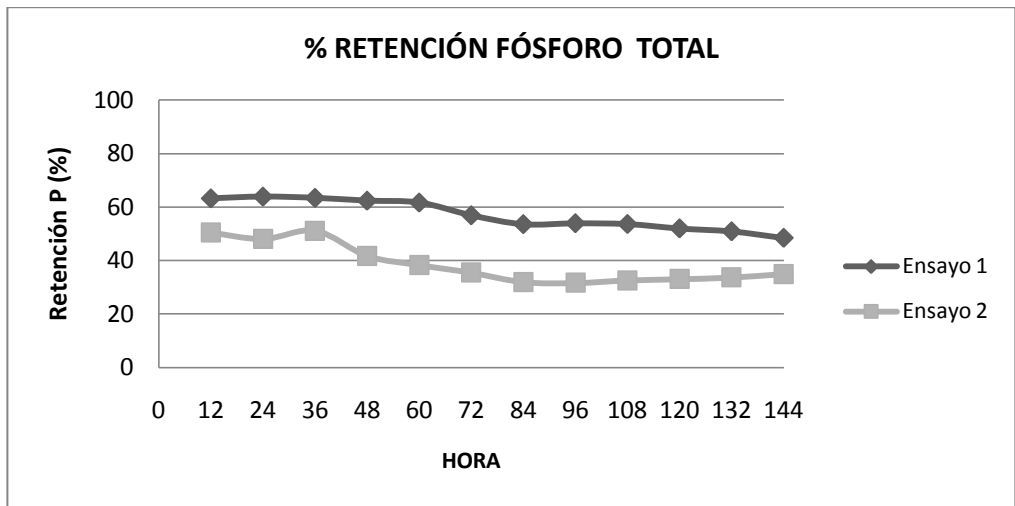


Figura 15. Porcentaje de retención fósforo total.

Una vez retenido el fósforo en fracción suspendida se determinó la tasa mínima de acumulación, que para los dos periodos de muestreo son respectivamente de 9,10 y $7,95 \frac{g P}{h-Ton_{pez}}$ con condiciones de suministro constante de alimento de 9,996 gP/Kg alimento, implicando para el final de cada ensayo un aporte total de fósforo de 105,6 g y 111,7 g en base seca. Esta tasa de acumulación determinada en los dos ensayos mantiene igual tendencia a disminuir con el paso del tiempo (ver Figura 16), este efecto posiblemente se debe al hecho de que el fósforo retenido en el fondo del estanque constituyendo el detritus y bajo condiciones aeróbicas es sintetizado por diferentes tipos de bacterias tal como lo expresan Barak y Rijn (2000), además de otros factores como la concentración de oxígeno disuelto, dureza del agua y el pH.

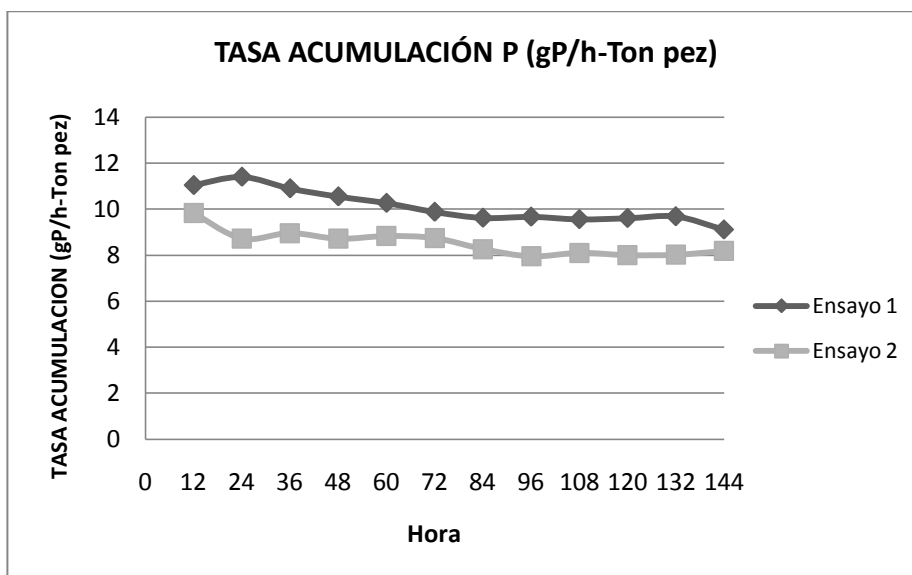


Figura 16. Tasa acumulación fósforo total

- **Fósforo fracción disuelta**

El fósforo suspendido a través del tiempo presenta procesos de degradación como se señaló anteriormente, provocando una transferencia a la fase disuelta; se determinó estadística descriptiva a esta fracción obteniendo los datos reportados en la Tabla 14.

Tabla 14. Estadística descriptiva fósforo fracción disuelta

	ENSAYO 1		ENSAYO 2	
	Afluyente	Efluente	Afluyente	Efluente
Promedio (mg/l) ± IC	0,081 ± 0,0068	0,087 ± 0,011	0,125 ± 0,019	0,138 ± 0,023
Desviación	0,0113	0,0187	0,033	0,037
Mínimo (mg/l)	0,068	0,064	0,070	0,081
Máximo (mg/l)	0,101	0,116	0,168	0,183
N° datos	13	13	13	13

El fósforo en fracción disuelta presento una tendencia logarítmica con coeficientes de correlación de Pearson de 0,738 y 0,859 respectivamente para cada ensayo, teniendo en cuenta que éste nutriente al igual que los sólidos suspendidos al ser retenidos al interior del estanque a través del tiempo pasan a su fase disuelta por procesos físicos, químicos y biológicos; según Stewart *et al.* (2006) esta fase tiene un incremento acelerado las primeras 24 horas, debido a que estos sólidos ricos en este nutriente genera sustrato

suficiente para la degradación microbiológica; para el ensayo 2 el incremento se visualiza en este tiempo, pero en el ensayo 1, ocurre hacia las 36 horas tal vez se debe a que el afluente presente mayor contenido de fósforo disuelto, ya que no se retiró el material vegetal en el canal de entrada en las primeras horas de estudio (ver Figura 17); en los últimos tres días de estudio la tasa procede a estabilizarse, posiblemente se debe al equilibrio entre las cantidad de microorganismos y la disponibilidad de sustrato presente en el interior del estanque.

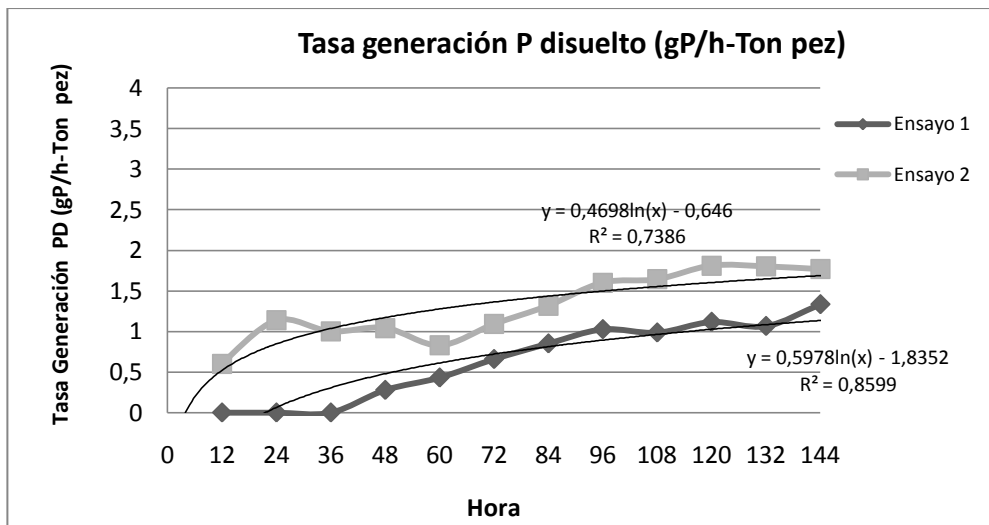


Figura 17. Tasa de generación de fósforo disuelto.

El porcentaje de transferencia de la fracción suspendida a la fracción disuelta de fósforo tanto para el Ensayo 1 como para el Ensayo 2, se observa una tendencia de la fracción disuelta a incrementarse a través del tiempo, lo cual presenta una similitud con la hallado por Stewart *et al.* (2006) en el comportamiento de la fase disuelta, pero con porcentajes más bajos, ya que el estudio se hizo en un sistema continuo; para las primeras 24 horas se tiene un porcentaje de transferencia de 21% para el ensayo 1, lo cual es un valor inferior al reportado por Stewart *et al.* (2006) de 30 % en la misma hora, para el ensayo 2 la disolución se presenta a las 36 horas con un porcentaje de 15 %, esto debido a la acumulación de materia orgánica presente en el canal de entrada, afectando la velocidad de los procesos de degradación y disolución para este ensayo (Brinker *et al.*, 2005), lo hablado anteriormente se observa en la Figura 18.

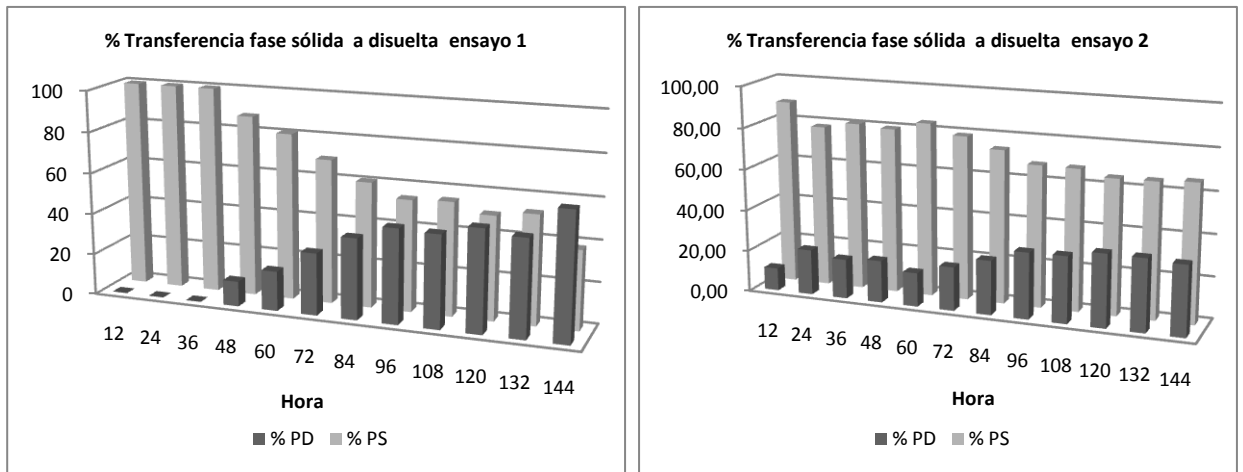


Figura 18. Porcentaje de transferencia de la fase sólida a disuelta para ensayo 1 y 2.

- **Nitrógeno total**

La concentración de nitrógeno fue determinada en laboratorio obteniendo los datos reportados en el Anexo D, los cuales fueron medidos tanto en el afluente como en el efluente para las fracciones suspendida y disuelta en cada uno de los ensayos realizados.

- **Nitrógeno total fracción suspendida**

Para la fracción suspendida del nitrógeno total, una vez analizada en el laboratorio y con los datos del Anexo D se les determinó estadística descriptiva, los cuales se encuentran resumidos en la Tabla 15.

Tabla 15. Estadística descriptiva nitrógeno total fracción suspendida

	ENSAYO 1		ENSAYO 2	
	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente
Promedio (mg/L) ± IC	0,110 ± 0,019	0,210 ± 0,0332	0,219 ± 0,0203	0,352 ± 0,052
Desviación	0,0318	0,0549	0,0336	0,086
Mínimo (mg/L)	0,046	0,106	0,149	0,154
Máximo (mg/L)	0,154	0,296	0,273	0,441
N° datos	13	13	13	13

Puesto que el estanque prototipo tiene alta eficiencia de retención de sólidos suspendidos y estos a su vez están compuestos en parte por nitrógeno, se presenta analogía en la retención de este nutriente en el sistema. En la Figura 19 se observa que el porcentaje de retención del nitrógeno en fracción suspendida presenta un máximo de 95,6 y 89,4% para los ensayos 1 y 2, dicha retención tiende a disminuir a través del tiempo, probablemente a que las bacterias degradadoras de nitrógeno requieren de tiempo para establecerse en el nuevo medio, y empezar a utilizar el sustrato que les provee el sistema, con sus respectivos efectos sobre la calidad del agua, ya que las bacterias encargadas del proceso de nitrificación son estrictamente aerobias (Atlas y Bartha, 2002), aumentando el consumo de oxígeno a lo largo del estanque, fenómeno mayormente evidenciado hacia las últimas horas del estudio, donde los consumos de oxígeno por fenómenos de degradación oscilan entre el 20 y 25% del oxígeno suministrado

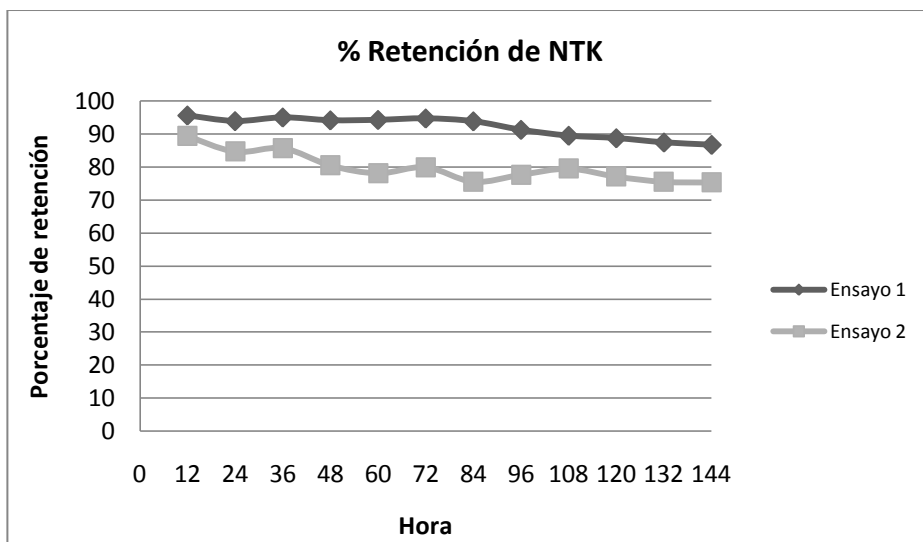


Figura 19. Porcentaje de retención de nitrógeno total Kjeldahl

Una vez retenido el nitrógeno en fracción suspendida se determinó la tasa mínima de acumulación, que para los dos periodos de muestreo son respectivamente de 52,85 y 44,44 $\frac{g N}{h-Ton_{pez}}$ con condiciones de suministro constante de alimento de 100,2 gN/Kg alimento, implicando para el final de cada ensayo un aporte total de nitrógeno de 1056 g y 1120 g en base seca. A partir de las tasas de acumulación mínimas de NTK encontradas en el presente estudio, se determinó que en el estanque prototipo para un periodo de un

mes se lograría retener aproximadamente 32 gNTK/ Kg pez, evitando la afectación de la fuente receptora, la cual al recibir este vertimiento propicia la proliferación de algas por la transformación microbiana del NTK en iones nitratos y la presencia de fosfatos (Roldán y Ramirez, 2008), colocando en riesgo de eutrofización la cuenca aguas abajo de la estación.

La tasa de acumulación determinada en los dos ensayos mantiene igual tendencia a disminuir con el paso del tiempo (ver Figura 20), esta disminución posiblemente se debe al incremento de los sólidos disueltos por fenómenos de degradación química y biológica, y procesos físicos de disolución debidos al flujo continuo del agua en el estanque y la actividad de los peces (Brinker *et al.*, 2005).

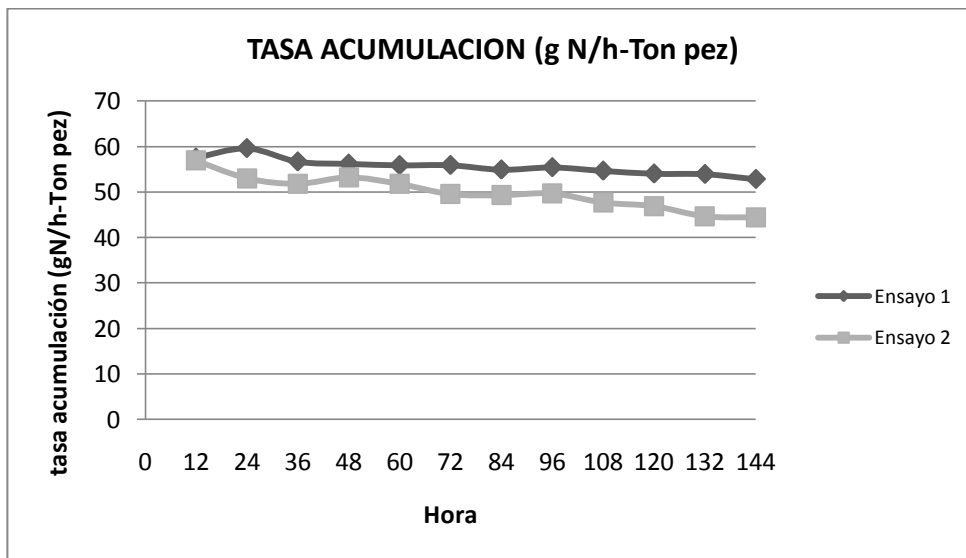


Figura 20. Tasa de acumulación de nitrógeno total.

- **Nitrógeno total fracción disuelta**

Una vez obtenidos en el laboratorio los datos de nitrógeno total en la fracción disuelta, se les determinó su respectiva estadística descriptiva, reportada en la Tabla 16.

Tabla 16. Estadística descriptiva nitrógeno total fracción disuelta

	ENSAYO 1		ENSAYO 2	
	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente
Promedio (mg/L) ± IC	0,056 ± 0,016	0,188 ± 0,030	0,121 ± 0,027	0,288 ± 0,047
Desviación	0,0271	0,0497	0,045	0,077
Mínimo (mg/L)	0,027	0,092	0,033	0,107
Máximo (mg/L)	0,099	0,261	0,171	0,348
N° datos	13	13	13	13

La tasa de generación de nitrógeno disuelto presenta comportamiento logarítmico con correlaciones de 0.7976 y 0.7863 para cada ensayo, observándose que para el ensayo 1 se alcanzó un máximo de 11 gND/h-Ton pez hacia la hora 36, lo que concuerda con Stewart (2006), el cual indica que la transformación de los sólidos acumulados hacia la fracción disuelta ocurre en las primeras 24 horas de funcionamiento con una degradación del 60% del nitrógeno presente. Después de la hora 36 la tasa de generación tiende a estabilizarse, puesto que la descomposición restante de del 40% del nitrógeno, el cual, mientras va siendo utilizado como sustrato para el metabolismo microbiano es compensado en forma disuelta por la muerte de bacterias presentes así como de la degradación celular (Garcia y Hall, 1996).

En el ensayo 2, se evidencia incremento hacia la hora 36 alcanzando un valor de 15 gND/h-Ton pez, indicando la transferencia de la fracción sólida a la disuelta del nitrógeno presente, pero a diferencia del ensayo 1, posterior a la hora 36 los valores presentan mayor variabilidad, efecto posiblemente debido a las condiciones de lluvia en la estación, las cuales aportaron por afluente mayor concentración de sólidos disueltos por escorrentía hasta el estanque, además los consumos de oxígeno por degradación en este segundo ensayo se incrementan desde la hora 48 y el pH es menor que en el ensayo 1, probando que al interior del estanque se presente actividad microbiana aeróbica encargada de los procesos de nitrificación, las cuales consumen oxígeno disponible y alcalinidad (Atlas y Bartha, 2002).

Dichos comportamientos de la tasa de generación a través de las 144 horas de funcionamiento del estanque en cada uno de los dos ensayos se pueden observar en la Figura 21.

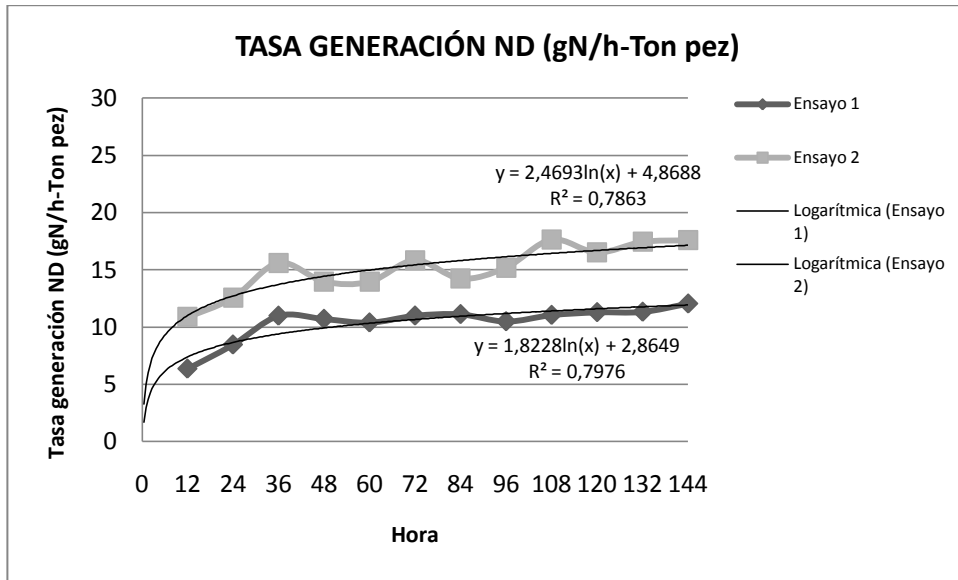


Figura 21. Tasa de generación de nitrógeno disuelto.

Para el porcentaje de transferencia de la fase sólida a la disuelta se contó con balances de masa generales los cuales indican tendencia a incrementar en ambos periodos de muestreo variando entre sí debido a las condiciones de operación de cada ensayo, dicha transferencia es congruente con el porcentaje y la tasa de generación de nitrógeno disuelto descrito anteriormente, lo cual se refleja en la Figura 22.

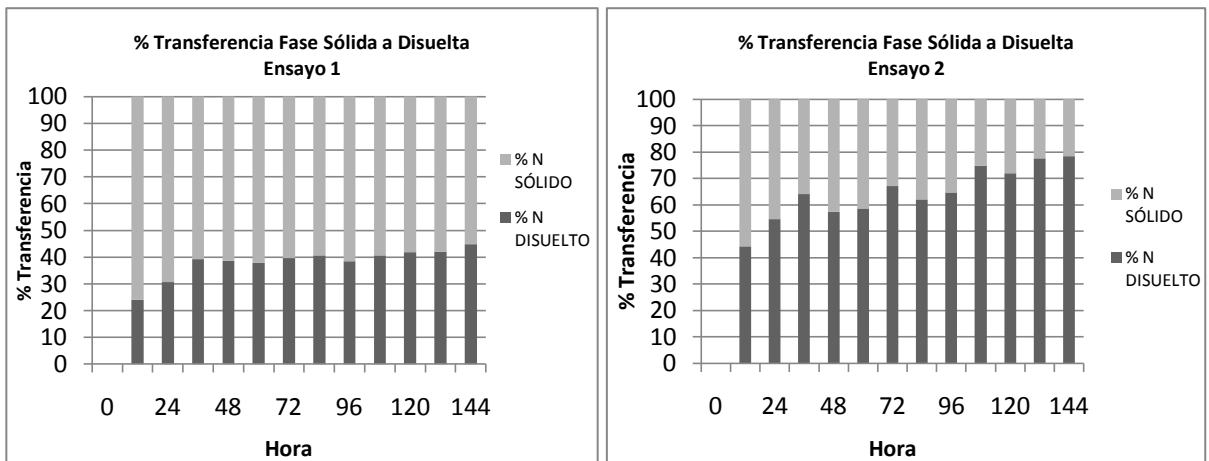


Figura 22. Porcentaje transferencia nitrógeno fase solida a disuelta para ensayo 1 y 2.

- **Nitrógeno amoniacal**

Los compuestos amoniacales se encuentran en dos estados los cuales son amonio ionizado (NH_4^+) y amoniaco libre (NH_3), estos gases que se producen de forma natural por degradación microbiana de productos nitrogenados, como las proteínas y la urea. La determinación de la concentración de nitrógeno amoniacal total (NAT) se realizó en el laboratorio obteniendo los datos registrados en el Anexo D, a cuyos valores se les determinaron las estadísticas descriptivas, que se resumen en la Tabla 17.

Tabla 17. Estadística descriptiva nitrógeno amoniacal

	ENSAYO 1		ENSAYO 2	
	Afluyente	Efluente	Afluyente	Efluente
Promedio (mg/L) \pm IC	0,019 \pm 0,005	0,139 \pm 0,014	0,009 \pm 0,004	0,130 \pm 0,027
Desviación	0,0077	0,0228	0,0062	0,0456
Mínimo (mg/L)	0,015	0,082	0,001	0,059
Máximo (mg/L)	0,044	0,156	0,018	0,182
N° datos	13	13	13	13

El nitrógeno amoniacal presentó incremento desde el inicio del funcionamiento del estanque, puesto que entre el 68 y 86% del nitrógeno consumido es excretado como urea y amoniaco disuelto (Islam, 2005), componentes principales del nitrógeno amoniacal.

Dicho incremento se presentó a razón de 1.227 y 1.824 gN-(NH_4^+)/h para cada ensayo respectivamente, con coeficientes de correlación de 0.995 y 0.989, tal como ilustra en la Figura 23. El crecimiento lineal puede ser generado por el aumento de la densidad de siembra en el estanque durante el periodo de muestreo (Ingle de la Mora *et al.*, 2003), la degradación de los sólidos acumulados que libera compuestos nitrogenados disueltos como urea y amoniaco al interior del estanque (Islam, 2005) y el aumento del consumo de oxígeno.

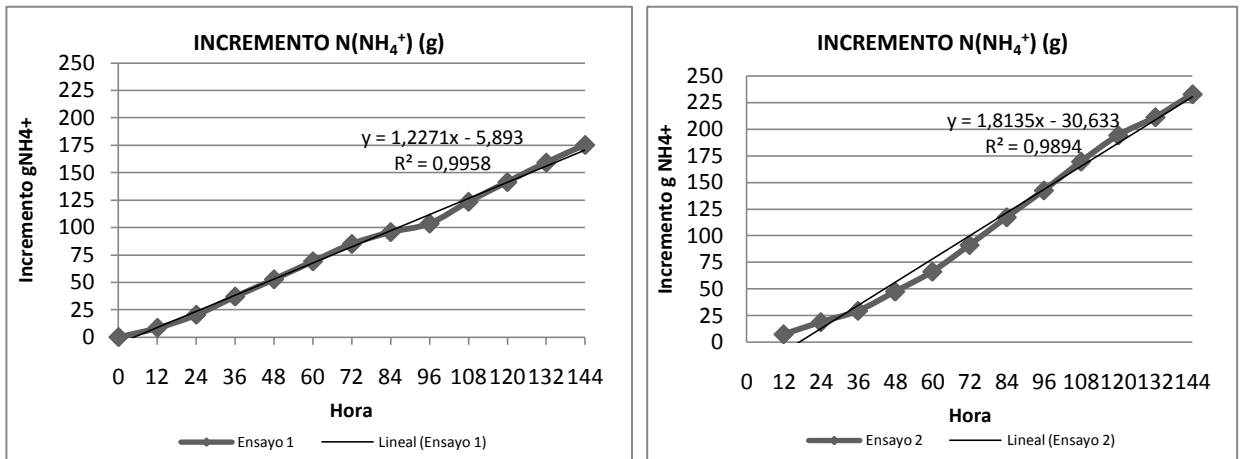


Figura 23. Incremento nitrógeno amoniacal para ensayo 1 y 2.

A pesar que el incremento en la aparición de NAT es lineal, no se alcanzaron concentraciones tóxicas para el cultivo en las 144 horas de funcionamiento del estanque; encontrándose al final de cada seguimiento en los efluentes concentraciones de 0.156 y 0.181 mgN-(NH₄⁺)/L para los ensayos 1 y 2 respectivamente. Posiblemente la toxicidad del NAT en el estanque no afectó el desarrollo de los peces, puesto que el pH en todo el estudio fue menor a 8 evitando la aparición de concentraciones significativas de N-NH₃, por lo tanto el NAT estuvo compuesto en su mayoría por N-(NH₄⁺) (Hargreaves y Tucker, 2004).

La tasa de generación de NAT en los dos ensayos presenta tendencia logarítmica con coeficientes de correlación de 0.867 y 0.932 respectivamente, para el ensayo 1 se presentó mayor crecimiento hasta la hora 60, posteriormente la tasa de generación tiende a estabilizarse hasta el final del ensayo, fenómeno debido probablemente a la asimilación bacteriana y a la precipitación química por altas concentraciones de NAT y la presencia de oxígeno disponible (Stewart *et al.*, 2006). Para el ensayo 2 el incremento se evidencia hasta la hora 96 y luego tiende a estabilizarse, este retardo en la estabilización de la tasa de generación puede ser ocasionado por condiciones de lluvia en la estación, disminución en la concentración de oxígeno al final del estanque, la muerte de bacterias y la degradación celular (García y Hall, 1996), tendencias evidenciadas en la Figura 24.

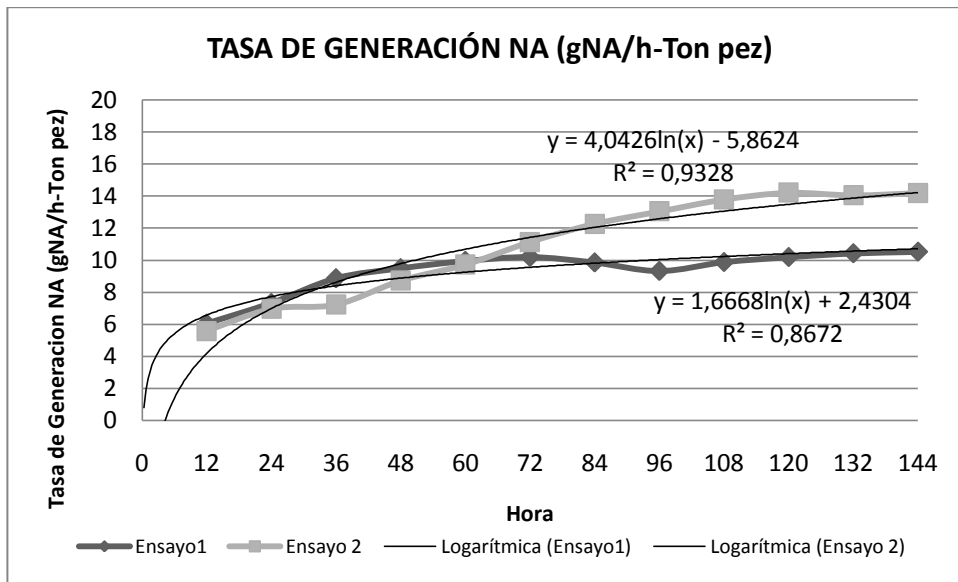


Figura 24. Tasa de generación nitrógeno amoniacal.

Para la hora 144, la tasa de generación alcanzó 10.53 g N-(NH₄⁺)/h-Ton pez y 14.20 g N-(NH₄⁺)/h-Ton pez en los ensayos 1 y 2 respectivamente; con lo cual se determinó que para un mes de funcionamiento del estanque prototipo, este vierte en el efluente alrededor de 10.22 Kg N-(NH₄⁺)/Ton pez, mientras que un estanque convencional con la misma densidad de siembra contribuye con 8.64 Kg N-(NH₄⁺)/Ton pez; el aumento en el vertimiento de NAT en el efluente del estanque prototipo, se debe tal vez a la mayor asimilación del alimento por los peces, transformándolo en tejido, puesto que el crecimiento en peso es mayor al reportado por el estudio en el estanque convencional en el periodo de 6 días, el cual para el estanque prototipo, el aumento en peso es de 19 g mientras que en el estanque convencional para el mismo periodo el crecimiento es de 11 g (Mamián y Garcés, 2011).

7.2 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS SEGUNDO OBJETIVO

7.2.1 Análisis fisicoquímico del agua

Para garantizar que la calidad fisicoquímica del agua es la requerida para un buen desarrollo de los peces, es decir, que no se vea afectado el crecimiento de los mismos por contaminantes derivados de los sólidos en descomposición, se analizaron los siguientes parámetros:

- **Temperatura**

En los cuatro periodos de muestreo la temperatura del estanque estuvo determinada por la temperatura del afluente y no presentó mayores fluctuaciones entre éste y el efluente, además los valores promedio de temperatura estuvieron en el rango adecuado para el desarrollo y crecimiento de los peces establecido por Aquino (2008), el cual está entre 9 y 17 °C.

- **Potencial de hidrógeno**

El pH medido en cada uno de los periodos se mantuvo en el rango recomendable para el desarrollo de los peces el cual es de 6.5 a 9 (Malison y Hartleb, 2005), y no presenta diferencias entre afluente y efluente, fenómeno demostrado en el análisis del primer objetivo, en la sección anterior.

- **Sólidos suspendidos totales**

Los SST se encontraron en un rango adecuado para un buen manejo del cultivo, por lo que la reducción de caudal en los cuatro periodos no afectó la tasa de acumulación de este parámetro (ver Figura 25); las concentraciones encontradas en dichos periodos analizados fueron inferiores a 80 mg/L, valor máximo de tolerancia por la trucha reportado por Aquino (2008).

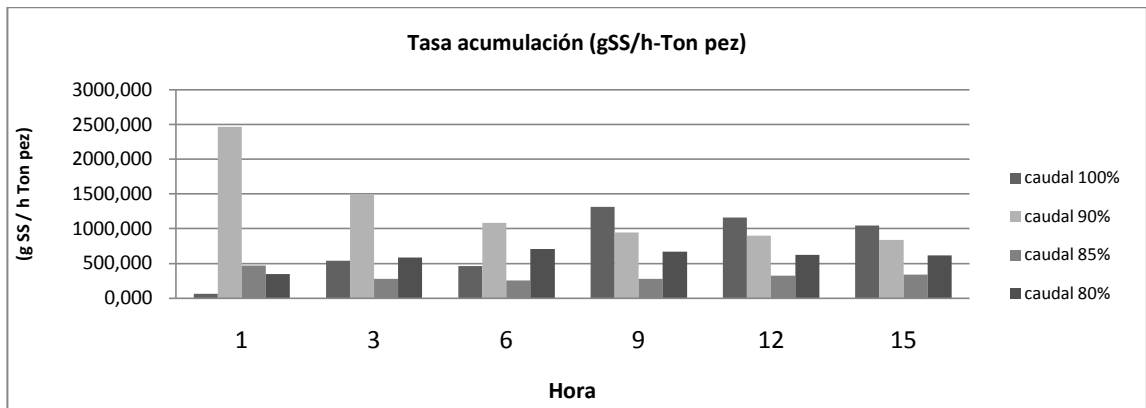


Figura 25. Tasa acumulación SST

- **Sólidos disueltos**

Debido a la acumulación de sólidos al interior del estanque, se presentan los fenómenos de degradación y disolución aumentando la tasa de generación de sólidos disueltos (ver Figura 26), además el aporte por el metabolismo de los peces también incrementó la concentración de SD medidos en el efluente del estanque. A pesar de estos incrementos la concentración de SD no es tóxica para el cultivo puesto que Brix (2010) reporta que niveles menores a 500 mg/L no afectan el desarrollo del pez.

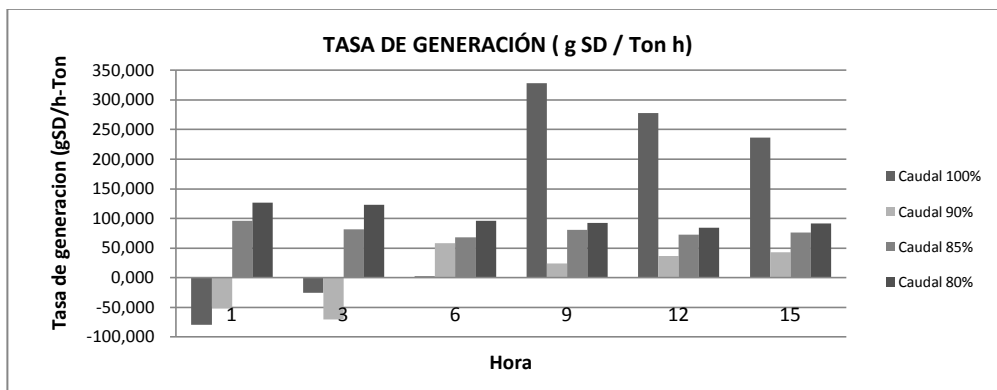


Figura 26. Tasa de generación SD.

- **Nitrógeno total Kjeldahl**

La acumulación de NTK al interior del estanque fue de 1500g al final de los 15 días de estudio de los periodos con caudales del 100, 90 y 85% mientras que para el caudal de 80% fue de 1965 g. Estas concentraciones no reportan problemas para el desarrollo del pez. Puesto que las concentraciones encontradas en cada periodo son menores a las determinadas en el objetivo 1, donde, a pesar del consumo de oxígeno de las bacterias, no se presentaron problemas para el cultivo

- **Nitrógeno amoniacal total**

Éste es uno de los parámetros críticos para la supervivencia del cultivo, ya que concentraciones bajas de amoníaco pueden acabar con la totalidad de los peces del estanque. Para el presente estudio las concentraciones de NAT presentaron un valor máximo para cada caudal 100%, 90%, 85% y 80% de 0.21, 0.24, 0.23 y 0.24 mg/L respectivamente, lo cual no indica ningún peligro para el pez, al respecto, Davidson *et al.* (2011) reportan valores aceptables de 0,5 mg NAT/L, teniendo esto en cuenta la única manera que este parámetro sea tóxico para el pez es que el pH se encuentre por encima de 8 unidades, lo cual no se presentó en los periodos de muestreo.

- **Fósforo total**

La tasa de generación de fósforo presenta igual tendencia que en los ensayos 1 y 2 analizados en el primer objetivo, esto debido a la transformación del fósforo en fracción suspendida a la disuelta, para los cuatro periodos de análisis, además la acumulación presenta incrementos lineales con correlaciones superiores a 0.954 para cada uno de los periodos analizados. Las cargas presentadas en el efluente al final de cada periodo (15 días) son de 430, 473, 520 y 525 g de PT para cada variación de caudal respectivamente, no presentan problemas para el desarrollo del pez.

La información que soporta el análisis de los parámetros fisicoquímicos anteriores se encuentra resumida en los Anexos F y G, con lo que se concluyó que ninguno de estos parámetros presentó algún tipo de alteración sobre el crecimiento del pez ni colocó en peligro la estabilidad del medio de cultivo, el análisis para el segundo objetivo se enfocó en la relación entre el oxígeno disuelto y la tasa de crecimiento de los peces.

- **Oxígeno disuelto**

El OD es el factor abiótico más importante sobre el crecimiento del pez y la sobrevivencia del mismo tanto en libertad como en la actividad piscícola. Además un aumento en este parámetro incrementa el consumo de alimento y la eficiencia en el metabolismo del alimento consumido (McDaniel *et al*, 2005).

La relación entre OD y caudal se relaciona a continuación.

Caudal 100% (2,4 L/s): para el caudal de 2.4 L/s y densidad inicial de 8,81 Kg pez/m³ se tuvo que desde el canal de entrada hasta la mitad del estanque la concentración de OD estuvo por encima de 5.5 mg/L lo cual indica que el cultivo no tuvo mayores inconvenientes para su supervivencia hasta los 12 días de funcionamiento, para el día 15 la concentración hacia la mitad del estanque llegó a su punto crítico de 4.92 mg/L colocando en riesgo a los peces; el promedio total de OD hacia el final del estanque se mantuvo en condiciones desfavorables para el sistema, puesto que se llegó a tener concentraciones mínimas de 4.35 mg/L en el día 6, fenómeno contrarrestado con el lavado del estanque, tal como se ilustra en la Figura 27.

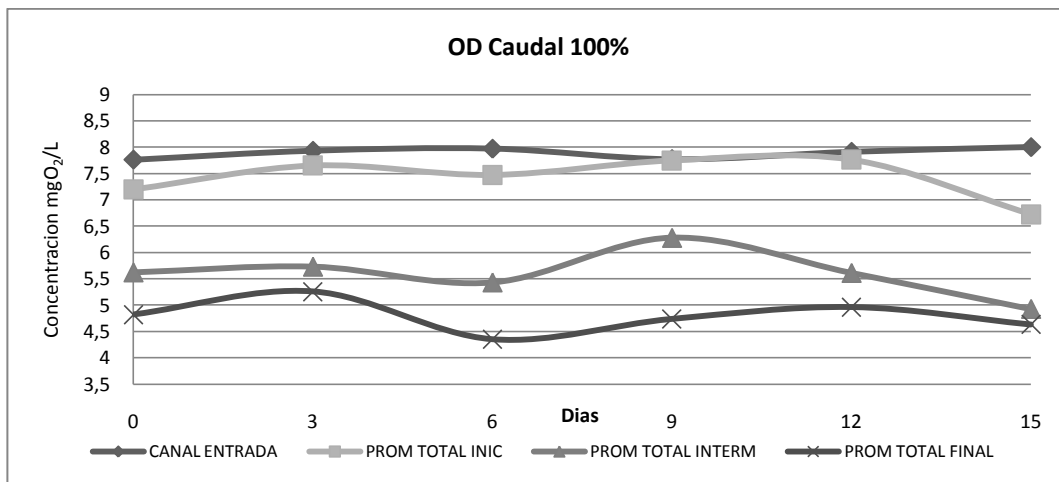


Figura 27. Comportamiento OD para el 100% del caudal suministrado.

Caudal 90% (2,8 L/s): para este periodo de muestreo, el caudal requerido para la densidad del estanque (11,33 Kg pez/m³) es de 3.11 L/s, al cual se le hizo una reducción del 10% suministrando al sistema un flujo de 2,8 L/s; a pesar de esta reducción el sistema estuvo dentro de las concentraciones adecuadas para el sano desarrollo de los peces en la totalidad del estanque en un periodo de 6 días continuos de funcionamiento, el inconveniente se presentó a partir del 9º día donde se presentaron concentraciones mínimas de 4.79 y 4.61 mg/L para la zona intermedia y final del estanque respectivamente, al igual que en el caudal del 100% el fenómeno de la disminución del OD fue contrarrestado con el lavado del estanque en dicho día (ver Figura 28).

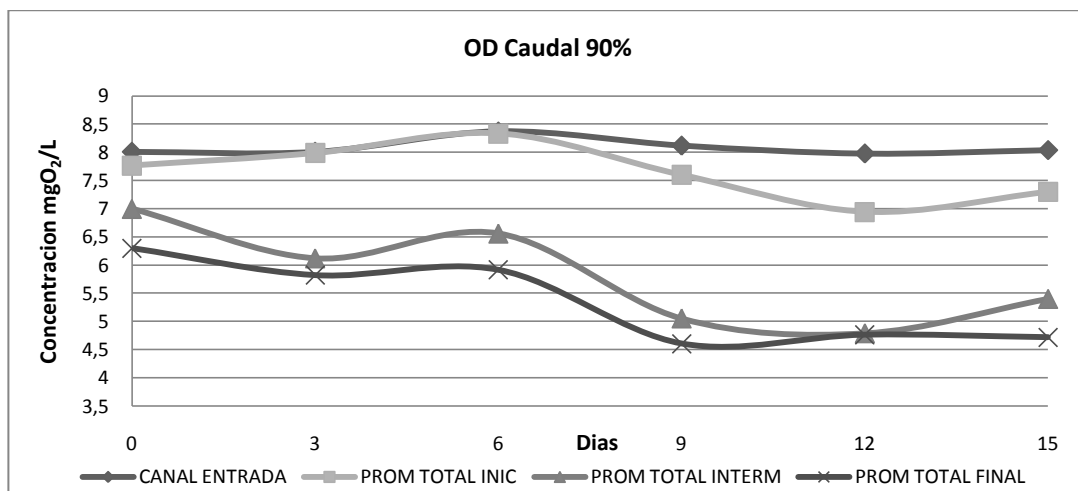


Figura 28. Comportamiento OD para el 90% del caudal suministrado.

Caudal 85% (3,5 L/s): el caudal requerido para el estanque con una densidad inicial de 14,77 Kg pez/m³ fue de 4.11 L/s el cual fue reducido un 15%, por lo tanto se le suministró al estanque un flujo de 3,5 L/s; con dicha reducción el estanque no presenta inconvenientes para el sano desarrollo de los peces desde el canal de entrada hasta la zona intermedia del mismo, puesto que se presenta una mínima concentración en el intermedio del estanque de 5.27 mg/L para el día 3, manteniendo el estanque en buenas condiciones por un periodo de 15 días en todas las zonas del mismo, en este caso se realizó el lavado el día 6º donde la Figura 29 muestra como se recupera el OD al final del estanque y se mantienen concentraciones superiores a 5,5 mg/L.

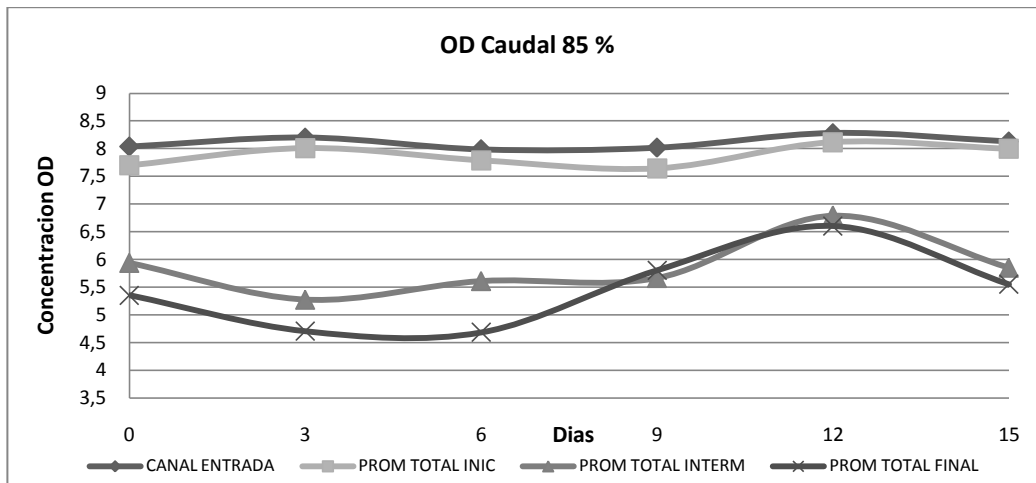


Figura 29. Comportamiento OD para el 85% del caudal suministrado.

Caudal 80% (3,7 L/s): en este caso se tuvo una densidad inicial de 15,95 Kg pez/m³, donde se calculó un caudal neto de 4,6 L/s el cual fue reducido en un 20%, suministrando al cultivo un caudal de 3,7 L/s. Con dicha reducción el sistema se mantuvo en condiciones de operatividad normal desde el canal de entrada a la zona intermedia del estanque hasta el día 12^o, en el cual el OD en esta zona disminuye a 5,5 mg/L; a pesar que la zona final del estanque inicia con una concentración de 5 mg/L se recupera con el paso del tiempo hasta el día 12 en la cual baja nuevamente a 5,5 mg/L colocando en riesgo el cultivo. El comportamiento del OD para un caudal suministrado del 80% y el periodo de lavado del día 6^o se ilustra en la Figura 30.

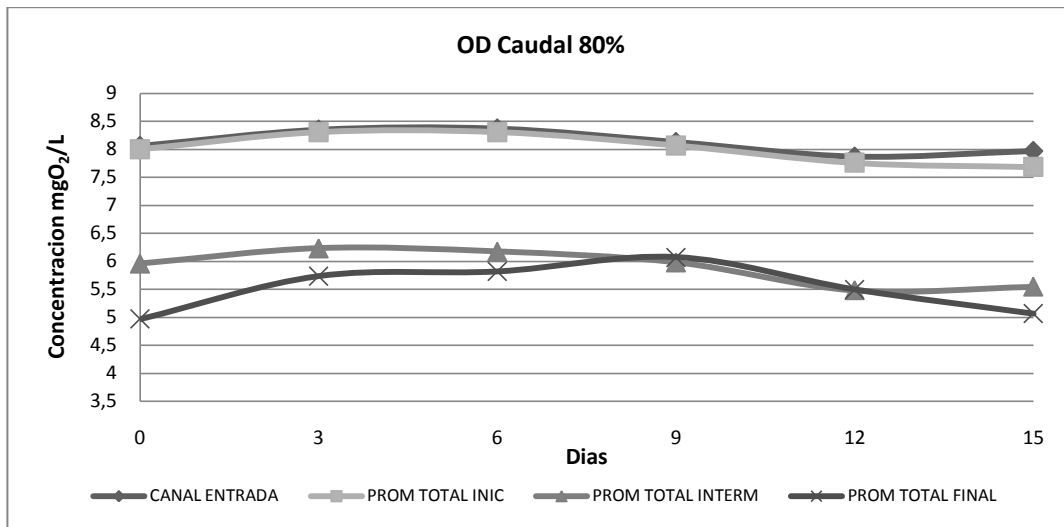


Figura 30. Comportamiento OD para el 80% del caudal suministrado.

El consumo de OD a través del estanque en el periodo de muestreo de los 15 días con las cuatro reducciones de caudal, se resume en la Figura 31, en la cual se observa claramente el efecto del lavado del estanque sobre el consumo total de OD

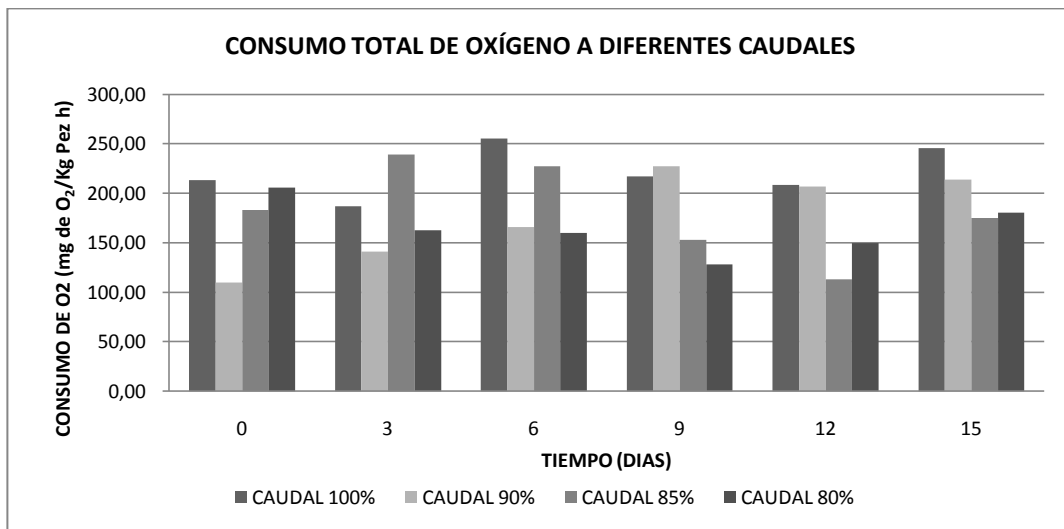


Figura 31. Consumo total de OD a diferentes caudales.

El efecto de la disminución del OD se evidencia gráficamente puesto que al realizar la comparación entre el oxígeno de ingreso, consumo real y consumo teórico en cada uno de los caudales estudiados, se observa que con reducciones del 10, 15 y 20% del flujo

requerido para las densidades de peces presentes en el medio, el oxígeno consumido es mayor que el teórico, contrario a lo que sucede con el 100% del caudal suministrado (ver Figura 32).

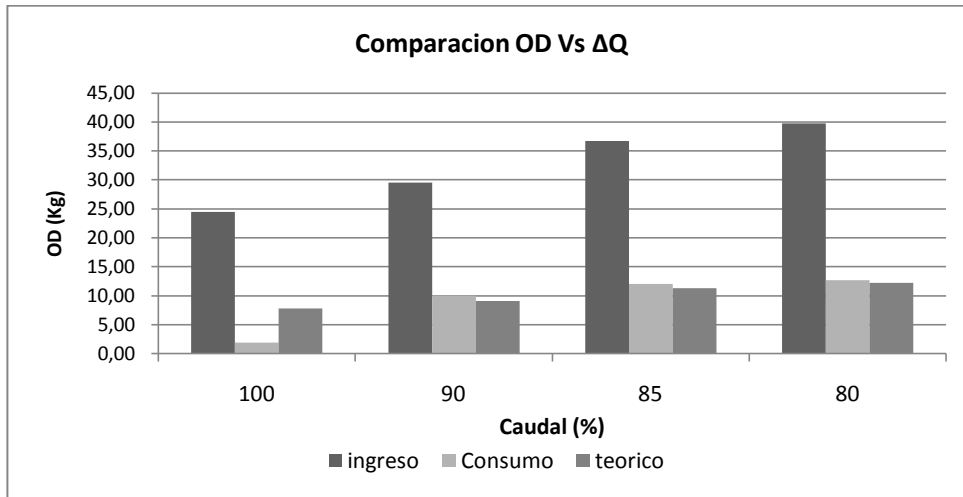


Figura 32. Comparación OD presente en el sistema con las reducciones de caudal.

Los factores fisicoquímicos no alteraron el crecimiento de los peces y el cultivo tuvo buenas condiciones de OD para utilizarlo en el metabolismo del alimento consumido, lo que hizo que la variaciones de caudal no afectaran el crecimiento de los peces, con tasas de conversión de alimento (relación entre el alimento suministrado y el incremento en peso de los peces) cercanas al valor reportado por Mallya (2007) de 0,97 encontrándose para este estudio conversiones de 0.964, 0.727 y 0.891 para caudales suministrados de 100, 90 y 80% respectivamente.

Además de las tasas de conversión alimenticia se obtuvo la tasa de crecimiento de los peces con cada variación de caudal presentando incrementos similares en los caudales con 100, 90 y 80%. En el único periodo que los peces crecieron de forma diferente fue con el suministro del 85% del caudal, puesto que en este periodo los peces no fueron alimentados con la misma frecuencia y cantidad de alimento por problemas ajenos al desarrollo del estudio presentados en la estación. La tasa de crecimiento para cada caudal se resume en la Figura 33.

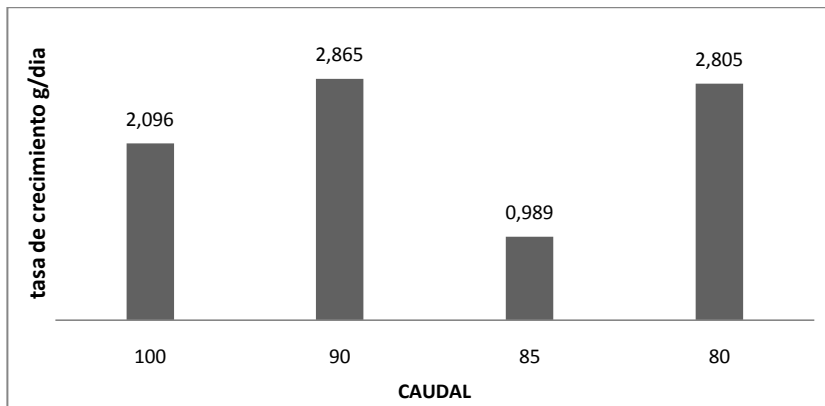


Figura 33. Tasa de crecimiento g/día

El crecimiento global de los peces durante los cuatro periodos de muestreo presenta incremento lineal, y se tiene que crecen a razón de 2,001 g/día partiendo de peces con peso inicial de 110,156 g hasta lograr el peso de comercialización de 241,47 g hacia el día 60 de estudio, con coeficiente de correlación de 0.974 (ver Figura 34). Así mismo se encontró que bajo las condiciones de operación adoptadas en este estudio los peces crecen más rápido que lo registrado en la curva teórica de crecimiento del texto La Trucha: Cría Industrial de Blanco M., en el cual tardan los peces 4 meses en llegar de 110 a 200 g (ver Anexo I, Figura 40).

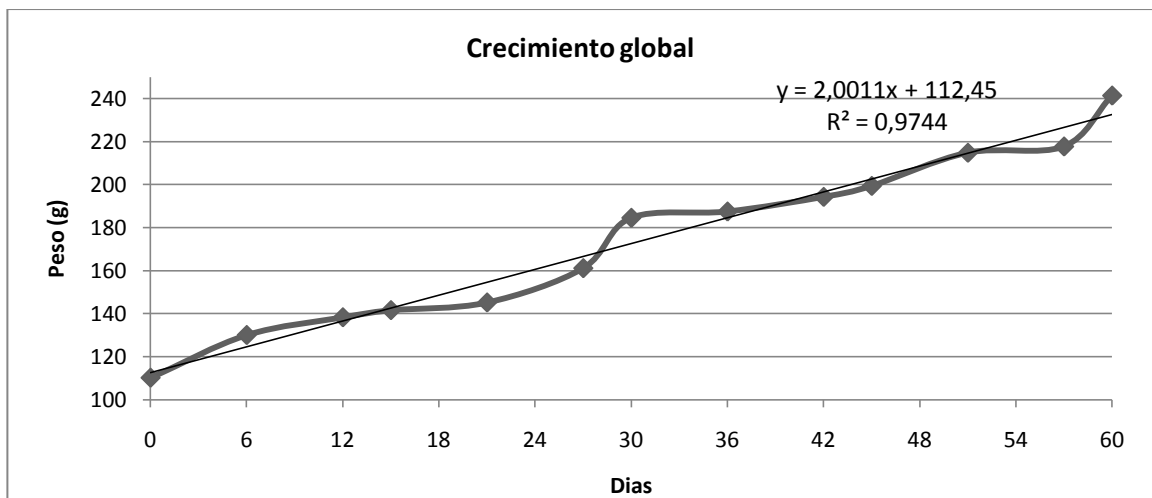


Figura 34. Crecimiento global peces.

8. CONCLUSIONES

- Los sólidos suspendidos acumulados al interior del estanque, a través del tiempo incrementan la tasa de generación de contaminación disuelta mediante los procesos de degradación de la materia orgánica y la disolución por las fuerzas hidrodinámicas.
- Las tasas de generación de los contaminantes disueltos presentes por fenómeno de degradación y disolución contenidos en los sólidos acumulados, muestran un comportamiento logarítmico, indicando que los procesos son acelerados en las primeras 96 horas de operación del estanque y tienden a estabilizarse posteriormente.
- Debido a las condiciones específicas de operación de los dos ensayos los porcentajes de transferencia de los nutrientes NT y PT varían considerablemente en magnitud pero son iguales en tendencia, es decir, dichos porcentajes se incrementan con el paso del tiempo y continúan así hasta el final de cada periodo de muestreo; al final de las 144 h se tuvo un porcentaje de transferencia de 44,9 y de 78,4% para fracción disuelta de NT en cada uno de los ensayos respectivamente y PT con 61,79 y 33,75 % para la fracción disuelta en los ensayos 1 y 2.
- Las concentraciones obtenidas para NT, PT, tanto en fracción suspendida como en la disuelta; SST, SD, no son perjudiciales para el sano crecimiento de los peces en el tiempo analizado de 144 horas de operación del estanque.
- El Nitrógeno Amoniacal Total (NAT) presentó incremento lineal en todos los periodos de muestreo, sin embargo no alcanzó concentraciones críticas que colocaran en riesgo la supervivencia del cultivo.
- La reducción del caudal requerido para la densidad presente en el estanque no afectó la supervivencia ni el crecimiento de los peces, aunque en la sección final del mismo no se alcanzaron los niveles de oxígeno disuelto necesarios para el sano desarrollo del cultivo, efecto contrarrestado con la extracción de los lodos cada 6 días que mejoró las condiciones de oxígeno disponible en la totalidad del sistema.

- Tanto la tasa de conversión alimenticia como la de crecimiento fueron efectivas para alcanzar el peso comercial de los peces en dos meses (iniciando con peso de 110g hasta llegar a 240 g), reduciendo la permanencia de los mismos en la estación y los costos de operación por alimento con las cuatro variaciones de caudal.

9. RECOMENDACIONES

- Para un buen funcionamiento del estanque es recomendable utilizar polisombra con el fin de controlar la propagación de micro y macro fotosintéticos a lo largo del estanque, los cuales aprovechan la luz solar que incide directamente sobre las paredes inclinadas, reproduciéndose a gran velocidad, lo cual evita que los sólidos se sedimenten quedando acumulados en las paredes ocasionando enfermedades en los peces, además que estos microorganismos compiten con el OD en horas de la noche con los peces.
- Debido a la facilidad en la remoción de los sólidos acumulados al interior del estanque, se recomienda realizar limpieza (apertura de la válvula alrededor de 30 a 40 segundos) cada 3 días de operación del estanque, manteniendo así un ambiente sano para los peces.
- Para una mejor aplicación del estanque prototipo es conveniente realizar la comparación del comportamiento de los parámetros fisicoquímicos (NT, NAT, PT, SST, SD, OD) y las tasas de crecimiento para estanques construidos en tierra, concreto (con diferente geometría) y el estanque prototipo.

REFERENCIAS

- AQUINO G. 2008. Manual Básico para el Cultivo de Trucha Arco Iris (*Oncorhynchus mykiss*). Global environmental management. Volumen 1, Pág. 5 – 23.
- ARCE O. 2006. Eutrofización de cuerpos de agua. Química del agua. Bolivia.<http://www.fcyt.umss.edu.bo/docentes/29/documentos/Eutrofizacion.pdf>
- ASOCIACIÓN CIVIL LABOR. Proyecto “Mejorando La Rentabilidad De La Truchicultura En El Lago Titicaca Con Visión Empresarial Y Responsabilidad Social Ambiental”. 2010. Pág. 13.
- ATLAS R., BARTHA R., Ecología microbiana y Microbiología ambiental, 4 Edición, Editorial PEARSON Addison Wesley. Madrid España 2002. Pág. 383 – 436.
- BARAK Y., RIJN J., Biological phosphate removal in a prototype recirculating aquaculture treatment system, Aquacultural Engineering, Israel, 2000. Volumen 22, Pág.121-136.
- BILOTTA G., BRAZIER R., Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota. Water research 42 (2008) 2849 – 2861
- BLANCO M. La Trucha: Cría Industrial. Madrid. Mundi Prensa. 1995. Pág. 249, 500-530.
- BRAUNER C., THORARENSEN H., GALLAUGHER P., FARELL A., RANDALL D. CO₂ transport and excretion in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) during graded sustained exercise. Respiration Physiology 119 (2000) 69–82.

- BRENNER T., REFERAT F. Las pesquerías de aguas continentales frías en América Latina. COPESCAL Documento Ocasional. No. 7. Roma, FAO. Pág. 32.1994
- BRINKER A., GERD SCHRO H., RO´SCH R., A high-resolution technique to size suspended solids in flow-through fish farms. *Aquacultural Engineering* 32 (2005) 325–341. Alemania.
- BRIX K. V., GERDES R., CURRY N., KASPER A., GROSELL M; The effects of total dissolved solids on egg fertilization and water hardening in two salmonids- arctic grayling (*Thymallus arcticus*) and Dolly Varden (*Salvelinus malma*). *Aquatic Toxicology*. 97 (2010) 109–115.
- BURYNIUK M., PETRELL R., BALDWIN S., VICTOR K., Accumulation and natural disintegration of solid wastes caught on a screen suspended below a fish farm cage. *Aquacultural Engineering* 35 (2006) 78–90. Canada.
- CAMACHO, B., MORENO, M., RODRÍGUEZ, M., LUNA C., VÁZQUEZ, M., 2000. Guía para el cultivo de trucha *Oncorhynchus mykiss* (Smith y Stearly, 1988). Semarnap. Pág. 43 – 46. Primera edición. Tlalpan (México, D.F). ISBN 968 – 817-437 -8.
- CAMARGO J., ALONSO A., Contaminación por nitrógeno inorgánico en los ecosistemas acuáticos: problemas medioambientales, criterios de calidad del agua, e implicaciones del cambio climático. *AEET Asociación Española de Ecología Terrestre. Ecosistemas* 16 (2): 98-110. Mayo 2007.
- CASTILLO F. *Biotecnología ambiental*. Primera edición. Editorial TEBAR. Madrid. 2005. Pág 157.
- CHIMBOR C., Principales enfermedades en la trucha Arcoíris, *Revista Acuavision* No 2, 2009, Perú, Pág. 20 – 23.

- COLOSO R., KING K., FLETCHER J., HENDRIX M., SUBRAMANYAM M., WEIS P., FERRARIS R., Phosphorus utilization in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed practical diets and its consequences on effluent phosphorus levels, *Aquaculture*, 220 (2003) 801–820.
- COLT J., Water quality requirements for reuse systems, *Aquacultural Engineering* 34 (2006) 143–156, Northwest Fisheries Science Center, National Marine Fisheries Service.
- COLT J., WATTEN B., RUST M., Modeling carbon dioxide, pH, and un-ionized ammonia relationships in serial reuse systems. *Aquacultural Engineering* 40 (2009) 28–44.
- CONAMA. Consejo nacional de medio ambiente. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água ediretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.2005. Pág 7.
- CRIPPS S., BERGHEIM A., Solids management and removal for intensive land-based aquaculture production systems. *Aquacultural Engineering* 22 (2000) 33–56. Noruega, 2000
- DALSGAARD J., BOVBJERG PEDERSEN P., Solid and suspended/dissolved waste (N, P, O) from rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture*. Dinamarca. 313 (2011) 92–99.
- DAVIDSON J., HELWIG N., SUMMERFELT S., Fluidized sand fiobilters used to remove ammonia, biochemical oxygen demand, total coliform bacteria, and suspended solids from an intensive aquaculture effluent. *Aquacultural Engineering* 39 (2008) 6–15. Estados Unidos. 2008.

- 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. *Aquacultural Engineering*. 2011. Pág. 1-17.
- DE LA CRUZ C. y SALAZAR A. Caracterización y estudio de tratabilidad del efluente de estaciones piscícolas. Departamento de Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Universidad del Cauca. Tesis de grado. Popayán. 2007. Pág. 50 -60.
- ESPINAL C; GONZÁLEZ F, MARTÍNEZ H. La cadena de la piscicultura en Colombia, una mirada global de su estructura y dinámica 1991 – 2005. Bogotá, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Observatorio agro cadenas. 2005.
- ESPINOZA, J. Piscicultura, Conceptos y Definiciones, 2004, Panamá. Pág.1- .2
- FAO. Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación. Departamento de pesca y acuicultura. Visión general del sector acuícola nacional: Colombia. Roma. 2009.
- FERNÁNDEZ F. Algunos problemas de control en procesos de eutrofización. Universidad de Santiago de Compostela. Memorias tesis de doctorado. España 2008. Pág. 2- 4.
- FERNÁNDEZ J., DE LA CRUZ C. Y CAICEDO J. Informe de avance: Inventario y diagnóstico de Piscícolas en el Departamento del Cauca. Proyecto de Efluentes, Unicauca, Univalle, Crepic. 2010.Pág 3 - 9
- FRANCIS – FLOYD R., WATSON C., Ammonia, University of Florida, IFAS extension, FA 16, 2005. Pág. 2 – 4.

- GÁL D., SZABÓ P., PEKÁR F., VÁRADI L., Experiments on the nutrient removal and retention of a pond recirculation system. Research Institute for Fisheries, Aquaculture and Irrigation, Hydrobiology 506–509: 767–772, Szarvas, Hungary. 2003
- GARCÍA – RUIZ R., HALL G., Phosphorus fractionation and mobility in the food and faeces of hatchery reared rainbow trout (*Oncorhynchus Mykiss*). Aquaculture. 145 (1996) 183-193.
- HARGREAVES J., TUCKER C., Managing Ammonia in Fish Ponds. SRAC Southern Regional Aquaculture Center. Publication No 4603. December 2004. Pág. 2 – 8.
- HENRY J., HEINKE G., Ingeniería Ambiental, Editorial PRENTICE HALL, México, 1999, Pág. 314 – 325.
- HOFER R., JENEY Z., BUCHER. Chronic effect of Linear Alkylbenzene Sulfonate (LAS) and ammonia on rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fry at water criteria limits. Gran Bretaña. 0043-1354(95)00143-3. 1995
- HOSFELD C. D., HAMMER J., HANDELAND S., FIVELSTAD S., STEFANSSON S. Effects Of Fish Density On Growth And Smoltification In Intensive Production Of Atlantic Salmon (*Salmo Salar* L.). Aquaculture. 294 (2009) 236–241.
- HUSSAR G., PARADELA A., JONAS T., RODRIGUES J. Tratamento da água de escoamento de tanque de piscicultura através de leitos cultivados de vazão subsuperficial: análise da qualidade física e química. Brasil: 2005. Volumen 2, Pág. 46 – 59.

- INGLE DE LA MORA, G., E. L. VILLAREAL-DELGADO, J. L. ARREDONDO-FIGUEROA, J. T. PONCE-PALAFIX E I. DE LOS A. BARRIGA-SOSA. Evaluación de algunos parámetros de calidad del agua en un sistema cerrado de recirculación para la acuicultura, sometido a diferentes cargas de biomasa de peces. *Hidrobiológica*. 2003. 13 (4). Pág. 250-253.
- Instituto Colombiano de Desarrollo Rural INCODER. Subgerencia de Pesca y Acuicultura. Cultivo de la Trucha Arco Iris (*Oncorhynchus mykiss*). Bogotá. 2005
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC. Proyecto Zonificación, Caracterización y Manejo Sostenible de los Paramos en el Departamento del Cauca. Bogotá. 2005
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM. Informe Anual sobre el Estado del Medio Ambiente y los Recursos Naturales Renovables en Colombia. Estudio Nacional del Agua. Bogotá. 2010.
- ISLAM, SHAHIDUL. 2005. Nitrogen and phosphorus budget in coastal and marine cage aquaculture and impacts of effluent loading on ecosystem: review and analysis towards model development. *Marine Pollution Bulletin* 50. Pág. 48–61
- KIM K., Re-evaluation of protein and amino acid requirements of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*. *Aquaculture* 151 (1997) 3 – 7. Año 1997
- LEFRANÇOIS P., PUIGAGUT J., CHAZARENC, COMEAU Y.; Minimizing phosphorus discharge from aquaculture earth ponds by a novel sediment retention system. *Aquacultural Engineering*, 43 (2010) 94–100.
- LOIX B., Manual on effluent treatment in aquaculture: Science and Practice. Chapter 3: Effluent water treatment: Solids Removal. *Aquaetreat*. Pág. 31 – 45. Italia, 2005
- LOVELL, R. 2002. Diet and Fish Husbandry in: J. Halver & R. Hardy. *Fish Nutrition*. Pág. 720-730.

- MAILLARD V. M., BOARDMAN G. D., NYLY J. E., KUHN D. Water quality y sludge characterization at raceway-system trout farms. *Aquacultural Engineering*, 33 (2005) 271–284.
- MALISON J., HARTLEB C., Best management practices for Aquaculture in Wisconsin and the Great Lakes Region, USA, 2005. Pág. 7- 87.
- MALLYA, Y. J.. The Effects Of Dissolved Oxygen On Fish Growth In Aquaculture. Kinglowira National Fish Farming Center, Fisheries Division, Ministry of Natural Resources and Tourism, Tanzania.2007. Pág. 13 - 26.
- MAMIAN E. y GARCES Z. Generación de contaminación disuelta a partir de los sólidos suspendidos totales acumulados en un estanque convencional de trucha construido en concreto y su efecto en el crecimiento de los peces. Departamento de Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Universidad del Cauca. Tesis de grado. Popayán. 2011. Pág. 23
- McDANIEL N., SUGIURA S., KEHLER T., FLETCHER J., COLOSO R., WEIS P., FERRARIS R., Dissolved oxygen and dietary phosphorus modulate utilization and effluent partitioning of phosphorus in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) aquaculture. *Environmental Pollution*. 138 (2005) 350-357.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural MADR, Corporación Colombia Internacional CCI, Sistema de información de la Oferta Agropecuaria SIA, Informe de Resultados, Encuesta Nacional Piscícola 2010 B, ISSN 2010 – 8449, Bogotá, 2010.
- MORALES G., Crecimiento y eficiencia alimentaria de trucha arcoíris *Oncorhynchus mykiss* en jaulas bajo diferentes regímenes de alimentación. Universidad de Buenos Aires – Argentina. 2004.

- MOSTACEDO B., FREDERICKSEN B., Manual de Métodos Básicos de Muestreo y Análisis en Ecología Vegetal, BOLFOR, Santa Cruz de la Sierra, 2000.
- PIEDRAHITA R. Reducing the potential environmental impact of tank aquaculture effluents through intensification and recirculation. California EEUU, 2003
- RODRÍGUEZ, H., ANZOLA, E. La calidad del agua y la productividad de un estanque en acuicultura. En: Colombia Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Fundamentos de Acuicultura Continental. Bogotá. 2001. Pág. 70 -72.
- ROLDÁN G., RAMÍREZ J. Fundamentos de limnología neotropical. Segunda edición. Editorial Universidad de Antioquia. Medellín. 2008. Pág. 33- 34.
- ROQUE E. BLANCHETON J., BOUJARD T., AUBIN J., MONTOUNET Y., PRZYBYLA C., BELAUD A., Comparison of two methods for evaluating waste of a flow through trout farm. Aquaculture 274 (2008) 72–79. Año 2008
- RYDING, S y RAST, W., 1992. El control de la eutrofización en lagos y pantanos. Ediciones Pirámide, Madrid y UNESCO, París. Pág. 375
- Sistema de Información de Pesca y Acuicultura SIPA, Boletín Mensual El cultivo de Trucha en Colombia, ISSN 2011 – 8139, Bogotá, Agosto 2009.
- Sitio Argentino de Producción Animal SAGPyA, 2006. Disponible en: <http://www.produccion-animal.com.ar/> (visitado el 28 de enero del 2011).
- SOLLA, SollaNotas, El papel del oxígeno en la producción de Truchas, 2009. Disponible en: <http://www.solla.com/PDF/SollanotasDic09Peces.pdf>
- STEWART N., BOARDMAN G., HELFRICH L. Characterization of nutrient leaching rates from settled rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) sludge. Aquacultural Engineering 35 (2006) 191–198. Año 2006.

- TELLO, A. CORNER, R.A., TELFER T.C. How do land-based salmonid farms affect stream ecology. *Environmental Pollution*. 2010. Pág. 1147–1158.

- TORRES, B. Organic matter decomposition in simulated aquaculture ponds. PhD thesis, Fish Culture and Fisheries Group, Wageningen Institute of Animal Sciences. Wageningen University, P. O. Box 338, 6700 AH Wageningen, The Netherlands. Pages 12-34. 2005.

- TORRES, E., Estado actual de la acuicultura. Villavicencio - Colombia. 2006.

- TRUE B., JOHNSON W. y CHEN S. 2004b. Reducing phosphorus discharge from flow-through aquaculture II: Hinged y moving baffles to improve waste transport. *Aquacultural Engineering* 32 (2004) 145–160.

- VOLLERTSEN J., ALMEIDA M., HVITVED T. Effects of temperature and dissolved oxygen on hydrolysis of sewer solids. PII: S0043-1354(99)00032-9. Año 1999.

- WETZEL, R.G. y LIKENS, G.E, 1991. *Limnological analysis*. Second Edition. Springer-Verlang. New-York. En: Álvarez. La descomposición de materia orgánica en humedales: la importancia del componente microbiano. *Revista Científica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente*. *Ecosistemas* 14 (2). 2005. Pág. 17 – 29.

ANEXOS

ANEXO A: Fórmulas de cálculo para los parámetros de análisis

- Caudal $\rightarrow Q = \frac{V}{t} = \frac{l}{s}$
- Cálculo de caudales para el segundo objetivo:

$$\text{Caudal} = \frac{\text{Biomasa (Kg)} * \text{Consumo de Oxígeno} \frac{mg}{Kg \cdot h}}{3600 s * \text{Oxígeno disponible} \frac{mg}{L}}$$

Donde Biomasa= Peso individual trucha (kg) * N° de truchas en el estanque, Consumo de oxígeno= Interpolación de la Figura 41, Oxígeno disponible= (Oxígeno entrada – Oxígeno residual) mgL^{-1} , Oxígeno residual = 5.5 mg/L . Según Blanco, 1995.

- Volumen $\rightarrow V = Q * t$
- % de Humedad $\rightarrow \%Hum = \left(\frac{W_{agua}}{W_{muestra húmeda}} \right) * 100$

Donde W_{agua} = Calculado por diferencia de pesos ente (W caja vacía + W muestra húmeda) - (W caja + W muestra seca) después de someter la muestra a proceso de secado a 105°C.

- Gramos de nutrientes en muestra $\rightarrow g(P, N)_{muestra} = \frac{(C * V_{muestra})}{1000} = \frac{\left(\frac{mg(P, N)}{l} \right) * (l)}{mg/g}$
- Porcentaje de nutrientes en muestra $\rightarrow \%P, N = \left(\frac{g(P, N)}{W_{muestra seca}} \right) * 100$
- Acumulación nutrientes en biomasa $\rightarrow Ac_{(P, N)} = (IB_{BS} * \%P, N)$
- Incremento nutrientes $\rightarrow I_{(P, N)} = \text{contenido efluente}_{(P, N)} - \text{cantidad de ingreso}_{(P, N)}$
- Peso biomasa base húmeda $\rightarrow W_{biomasa BH} = \frac{W_{promedio peces} * \text{Número de peces}}{1000}$
- Densidad $\rightarrow \delta = \frac{W_{biomasa BH}}{V_{estanque}} = \frac{Kg}{m^3}$
- Incremento biomasa base húmeda $\rightarrow IB_{BH} = (W_{biomasa final} - W_{biomasa inicial}) * 1000$
- Porcentaje materia seca $\rightarrow \%MS = 100 - \%Hum$
- Incremento biomasa base seca $\rightarrow IB_{BS} = (IB_{BH} * \%MS)$
- g alimento suministrado base húmeda $\rightarrow g(Alimento_{OBH}) = W_{ración} * ración diaria * \#días$

Donde *ración diaria* = número de veces que se le adicionó alimento al estanque.

- g alimento seco \rightarrow
 $g(\text{Alimento}_{BS}) = g(\text{Alimento}_{BH}) - \{g(\text{Alimento}_{BH}) * \%Hum_{alimen}\}$
- g nutrientes adicionados $\rightarrow g(P, N)_{add} = g(\text{Alimento}_{BS}) * \%P, N$
- Contenido afluyente/efluente $\rightarrow g_{aflu/eflu} = \frac{Q * t * C}{1000} = \frac{\left(\frac{L}{s}\right) * S * \left(\frac{mg_{aflu/eflu}}{L}\right)}{\frac{mg}{g}}$
- Incremento SD $\rightarrow I_{SD} = \text{contenido efluente} - \text{cantidad de ingreso}$
- Tasa generación $\rightarrow TG_{af/ef} = \frac{g_{aflu/eflu}}{\left(h_{ensayo} * \frac{W_{biomasa\ promedio}}{1000}\right)} = \frac{g}{h * Ton}$

Donde h_{ensayo} = se refiere a la hora en la que se tomó la medida, dicha toma fue realizada a intervalos de 12h

- Incremento tasa generación $\rightarrow I_{TG} = (TG_{efl} - TG_{afl})$
- Tasa degradación y disolución $\rightarrow T_{D\&D} = (I_{TG} - TB)$

Donde TB = Tasa base $\left(\frac{g}{h * Ton}\right)$, en el caso de sólidos disueltos (SD) es el promedio de lo ocurrido en las primeras 24 horas, proceso debido exclusivamente a los peces.

- Concentración sólidos suspendidos $\rightarrow [SS] = \left(\frac{W_{filtro\ final} - W_{filtro\ inicial}}{0.25\ l}\right) * 1000 = \frac{mg}{L}$
- Cantidad de ingreso de SS al sistema $\rightarrow KI_{SS} = g(\text{Alimento}_{BS}) + g_{aflu}$
- Acumulación $\rightarrow Ac = KI_{SS} - g_{eflu}$
- Tasa de acumulación $\rightarrow T_{Ac} = \frac{Ac}{\frac{W_{biomasa\ promedio}}{1000}} = \frac{g}{Ton}$
- Porcentaje de retención $\rightarrow \%R_{et} = \frac{Ac}{g_{aflu}} * 100$
- Porcentaje de SS que se disuelven $\rightarrow \%SS_{\rightarrow SD} = \left(\frac{I_{SD}}{Ac}\right) * 100$
- Porcentaje de SS acumulado en los peces $\rightarrow \%SS_{Ac \rightarrow pez} = \left(\frac{IB_{BS}}{Ac}\right) * 100$
- SS en el fondo del estanque $\rightarrow SS_{fondo} = Ac - I_{SD} - IB_{BS}$
- Porcentaje acumulado en el fondo $\rightarrow \%Ac_{fondo} = \left(\frac{SS_{fondo}}{Ac}\right) * 100$
- Nutrientes en el fondo del estanque $\rightarrow (P, N)_{fondo} = Ac - I_{(P, N)} - Ac_{(P, N)}$

ANEXO B: Cálculo de las tasas empleadas en el análisis

- Tasa de acumulación: para determinar la tasa de acumulación de sólidos suspendidos totales de la hora 84 se cuenta con la siguiente información: biomasa promedio de 115.68 Kg, ingreso al sistema de 8039 g de SST y carga en el efluente de 2486 g de SST.

Para la acumulación se realiza el balance de masa de SST obteniendo un valor acumulado de 5553 g SST, aplicando la ecuación para la tasa de acumulación T_{Ac} se tiene

$T_{Ac} = \frac{Ac}{h * \frac{W_{biomasa\ promedio}}{1000}}$, donde Ac es el valor acumulado, h la hora de análisis,

$\frac{W_{biomasa\ promedio}}{1000}$ peso biomasa promedio convertido de Kg a Tonelada, por lo que aplicada

la ecuación se tiene que: $T_{Ac} = \frac{Ac}{h * \frac{W_{biomasa\ promedio}}{1000}} = \frac{5553\ g\ SST}{84 * \frac{115.68\ Kg}{1000\ kg}} = 572\ \frac{g\ SST}{h-Ton}$

- Tasa de generación de contaminación disuelta: para la muestra analizada en laboratorio de la hora 132 del Ensayo 1, se tiene que por balance de masa de fósforo disuelto se generaron 16.29 g, para un promedio de biomasa total en el estanque de 115.68 Kg, determinar la tasa de generación de fósforo disuelto.

Para encontrar esta tasa se tiene en cuenta la ecuación $\left(\frac{PT_{dis\ generado} * 1000}{hora}\right) * \left(\frac{1000}{W_{biomasa}}\right)$, donde $PT_{dis\ generado} * 1000$ es el fósforo total disuelto generado convertido de gramos a miligramos, $\left(\frac{1000}{W_{biomasa}}\right)$ peso de biomasa promedio en Tonelada. Por lo tanto se tiene

$$\left(\frac{PT_{dis\ generado} * 1000}{hora}\right) * \left(\frac{1000}{W_{biomasa}}\right) = \left(\frac{16.29 * 1000}{132}\right) * \left(\frac{1000}{115.68}\right) = \frac{1067\ mgP}{h-Ton\ pez}$$

- Tasa de degradación y disolución: medidos los SD para el Ensayo 2, tanto en afluente como en efluente en la hora 24, se determinó que la tasa de generación es de 7750 y 7815 $\frac{g\ SD}{h-Ton}$ respectivamente, presentando un incremento de 65 $\frac{g\ SD}{h-Ton}$, y tasa base promedio de 56 $\frac{g\ SD}{h-Ton}$, por lo tanto por diferencia entre el incremento y la tasa base se tiene que la tasa de degradación y disolución para las primeras 24 horas de funcionamiento del estanque es de 9 $\frac{g\ SD}{h-Ton}$.

- Tasa de crecimiento : Tanto el peso inicial y final de peso de los peces se utilizaron para calcular el la tasa de crecimiento, de la siguiente manera:

$$TC \left(\frac{g}{dia} \right) = \frac{(Wf - Wi)}{t}$$

Donde Wf y Wi son los pesos iniciales y final de los peces respectivamente y el tiempo t son los 15 días de la duración del ensayo.

ANEXO C: Datos de campo obtenidos de cada parámetro en la estación piscícola para cada uno de los Ensayos

Tabla 18. Datos de caudal medidos en campo

HORA	HORA ENSAYO	ENSAYO 1		ENSAYO 2	
		VOLUMEN (L)	TIEMPO (s)	VOLUMEN (L)	TIEMPO (s)
18	0	7	2,89	15	5,53
18	0	7,5	3,04	15	5,62
18	0	7	2,89	17,5	6,59
6	12	18,5	7,93	17	6,15
6	12	18,5	7,96	17	6,17
6	12	18	7,73	16,5	6,12
12	18	18	7,4	16,5	6,26
12	18	17,5	7,37	15,5	5,58
12	18	18	7,5	16	5,61
18	24	16,5	7,5	17	6,12
18	24	16,5	7,1	18	6,32
18	24	18,5	7,8	16	5,79
6	36	18,5	7,97	17	6,31
6	36	20,5	8,63	15	5,61
6	36	19	7,93	17	6,28
12	42	19	7,89	16,5	6,36
12	42	18	7,46	18,5	7,04
12	42	18	7,56	16,5	6,15
18	48	19,5	8,12	18,5	6,8
18	48	18	7,35	16,5	6,06
18	48	18,5	7,58	15,5	5,62
6	60	13	5,77	18	6,72
6	60	13	5,75	16	5,9
6	60	*	*	18	6,46
12	66	13	5,7	18	7,21
12	66	13	5,67	19,5	7,45
12	66	*	*	17	6,4
18	72	18	7,1	16	5,73
18	72	18	7,23	14	5,46
18	72	*	*	15,5	5,67
6	84	16	6,69	17,5	6,42
6	84	17	6,86	17	6,14
6	84	*	*	17	6,31
12	90	14	5,83	17	6,18
12	90	14	5,91	15	5,73
12	90	*	*	15	5,53
18	96	14	5,47	17,5	6,36
18	96	15	5,87	18	6,59
18	96	*	*	17	6,32
6	108	18	7,34	17	6,62
6	108	18,5	7,65	17,5	6,48
6	108	19	8,04	17,5	6,52
12	114	19	7,98	15	5,45
12	114	20	8,23	16	5,78
12	114	19	7,85	15	5,46
18	120	18	7,81	12	4,38
18	120	17,5	7,43	12	4,4
18	120	17,5	7,51	13	4,85
6	132	18	7,98	14	5,25
6	132	18	7,51	13	4,67
6	132	18	7,56	14	5,2
12	138	18	7,42	13	4,68
12	138	17,5	7,36	13	4,75
12	138	17,5	7,61	13	4,79

Continuación Tabla 18.

18	144	17,5	7,21	10,5	3,9
18	144	19	8,26	12	4,24
18	144	18	7,42	12	4,33

Valor atípico o no cuantificado en campo

Tabla 19. Datos de caudal promedio corrido

HORA ENSAYO	HORA TOMA MUESTRA	ENSAYO 1		ENSAYO 2	
		PROMEDIO (L/s)	PROM CORR	PROMEDIO (L/s)	PROM CORR
0	18	2,44	2,44	2,68	2,68
12	6	2,33	2,38	2,74	2,71
24	18	2,30	2,35	2,80	2,74
36	6	2,36	2,36	2,69	2,73
48	18	2,43	2,37	2,73	2,73
60	6	2,26	2,35	2,73	2,73
72	18	2,51	2,38	2,70	2,72
84	6	2,43	2,38	2,73	2,72
96	18	2,56	2,40	2,72	2,72
108	6	2,41	2,40	2,65	2,72
120	18	2,33	2,40	2,72	2,72
132	6	2,34	2,39	2,71	2,72
144	18	2,38	2,39	2,76	2,72

Tabla 20. Datos de temperatura

HORA ENSAYO	HORA TOMA MUESTRA	ENSAYO 1				ENSAYO 2			
		AFL (°C)	EFL (°C)	PROM AFL-EFL	PROM CORR	AFL (°C)	EFL (°C)	PROM AFL-EFL	PROM CORR
0	18	12,9	13	12,95	12,95	12,8	12,9	12,85	12,85
12	6	10,5	10,7	10,6	11,78	10,4	10,5	10,45	11,65
24	18	12,3	12,3	12,3	11,85	12,3	12,5	12,4	11,80
36	6	10,5	10,7	10,6	11,60	10,3	10,4	10,35	11,51
48	18	12,7	12,9	12,8	11,81	12,3	12,3	12,3	11,62
60	6	10,8	10,7	10,75	11,68	10,2	10	10,1	11,43
72	18	13,1	12,6	12,85	11,85	12	12,2	12,1	11,48
84	6	10,9	11,1	11	11,77	11,2	11,4	11,3	11,46
96	18	12,2	12,3	12,25	11,79	12,4	12,5	12,45	11,60
108	6	10,9	10,9	10,9	11,73	10,5	10,8	10,65	11,54
120	18	12,2	12,3	12,25	11,78	11,9	12	11,95	11,56
132	6	10,9	11	10,95	11,73	9,5	9,5	9,5	11,44
144	18	11,5	12,2	11,85	11,76	12,8	12,6	12,7	11,52

Tabla 21. Datos de potencial de hidrógeno

HORA ENSAYO	HORA TOMA MUESTRA	ENSAYO 1		ENSAYO 2	
		AFL	EFL	AFL	EFL
0	18	7,4	7,2	6,5	6,5
12	6	7,4	7,5	6,9	7,1
24	18	7,4	7,5	7	7,2
36	6	7,5	7,5	7,7	7,2
48	18	7,5	7,4	7	7,1
60	6	7,3	7,5	7,3	6,9
72	18	7,6	7,5	7,1	7
84	6	7,2	7,4	7,3	7,1
96	18	7,6	7,5	6,8	7
108	6	7,9	7,2	7,51	7,4
120	18	7,7	7,5	6,7	6,9
132	6	7,4	7,7	7	6,9
144	18	8,2	7	6,6	6,8

Tabla 22. Datos de sólidos disueltos

HORA ENSAYO	HORA TOMA MUESTRA	ENSAYO 1		ENSAYO 2	
		PROMEDIO CORRIDO AFL(mg/L)	PROMEDIO CORRIDO EFL(mg/L)	PROMEDIO CORRIDO AFL(mg/L)	PROMEDIO CORRIDO EFL(mg/L)
0	18	76,90	77,80	89,30	90,10
12	6	77,70	78,20	89,60	90,20
24	18	77,85	78,55	89,38	90,13
36	6	78,04	78,80	89,24	90,04
48	18	78,10	79,07	89,17	90,03
60	6	78,24	79,23	89,30	90,16
72	18	78,24	79,24	89,30	90,25
84	6	78,31	79,31	89,30	90,19
96	18	77,83	79,15	89,25	90,33
108	6	77,61	78,99	88,55	89,63
120	18	77,38	78,77	87,83	88,91
132	6	76,81	78,14	87,59	88,70
144	18	76,44	77,69	87,24	88,34

Tabla 23. Datos de oxígeno disuelto

HORA ENSAYO	HORA TOMA MUESTRA	Ensayo 1				Ensayo 2			
		Entrada (mg/L) Promedio Corrido	Inicio (mg/L) Promedio Corrido	Intermedio (mg/L) Promedio Corrido	Final (mg/L) Promedio Corrido	Entrada (mg/L) Promedio Corrido	Inicio (mg/L) Promedio Corrido	Intermedio (mg/L) Promedio Corrido	Final (mg/L) Promedio Corrido
0	18	7,76	7,19	5,62	4,82	7,67	7,64	5,68	4,93
12	6	8,01	7,55	6,11	5,46	8,08	7,85	6,31	5,66
24	18	7,97	7,64	6,09	5,35	8,03	7,83	6,24	5,61
36	6	8,06	7,66	6,12	5,38	8,10	7,84	6,40	5,80
48	18	8,01	7,51	6,00	5,27	8,06	7,77	6,34	5,72
60	6	8,05	7,55	6,05	5,35	8,11	7,82	6,44	5,80
72	18	8,01	7,57	6,06	5,33	8,09	7,83	6,40	5,73
84	6	8,03	7,62	6,12	5,39	8,10	7,83	6,42	5,75
96	18	8,03	7,64	6,10	5,37	8,07	7,75	6,25	5,64
108	6	8,05	7,66	6,10	5,36	8,09	7,74	6,22	5,63
120	18	8,04	7,66	6,12	5,31	8,09	7,74	6,20	5,61
132	6	8,05	7,66	6,11	5,31	8,11	7,77	6,23	5,64
144	18	8,05	7,66	6,08	5,27	8,09	7,71	6,15	5,58

ANEXO D: Datos laboratorio para los parámetros estudiados en el objetivo 1

Tabla 24. Datos de sólidos suspendidos

HORA ENSAYO	HORA TOMA MUESTRA	ENSAYO 1		ENSAYO 2	
		PROMEDIO CORRIDO AFL (mg/L)	PROMEDIO CORRIDO EFL(mg/L)	PROMEDIO CORRIDO AFL(mg/L)	PROMEDIO CORRIDO EFL(mg/L)
0	18	0,40	1,20	1,60	2,80
12	6	0,60	0,80	1,60	2,40
24	18	1,07	2,40	2,80	3,07
36	6	2,30	3,40	3,70	3,00
48	18	2,08	3,36	3,36	3,12
60	6	2,33	3,47	3,67	3,07
72	18	2,34	3,37	3,66	2,97
84	6	2,55	3,45	4,00	4,00
96	18	2,93	3,64	3,91	3,96
108	6	3,20	3,76	4,60	4,52
120	18	3,24	3,96	4,55	4,22
132	6	3,63	3,90	4,37	4,10
144	18	3,72	4,18	4,28	4,12

Tabla 25. Datos de nitrógeno total fracción suspendida y disuelta

HORA ENSAYO	HORA TOMA MUESTRA	ENSAYO 1 (Fracción suspendida)		ENSAYO 1 (Fracción disuelta)		ENSAYO 2 (Fracción suspendida)		ENSAYO 2 (Fracción disuelta)	
		PROM CORR AFL (mg/L)	PROM CORR EFL (mg/L)	PROM CORR AFL (mg/L)	PROM CORR EFL (mg/L)	PROM CORR AFL (mg/L)	PROM CORR EFL (mg/L)	PROM CORR AFL (mg/L)	PROM CORR EFL (mg/L)
0	18	0,065	0,106	0,056	0,092	0,273	0,154	0,046	0,107
12	6	0,046	0,125	0,028	0,114	0,149	0,221	0,033	0,160
24	18	0,127	0,179	0,036	0,154	0,172	0,289	0,083	0,233
36	6	0,107	0,198	0,027	0,177	0,181	0,312	0,076	0,257
48	18	0,104	0,202	0,038	0,183	0,237	0,351	0,142	0,304
60	6	0,095	0,197	0,039	0,181	0,245	0,376	0,157	0,318
72	18	0,098	0,199	0,034	0,182	0,217	0,375	0,134	0,318
84	6	0,094	0,209	0,035	0,185	0,245	0,405	0,171	0,336
96	18	0,118	0,225	0,063	0,204	0,238	0,393	0,155	0,332
108	6	0,135	0,251	0,081	0,229	0,223	0,402	0,140	0,345
120	18	0,138	0,263	0,087	0,238	0,224	0,412	0,145	0,337
132	6	0,151	0,278	0,098	0,250	0,224	0,438	0,142	0,346
144	18	0,154	0,296	0,099	0,261	0,225	0,441	0,144	0,348

Tabla 26. Datos de nitrógeno amoniacal

HORA ENSAYO	HORA TOMA MUESTRA	ENSAYO 1		ENSAYO 2	
		PROMEDIO CORRIDO AFL (mg/L)	PROMEDIO CORRIDO EFL(mg/L)	PROMEDIO CORRIDO AFL(mg/L)	PROMEDIO CORRIDO EFL(mg/L)
0	18	0,044	0,082	0,002	0,059
12	6	0,022	0,104	0,001	0,066
24	18	0,020	0,121	0,004	0,085
36	6	0,020	0,141	0,007	0,091
48	18	0,020	0,148	0,006	0,107
60	6	0,016	0,152	0,005	0,118
72	18	0,016	0,154	0,005	0,135
84	6	0,016	0,149	0,006	0,148
96	18	0,017	0,142	0,012	0,163
108	6	0,016	0,148	0,018	0,178
120	18	0,016	0,153	0,017	0,182
132	6	0,016	0,156	0,017	0,181
144	18	0,015	0,156	0,016	0,181

Tabla 27. Datos fósforo total fracción suspendida y disuelta

HORA ENSAYO	HORA TOMA MUESTRA	ENSAYO 1 (Fracción Suspendida)		ENSAYO 1 (Fracción Disuelta)		ENSAYO 2 (Fracción suspendida)		ENSAYO 2 (Fracción Disuelta)	
		PROM CORR AFL (mg/L)	PROM CORR EFL (mg/L)	PROM CORR AFL (mg/L)	PROM CORR EFL (mg/L)	PROM CORR AFL (mg/L)	PROM CORR EFL (mg/L)	PROM CORR AFL (mg/L)	PROM CORR EFL (mg/L)
0	18	0,099	0,082	0,079	0,072	0,107	0,110	0,096	0,091
12	6	0,100	0,087	0,077	0,071	0,110	0,113	0,090	0,097
24	18	0,106	0,088	0,069	0,064	0,094	0,109	0,076	0,089
36	6	0,097	0,086	0,068	0,068	0,087	0,099	0,070	0,081
48	18	0,093	0,086	0,068	0,071	0,126	0,141	0,109	0,121
60	6	0,090	0,087	0,069	0,074	0,151	0,165	0,137	0,147
72	18	0,099	0,101	0,079	0,088	0,170	0,185	0,154	0,166
84	6	0,106	0,112	0,088	0,099	0,184	0,204	0,168	0,183
96	18	0,105	0,111	0,085	0,098	0,175	0,199	0,158	0,177
108	6	0,104	0,111	0,084	0,098	0,172	0,195	0,151	0,170
120	18	0,113	0,119	0,093	0,108	0,165	0,189	0,144	0,165
132	6	0,120	0,126	0,101	0,115	0,160	0,184	0,140	0,161
144	18	0,117	0,130	0,098	0,116	0,155	0,177	0,133	0,154

ANEXO E: Curvas de calibración para el fósforo total, nitrógeno total y amoniacal.

Figura 35. Curva de calibración para nitrógeno total y amoniacal ensayo 1

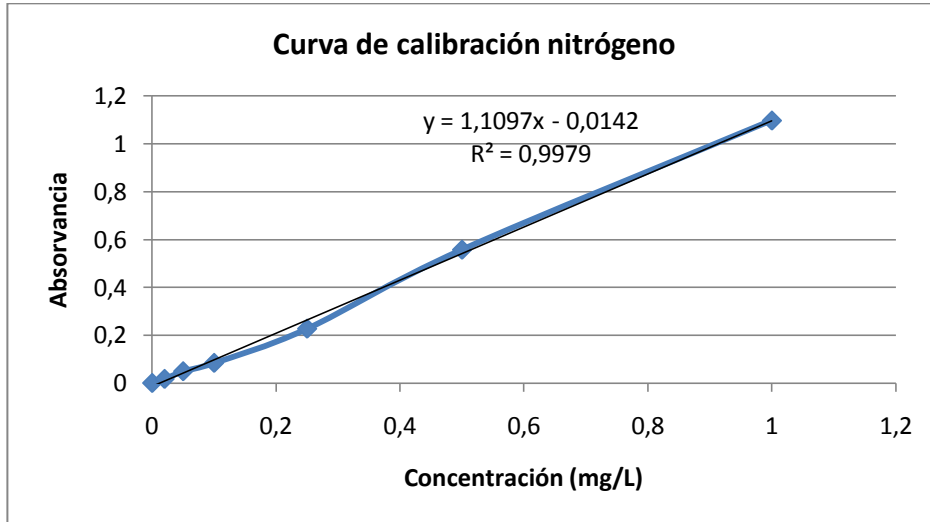


Figura 36. Curva de calibración fósforo total ensayo 1

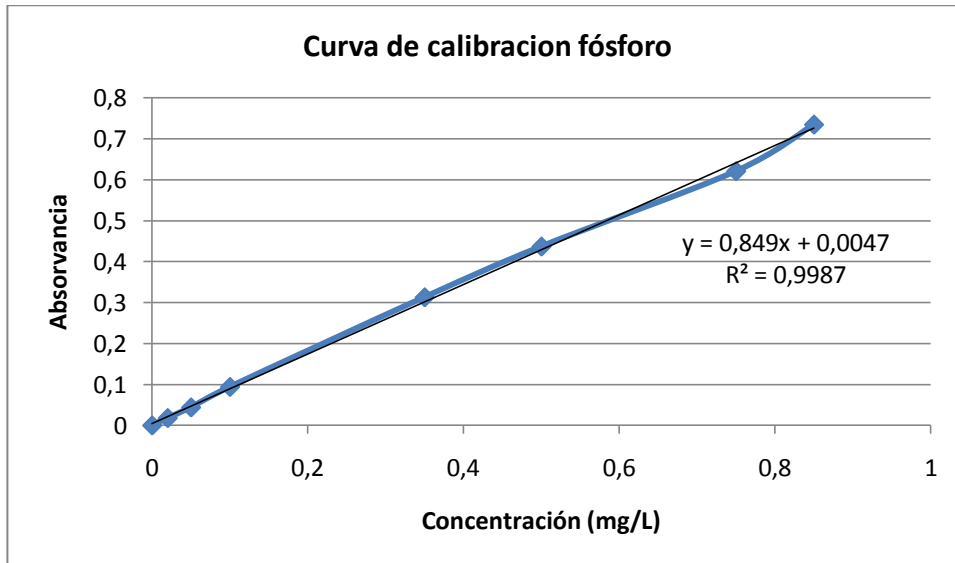


Figura 37. Curva de calibración nitrógeno total y amoniacal ensayo 2

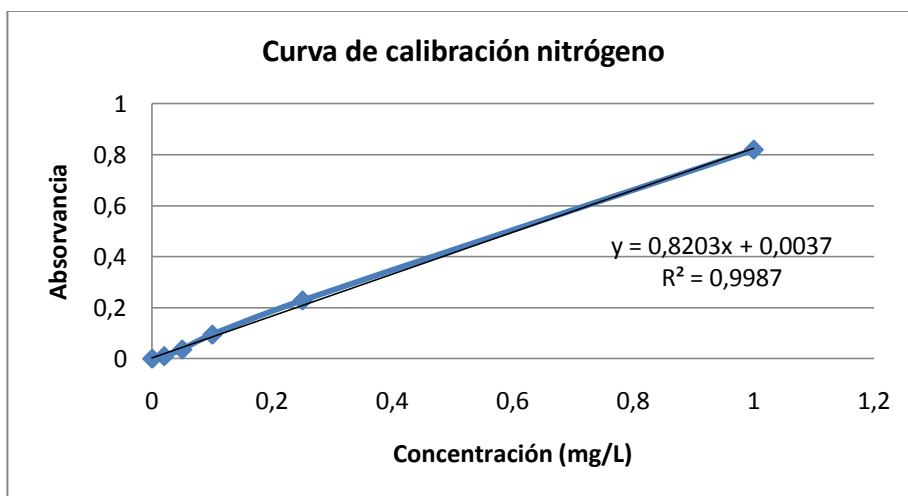
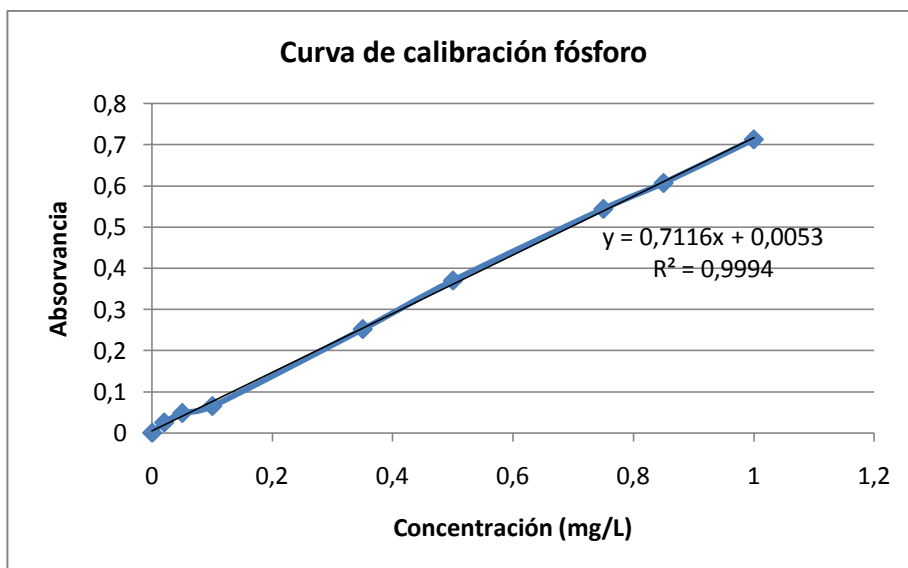


Figura 38. Curva de calibración fósforo total ensayo 2



ANEXO F: Datos de campo obtenidos de cada parámetro en la estación piscícola para el objetivo 2

Tabla 28. Datos de caudal

DIA	Caudal 100%	Caudal 90%	Caudal 85%	Caudal 80%
	Q (L/s)	QI (L/s)	Q (L/s)	Q (L/s)
0	2,44	2,79	3,50	3,98
3	2,34	2,79	3,51	3,72
6	2,37	2,93	3,52	3,75
9	2,40	2,81	3,54	3,72
12	2,37	2,79	3,45	3,77
15	2,44	2,80	3,48	3,71

Tabla 29. Datos de temperatura

DIA	Caudal 100%		Caudal 90%		Caudal 85%		Caudal 80%	
	AFL (°C)	EFL (°C)	AFL (°C)	EFL (°C)	AFL (°C)	EFL (°C)	AFL (°C)	EFL (°C)
0	12,9	13	12	12,6	11,1	12,3	12,4	12,2
3	12,3	12,2	11,9	11,9	11,2	11	10,7	10,5
6	12,5	12,2	10,9	10,5	11,6	11,7	10,8	10,8
9	12,9	13,3	11,4	11,4	11,7	11,5	10,7	10,5
12	12,5	12,4	11,3	12	11,3	11,2	12,1	12
15	11,9	11,5	11,6	11	10,8	10,7	13	12,8

Tabla 30. Datos de potencial de hidrógeno

DIA	Caudal 100%		Caudal 90%		Caudal 85%		Caudal 80%	
	AFL	EFL	AFL	EFL	AFL	EFL	AFL	EFL
0	7,4	7,2	8,3	8,1	6	7,2	8,1	7,8
3	7,8	7,6	7,2	7,1	8,1	7,4	7,6	7,9
6	8,3	7	7,2	7,2	7,1	7,3	8,3	8,1
9	7,5	7,9	7,3	7,5	8	7,8	8,3	8,1
12	7,7	7,5	7,7	7,8	7,7	7,3	8,3	8,5
15	7,4	6,7	7,8	7,1	8,1	7,8	7,8	7,7

Tabla 31. Datos de sólidos disueltos

DIA	Caudal 100%		Caudal 90%		Caudal 85%		Caudal 80%	
	AFL (mg/L)	EFL (mg/L)	AFL (mg/L)	EFL (mg/L)	AFL (mg/L)	EFL (mg/L)	AFL (mg/L)	EFL (mg/L)
0	78,9	77,8	80,4	79,6	74,2	75,6	79,6	81,5
3	78,5	78,9	75,7	74,3	59,3	60,3	82,6	84,6
6	74,2	75	63,3	68,2	78	78,6	84,3	85
9	49,3	67,5	77,7	76,5	77,6	79,3	83,2	84,5
12	75,1	76,2	69,6	70,9	79,7	80,3	85,7	86,6
15	70,3	70,7	74,2	75,4	80,3	81,7	84	86

Tabla 32. Datos de oxígeno disuelto

DIA	Caudal 100%				Caudal 90%				Caudal 85%				Caudal 80%			
	Entrada (mg/L)	Inicio (mg/L)	Inter-medio (mg/L)	Final (mg/L)	Entrada (mg/L)	Inicio (mg/L)	Inter-medio (mg/L)	Final (mg/L)	Entrada (mg/L)	Inicio (mg/L)	Inter-medio (mg/L)	Final (mg/L)	Entrada (mg/L)	Inicio (mg/L)	Inter-medio (mg/L)	Final (mg/L)
0	7,76	7,19	5,62	4,82	8,01	7,76	7,00	6,30	8,04	7,70	5,94	5,36	8,06	8,00	5,96	4,97
3	7,93	7,65	5,73	5,26	8,01	7,98	6,12	5,82	8,2	8,01	5,27	4,71	8,35	8,31	6,23	5,73
6	7,97	7,47	5,43	4,35	8,37	8,33	6,56	5,91	7,99	7,79	5,61	4,68	8,37	8,31	6,17	5,82
9	7,77	7,75	6,28	4,74	8,12	7,60	5,05	4,61	8,02	7,65	5,66	5,81	8,13	8,07	5,98	6,07
12	7,91	7,76	5,61	4,96	7,98	6,94	4,79	4,76	8,28	8,12	6,79	6,60	7,87	7,76	5,48	5,50
15	8	6,72	4,92	4,63	8,04	7,29	5,40	4,72	8,13	8,00	5,85	5,55	7,97	7,69	5,55	5,07

ANEXO G: Datos laboratorio para los parámetros estudiados en el objetivo 2

Tabla 33. Datos de sólidos suspendidos

DIA	Caudal 100%		Caudal 90%		Caudal 85%		Caudal 80%	
	AFL (mg/L)	EFL (mg/L)	AFL (mg/L)	EFL (mg/L)	AFL (mg/L)	EFL (mg/L)	AFL (mg/L)	EFL (mg/L)
0	0,4	1,2	59,6	28,4	4,8	4	2	3,2
3	1,2	2,4	5,2	4,4	10,4	15,2	8	1,6
6	4,8	9,2	1,2	4,8	3,2	6	9,6	1,2
9	55,2	9,6	4,4	3,6	2,4	3,6	5,6	3,6
12	1,6	2,4	6,8	4	4,4	3,2	1,2	0,8
15	2	4	4	3,2	1,6	1,6	5,2	2,8

Tabla 34. Datos de nitrógeno total fracción total

DIA	Caudal 100%		Caudal 90%		Caudal 85%		Caudal 80%	
	AFL (mg/L)	EFL (mg/L)	AFL (mg/L)	EFL (mg/L)	AFL (mg/L)	EFL (mg/L)	AFL (mg/L)	EFL (mg/L)
0	0,1399	0,1553	0,3384	0,2552	0,0604	0,1272	0,0414	0,0486
3	0,0480	0,1309	0,0201	0,0734	0,1607	0,2212	0,1995	0,2104
6	0,0922	0,2518	0,1069	0,1747	0,0369	0,1345	0,1146	0,0658
9	0,2923	0,3095	0,2615	0,3727	0,0043	0,0152	0,0034	0,1327
12	0,0110	0,0897	0,0179	0,0730	0,1182	0,1191	0,1516	0,1905
15	0,0237	0,1557	0,0658	0,2520	0,0775	0,2447	0,0125	0,0459

Tabla 35. Datos de nitrógeno amoniacal

DIA	Caudal 100%		Caudal 90%		Caudal 85%		Caudal 80%	
	AFL (mg/L)	EFL (mg/L)	AFL (mg/L)	EFL (mg/L)	AFL (mg/L)	EFL (mg/L)	AFL (mg/L)	EFL (mg/L)
0	0,0444	0,1255	0,0617	0,143	0,0251	0,1616	0,0821	0,1516
3	0,0182	0,1931	0,0128	0,083	0,0369	0,1453	0,0351	0,2429
6	0,0128	0,1580	0,0526	0,121	0,0287	0,2348	0,1065	0,1462
9	0,0408	0,1886	0,0825	0,231	0,0486	0,1363	0,0360	0,1535
12	0,0273	0,1394	0,1254	0,130	0,0604	0,0405	0,0459	0,0757
15	0,0671	0,2073	0,0432	0,239	0,1354	0,1336	0,0450	0,1498

Tabla 36. Datos fósforo total fracción total

DIA	Caudal 100%		Caudal 90%		Caudal 85%		Caudal 80%	
	AFL (mg/L)	EFL (mg/L)	AFL (mg/L)	EFL (mg/L)	AFL (mg/L)	EFL (mg/L)	AFL (mg/L)	EFL (mg/L)
0	0,0981	0,0816	0,2948	0,1829	0,0510	0,0781	0,1405	0,1087
3	0,1641	0,1865	0,0616	0,0722	0,1158	0,1759	0,1841	0,1134
6	0,0804	0,1865	0,1629	0,1841	0,0687	0,1441	0,1040	0,1299
9	0,1229	0,2642	0,0840	0,1146	0,0781	0,1064	0,0698	0,1087
12	0,0793	0,1276	0,0640	0,1158	0,0828	0,0769	0,0628	0,0710
15	0,0981	0,1229	0,0722	0,1111	0,0710	0,1064	0,0816	0,1205

ANEXO H. Resultados de la prueba de normalidad

Tabla 37. Prueba de normalidad de temperatura

		Shapiro – Wilk (Sig.)
Ensayo 1	T° Afluente	0,206
	T° Efluente	0,115
Ensayo 2	T° Afluente	0,245
	T° Efluente	0,380

Tabla 38. Prueba de normalidad de potencial de hidrógeno

		Shapiro – Wilk (Sig.)
Ensayo 1	pH Afluente	0,171
	pH Efluente	0,046
Ensayo 2	pH Afluente	0,577
	pH Efluente	0,626

ANEXO I: Gráficas utilizadas para el análisis del segundo objetivo.

Figura 39. Gráfica consumo de oxígeno por la trucha arcoíris, en mg Kg^{-1} de peso hora $^{-1}$, en temperaturas comprendidas entre 5 y 20°C y de 1 a 1000 gramos de peso. Fuente: Blanco (1995).

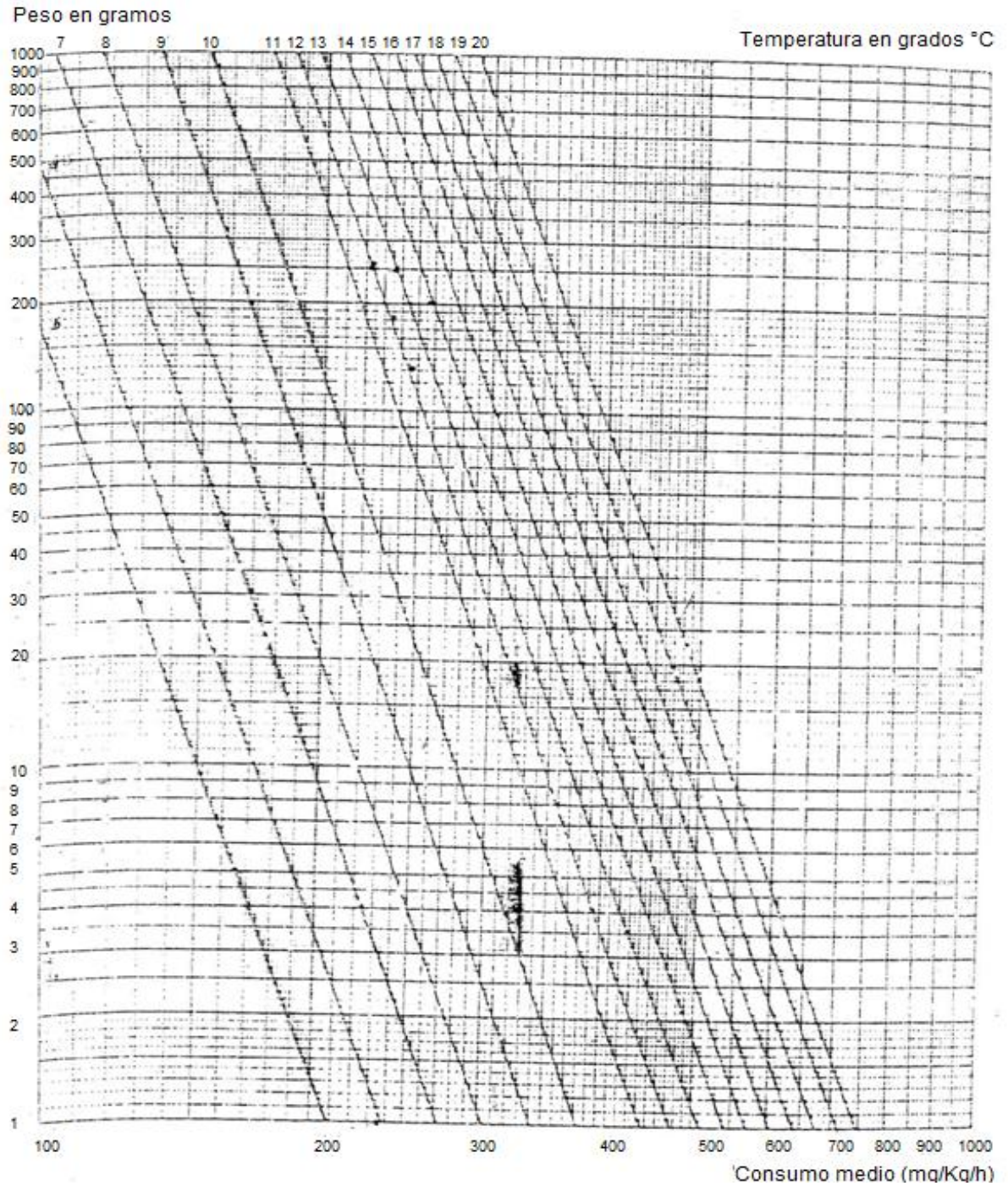


Figura 40. Curva de crecimiento teórico a temperatura constante de 11 °C, en un tiempo de 20 meses y de 0 y 200 gramos de peso. Fuente : Blanco (1995).

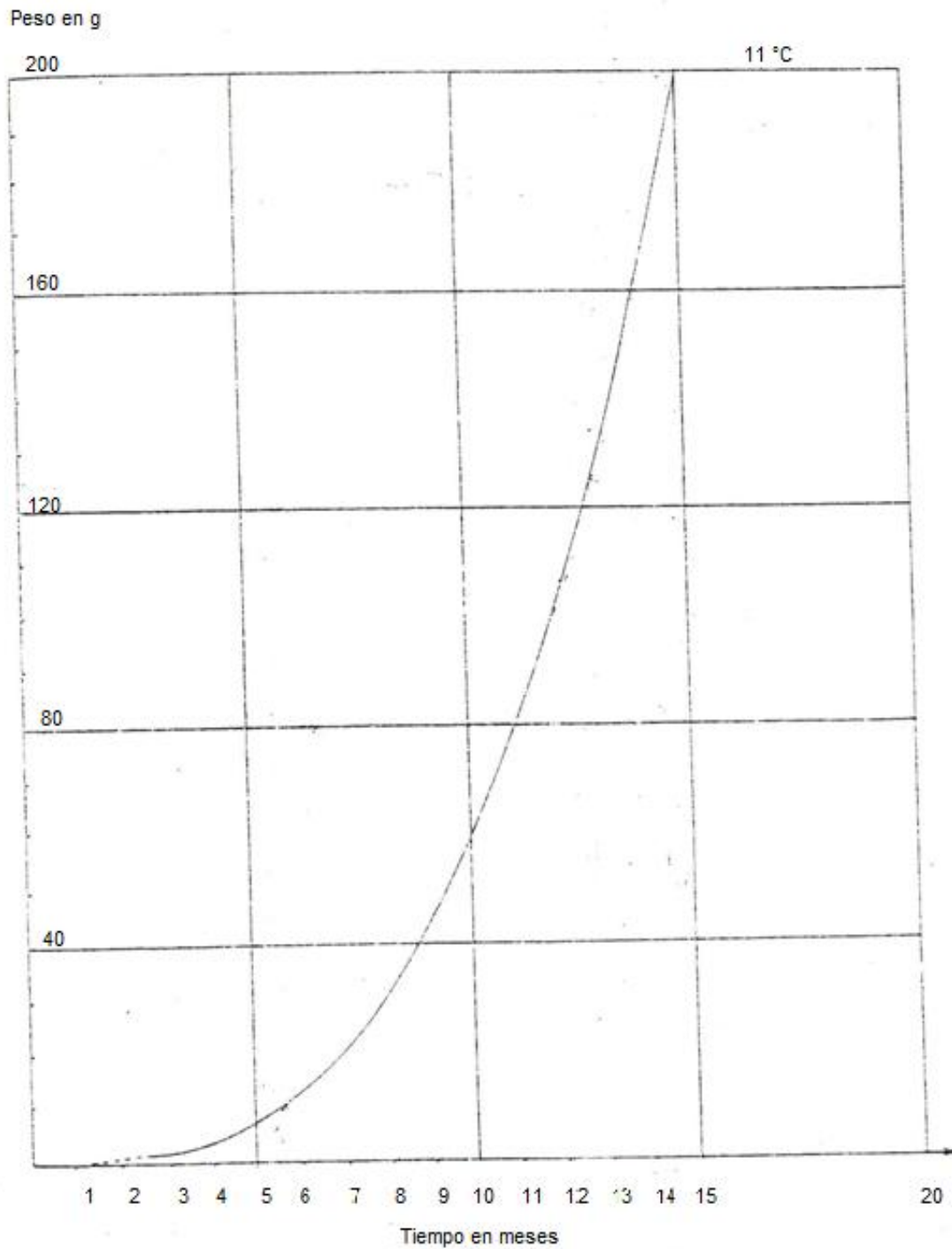


Gráfico 7.15 Curva de crecimiento teórico a temperatura constante de 11 °C

ANEXO J: Fotos estación piscícola Chiliglo y estanque modificado.



Foto 1. Estanque modificado



Foto 2. Estanque modificado con polisombra

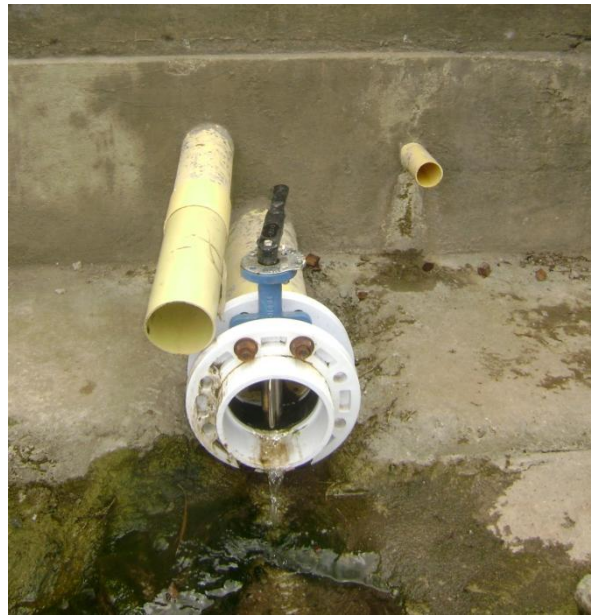


Foto 3. Válvula de extracción de lodos