

**ESTUDIO COMPARATIVO DE TRATABILIDAD DE EFLUENTES  
PISCÍCOLAS MEDIANTE LAGUNAS DUCKWEED (*Spirodela polyrrhiza*) Y  
HELECHO DE AGUA (*Azolla pinnata*)**



AMADA LIDA ALOMÍA BRAVO  
SANDRA LILIANA BAZÁN OROBIO

UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
POPAYÁN  
2009

**ESTUDIO COMPARATIVO DE TRATABILIDAD DE EFLUENTES  
PISCÍCOLAS MEDIANTE LAGUNAS DUCKWEED (*Spirodela polyrrhiza*) Y  
HELECHO DE AGUA (*Azolla pinnata*)**

AMADA LIDA ALOMÍA BRAVO  
SANDRA LILIANA BAZÁN OROBIO

Trabajo de grado  
para optar al título de  
Ingeniera Ambiental

Director del trabajo  
Ing. Guillermo Chaux Figueroa

UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
POPAYÁN  
2009

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del director

Popayán 06-07-2009

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por llenarnos de su sabiduría para interpretar los hallazgos y poder desarrollar satisfactoriamente el proyecto.

Al Ingeniero Guillermo Chaux Figueroa por la dirección del proyecto.

Al Centro Regional de Producción e Innovación del Cauca (CREPIC) y Universidad del Cauca por la financiación del proyecto.

Al Ingeniero Carlos César Cabezas Córdoba y al Bioestadista Silvio Carvajal por su colaboración.

A Nury Esperanza Pinto por su colaboración en el laboratorio.

A Robinson Astudillo propietario de la piscícola.

Finalmente, a todas las personas que de una u otra manera contribuyeron con el desarrollo de este proyecto.

## DEDICATORIA

*Este proyecto de grado es el compendio de cinco años de arduo trabajo e incansable dedicación para lograr este nivel en la formación superior, lo dedico a todas las personas que me ayudaron en este proceso de aprendizaje, en especial, a mis padres Nubia Bravo Quiñones y Solón Alomía Portocarrero, a mis hermanos Ana Sugey Alomía Bravo y Tomás De Aquino Alomía Bravo, y a mis sobrinos Laila María Bravo Quiñones, Andrés Julian Alomía Bravo, Merully Andrea Bravo Quiñones, Ricardo Solón Jurado Alomía, Nicole Jurado Alomía y Amy Valeria Alomía Castillo a quienes espero sirva de motivación.*

*AMADA LIDA ALOMÍA BRAVO*

*Haber logrado una meta más en mi vida es motivo de fiesta, ha sido la suma de muchos esfuerzos y dedicación que me permite seguir luchando por lograr mis sueños. Este triunfo se lo dedico a mis padres Maximiliano Bazán y Amalia Orobio quienes siempre estuvieron de manera incondicional apoyándome, por ser ejemplo de familia y por tener un propósito con sus hijos. A mis hermanos Gerardo Bazán Orobio, Josué Bazán Orobio, Alirio Bazán Orobio, Rigoberto Bazán Orobio, Máximo Bazán Orobio, James Pedro Bazán Orobio, Yenny Bazán Orobio, Cristian Bazán Orobio, Alex Fernán Bazán Orobio y Jhoan Albeiro Bazán Orobio, por su apoyo durante este proceso. A mis sobrinos por sus ideas. A todas aquellas personas que de una u otra manera contribuyeron en la culminación de mis estudios y participaron en el desarrollo de este trabajo. A todos ellos mil y mil gracias.*

*SANDRA LILIANA BAZÁN OROBIO*

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	13
1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	15
2 JUSTIFICACIÓN.....	17
3 OBJETIVOS.....	18
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	18
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
4 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	19
4.1 PISCICULTURA .....	19
4.1.1 CLASIFICACIÓN.....	20
4.1.2 PROCESO PRODUCTIVO .....	20
4.2 CALIDAD DEL AGUA PARA EL CULTIVO DE TILAPIA .....	21
4.3 POSIBLES CONTAMINANTES GENERADOS .....	22
4.4 ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO .....	22
4.5 PLANTAS ACUÁTICAS.....	23
4.6 LAGUNAS DUCKWEED.....	24
4.7 AZOLLA.....	27
5 METODOLOGÍA.....	30
5.1 GENERALIDADES SITIO DE ESTUDIO .....	30
5.2 CARACTERIZACIÓN DEL EFLUENTE .....	31
5.2.1 Análisis estadístico.....	31
5.3 ADAPTACIÓN DE DUCKWEED Y AZOLLA A LAS CONDICIONES AMBIENTALES DEL EFLUENTE DE TILAPIA ROJA EN LA ESTACIÓN PISCÍCOLA LA YUNGA .....	32

5.4	DESEMPEÑO DUCKWEED Y AZOLLA EN LA TRATABILIDAD DEL EFLUENTE DE TILAPIA ROJA EN LA ESTACIÓN PISCÍCOLA LA YUNGA	34
6	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
6.1	CARACTERIZACIÓN EFLUENTE	35
6.1.1	Temperatura	35
6.1.2	pH	36
6.1.3	Oxígeno Disuelto	37
6.1.4	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> ) y Demanda Química de Oxígeno (DQO)	38
6.1.5	Sólidos Suspendidos Totales	41
6.1.6	Alcalinidad	42
6.1.7	Nitrógeno	43
6.1.8	Fósforo	45
6.2	CRECIMIENTO Y ADAPTACIÓN DE DUCKWEED Y AZOLLA A LAS CONDICIONES AMBIENTALES DEL EFLUENTE DE TILAPIA ROJA EN LA ESTACIÓN PISCÍCOLA LA YUNGA	46
6.3	DESEMPEÑO DUCKWEED Y AZOLLA EN LA TRATABILIDAD DEL EFLUENTE DE TILAPIA ROJA EN LA ESTACIÓN PISCÍCOLA LA YUNGA	55
7	CONCLUSIONES	59
8	RECOMENDACIONES	59
	BIBLIOGRAFÍA	61
	ANEXOS	68

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Calidad del agua para el cultivo de tilapia .....	21
Tabla 2. Rango de contenido de nutrientes en aguas donde duckweed ha sido encontrada (todas las cantidades en mg/L, excepto la conductividad en $\mu\text{S}/\text{cm}$ adaptado de Landolt, 1986). .....	25
Tabla 3. Parámetros de medición para la caracterización del efluente en la estación piscícola la Yunga.....	31
Tabla 4. Resumen parámetros del efluente en la estación piscícola la Yunga, etapas levante y engorde.....	35
Tabla 5. Resumen parámetros del efluente en la estación piscícola la Yunga, evento cosecha.....	35
Tabla 6. Peso de la semilla de azolla y duckweed a través del tiempo.....	48
Tabla 7. Tasa relativa de crecimiento (TRC) duckweed (D) y azolla (A).....	49
Tabla 8. Comparación tasa relativa de crecimiento por día .....	50
Tabla 9. Comparación tasa relativa de crecimiento por día según la densidad inicial de siembra .....	51
Tabla 10. Parámetros fisicoquímicos evaluados en el tratamiento del efluente piscícola mediante duckweed y azolla. ....	56
Tabla 11. Eficiencias de remoción de duckweed y azolla .....	56



## LISTA DE FIGURAS

pág.

Figura 1. Ubicación planta piloto estación piscícola la Yunga. ....	30	
Figura 2. Variación temperatura hídrica (T) .....	36	
Figura 3. Variación de pH .....	37	
Figura 4. Curva de mejor ajuste oxígeno disuelto (O.D) .....	38	
Figura 5. Variación demanda bioquímica de oxígeno (DBO <sub>5</sub> ).....	39	
Figura 6. Curva de mejor ajuste demanda química de oxígeno (DQO) .....	39	
Figura 7. Variación demanda química de oxígeno.....	40	
Figura 8. Comparación DBO <sub>5</sub> y DQO etapa de levante-engorde y cosecha.....	40	
Figura 9. Curva tendencia sólidos suspendidos totales (SST).....	42	
Figura 10. Variación alcalinidad total (ALC T).....	43	
Figura 11. Curva de mejor ajuste nitrógeno amoniacal (NH <sub>3</sub> -N)	Figura 12. Curva de mejor ajuste nitrógeno total (NT) .....	44
Figura 13. Variación fósforo total (PT) .....	45	
Figura 14. Comportamiento del peso de azolla a través del tiempo .....	48	
Figura 15. Comportamiento del peso de duckweed a través del tiempo.....	49	
Figura 16. Comparación de la TRC de Azolla por día.....	50	
Figura 17. Comparación de la TRC de Duckweed por día.....	51	
Figura 18. Comparación densidad inicial de siembra de azolla por días. ....	52	
Figura 19. Comparación densidad inicial de siembra de duckweed por días. ..	52	

## LISTA DE FOTOS

	pág.
Foto 1. Tilapia Roja ( <i>Oreochromis</i> spp).....	19
Foto 2. Duckweed ( <i>Spirodela polyrrhiza</i> ).....	24
Foto 3. Azolla pinnata.....	27
Foto 4. Montaje sistema batch escala laboratorio.....	33
Foto 5. Ubicación sistema batch escala laboratorio en las instalaciones del bioterio-Universidad del Cauca.....	33
Foto 6. Cubrimiento de los tanques con polisombra.....	34
Foto 7. Comparación duckweed.....	46
Foto 8. Coloración duckweed descubierta.....	47
Foto 9. Comparación azolla.....	47
Foto 10. Readecuación planta piloto.....	53
Foto 11. Apariencia duckweed después de cubrir.....	54
Foto 12. Apariencia azolla en la planta piloto la Yunga.....	55
Foto 13. Apariencia duckweed en la planta piloto la Yunga.....	55

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Metodologías utilizadas para la caracterización del agua .....	69
Anexo B. Caracterización del efluente en la estación piscícola la Yunga .....	70
Anexo C. Datos de campo .....	71
Anexo D. Datos demanda bioquímica de oxígeno .....	72
Anexo E. Datos demanda química de oxígeno .....	73
Anexo F. Datos fósforo .....	74
Anexo G. Datos nitrógeno.....	75
Anexo H. Datos alcalinidad.....	76
Anexo I. Datos sólidos suspendidos totales.....	77
Anexo J. Datos evento cosecha.....	78
Anexo K. Datos desempeño duckweed y azolla .....	80
Anexo L. Cálculo ejemplo parámetros fisicoquímicos.....	83
Anexo M. Cálculo ejemplo de la tasa relativa de crecimiento (TRC) de duckweed.....	85
Anexo N. Análisis estadístico.....	86
Anexo O. Estrés térmico presentado por duckweed .....	93
Anexo P. Fuente abastecimiento, quebrada “Agua sucia” .....	94
Anexo Q. Evento cosecha .....	95
Anexo R. Construcción planta piloto estación piscícola la Yunga.....	96

## RESUMEN

Este estudio se realizó en la estación piscícola "La Yunga "-Cauca, productora de tilapia roja. Durante todo el periodo de observación (Octubre de 2008 a Marzo de 2009), duckweed (*Spirodela polyrrhiza*) presentó baja adaptabilidad y mínimo crecimiento debido principalmente a la intensidad solar y escasez de nutrientes en el efluente piscícola, por lo que se procedió a comparar la tratabilidad del efluente con otra planta acuática (*Azolla pinnata*), la cual presentó mejores condiciones de adaptación y crecimiento en dicho líquido. Se caracterizó el estado inicial del efluente y se catalogó de mala calidad para el vertimiento sobre un cuerpo receptor y destinación del recurso para consumo humano y doméstico (DBO 10.77 mg/L, DQO 66.13 mg/L y SST 56.83 mg/L).

Se evaluó la eficiencia de remoción de contaminantes en el efluente de la estación piscícola mediante tres lagunas, utilizando duckweed y azolla cubiertas con polisombra y azolla descubierta. La valoración se realizó en un sistema continuo con un tiempo de retención de 12 horas y en un sistema batch con un tiempo de retención de 7 días. Se encontró que azolla fija nitrógeno y duckweed a pesar de su potencial de remoción no se adaptó a las características del efluente. Se determinó que el efluente tratado es apto para ser recirculado en el cultivo de tilapia, sin embargo todavía no cumple con los estándares de calidad para vertimiento según el decreto 1594 de 1984 y potabilización según la norma RAS 2000. De acuerdo con la adaptabilidad de duckweed en el efluente de tilapia roja, durante el estudio no se recomienda su uso para el tratamiento de éste efluente.

## INTRODUCCIÓN

La acuicultura y la pesca artesanal presentan un gran aporte a la alimentación mundial y comunitaria, contribuyendo a la reducción de la pobreza y la inseguridad alimentaria, reflejados en el hambre y la malnutrición, al aportar bienestar nutricional, ingresos y oportunidades de empleo (FAO, 2003). El auge de la acuicultura en los últimos años en el país ha contribuido al establecimiento de proyectos en torno a la actividad acuícola, con distintos niveles de producción, notándose un marcado desarrollo en algunas regiones con preferencia hacia ciertas especies que comercializan en las capitales y en el exterior, pero quienes están contribuyendo en gran medida a abastecer los mercados locales y regionales, son los proyectos de acuicultura de tamaño mediano. En los departamentos del sur del país, ha cobrado gran importancia la acuicultura, con especies como la cachama principalmente, la cual es consumida en la misma región y se cultiva en menor proporción la tilapia roja (Salazar, 1999).

En muchos sistemas de producción piscícola en estanques, solamente el 30% de los nutrientes suministrados son convertidos en producto, el resto es acumulado en los sedimentos o es liberado en el efluente (que generalmente va hacia los ríos) (Acosta y Morell, 1994; Gross y Boyd, 2000), por lo que, de acuerdo con Schmittou (1995), la degradación ambiental causada por los efluentes de la acuicultura, es hoy en día uno de los aspectos de mayor atención. Piedrahita (2003) asevera que el efluente de la acuicultura puede contener una variedad de constituyentes que causan impactos negativos al ambiente cuando son liberados. A pesar de existir interés en el tratamiento de los efluentes desde la década del 70, hubo un estancamiento en las investigaciones al respecto y solamente a partir del final de los 80 y comienzo de los 90 se reinician basados en el sentido común de aprovechar el residuo, más que descargarlo y diluirlo (Troell y Chopin, 2005).

Existe diversidad de alternativas tecnológicas disponibles para el tratamiento de aguas residuales, la mayoría son aeróbicas con altos costos de construcción, operación y mantenimiento. A pesar de ser alternativas eficientes desde el punto de vista técnico, cuando son construidas en países de bajos recursos, los altos costos para operar y mantener estos sistemas conllevan en muchas ocasiones al abandono de estas instalaciones, perdiéndose las costosas inversiones iniciales y dejando sin resolver los problemas de contaminación (Caicedo *et al.*, 2007).

La contaminación del recurso hídrico, el incremento en la cobertura del suministro de agua y la falta de recursos económicos son algunas de las causas por las cuales surge la necesidad de desarrollar tecnologías sustentables para el tratamiento de aguas residuales en países en vía de

desarrollo (Caicedo *et al.*, 2005). Dos métodos pueden ser utilizados para disminuir el impacto ambiental causado por los efluentes piscícolas, el primero es una disminución de la cantidad del efluente y el segundo consiste en mejorar la calidad del efluente antes de ser lanzado al ambiente (Pardo *et al.*, 2006).

Las lagunas de estabilización (de algas, jacinto de agua, duckweed), se han convertido en los últimos años en una alternativa potencial para el manejo sustentable de las aguas residuales. Duckweed tiene cualidades como alto contenido de proteínas, alta tasa de crecimiento y fácil manejo (Caicedo *et al.*, 2005). Consisten en estanques o canales cuya profundidad fluctúa entre los 0,4 y 1,5 m; estos estanques son alimentados con agua residual y la superficie está cubierta de duckweed (*Spirodela polyrrhiza*) (Celis *et al.*, 2005).

El presente estudio caracterizó el efluente de la Estación Piscícola La Yunga ubicada en Popayán-Cauca y evaluó la tratabilidad del mismo mediante plantas acuáticas (Duckweed); la investigación hace parte del proyecto “Desarrollo y adaptación de tecnología para el tratamiento de efluentes piscícolas” implementado por la Universidad del Cauca, el Centro Regional de Producción e Innovación del Cauca (CREPIC) y el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.

# 1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La contaminación hídrica es una problemática ambiental que aqueja a la sociedad hoy por hoy, debido al vertimiento de sustancias contaminantes en las fuentes de agua superficial desencadenando problemas sanitarios y escasez del recurso. La acuicultura es una actividad productiva que genera residuos líquidos que son vertidos sin tratamiento previo en ríos y quebradas incrementando la contaminación del recurso y disminuyendo su calidad. Uno de los mayores problemas de la producción acuícola es el aumento de materia orgánica producida por las excreciones de los peces, por el alimento no consumido, por las prácticas alimentarias y por otros insumos adicionados en los estanques de cultivo (Tacon, 2003; Papoutsoglou, 1991).

Los efectos de la acuicultura obedecen en gran medida a factores relacionados con el tipo de explotación, la localización geográfica, el sistema de cultivo empleado y las especies producidas. La influencia de las instalaciones acuícolas en el ambiente depende básicamente de las cualidades físicas, químicas y biológicas de la masa de agua afectada y de las características ecológicas específicas de la zona en que se encuentren ubicadas. Las especies para la acuicultura se diferencian entre sí de manera significativa en sus características biológicas y ecofisiológicas, por lo que sus cultivos producen efectos distintos en el medio, determinando, también, la magnitud y el tipo de implicaciones ecológicas. (Molina y Vergara, 2005).

El agua que sale del estanque (efluente) va hacia una fuente natural, generando variaciones como disminución en la concentración de oxígeno disuelto (OD), aumento en la concentración de sólidos en suspensión (SST), aumento en la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), aumento en la demanda química de oxígeno (DQO), formas de nitrógeno y fósforo, crecimiento exagerado de algas, eutrofización, entre otras (Pardo *et al.*, 2006). Durante la captura de peces (cosecha), los efluentes piscícolas son principalmente contaminantes al final de la operación, cuando lleva las mayores cantidades de nutrientes y sólidos en suspensión (Teicher-Coddington, 1996). El incremento de nutrientes en el cuerpo receptor, es el principal problema en el tratamiento de efluentes piscícolas debido al alto costo de instalación y operación de sistemas de tratamiento convencional (Redding *et al.*, 1997).

La carga contaminante de cada estanque varía en función de la etapa de desarrollo de los peces y de las condiciones requeridas para el cultivo. Esta depende de su rendimiento energético, la principal fuente de contaminación está relacionada directamente con el alimento; el porcentaje de alimento no ingerido suele estimarse en torno al 10-20% (Aguilera, 2006). Por cada tonelada de tilapia producida en jaulas se introducen en el ambiente 23–29 kg de fósforo total (PT). Las pérdidas de PT son aproximadamente iguales en

la producción intensiva de truchas y en la de tilapia (Beveridge, 1986). El modelo de regresión de Islam (2005), para predecir la carga de nutrientes para una dieta dada, muestra que 132.5 kg de N y 25 kg de P son vertidos al ambiente por cada tonelada de pescado producido, valores calculados con base en la tasa de conversión de alimento.

A raíz de la problemática ambiental generada por los efluentes piscícolas surge la necesidad de desarrollar alternativas que permitan minimizar o eliminar los impactos provenientes de estos efluentes; es así como el presente trabajo estudió la capacidad de remoción de materia orgánica y nutrientes (nitrógeno y fósforo) mediante lagunas de macrofitas acuáticas (duckweed) como alternativa de tratamiento de efluentes piscícolas.



## 2 JUSTIFICACIÓN

Existen diferentes alternativas que permiten remover los contaminantes minimizando en cierta medida los impactos que estos puedan generar sobre los cuerpos receptores. Las lagunas Duckweed son una opción para el tratamiento de aguas residuales y constituyen tratamiento biológico que suele ser más amigable con el ambiente y además ofrece la posibilidad de emplear la planta en la alimentación del pez (El Shafai *et al.*, 2007). Este tipo de investigación es importante porque en Colombia no se han realizado estudios de tratabilidad de efluentes piscícolas con macrofitas acuáticas, de tal manera puede servir de referencia en posteriores estudios relacionados con el tema.

## 3 OBJETIVOS

### 3.1 Objetivo General

- Evaluar el desempeño de lagunas duckweed y azolla en el tratamiento de efluentes de estanques productores de tilapia roja en la estación piscícola la Yunga durante el período de Octubre de 2008 a Marzo de 2009.

### 3.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar el efluente generado del proceso productivo de los estanques de tilapia roja (*Oreochromis spp*).
- Evaluar el crecimiento y la adaptación de duckweed y azolla a las condiciones ambientales del efluente de tilapia roja.
- Determinar las eficiencias de remoción de fósforo total, nitrógeno amoniacal, nitrógeno total y materia orgánica mediante lagunas duckweed (*Spirodela polyrrhiza*) y compararla con azolla (*Azolla pinnata*) en un sistema continuo y en un sistema batch.

## 4 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 PISCICULTURA

Desde los años 70 la producción acuícola mundial ha crecido substancialmente contribuyendo enormemente a la seguridad alimentaria mundial. La tilapia es el segundo grupo más importante de peces después de las carpas chinas, con una producción que solo en acuicultura supera las 1,500,000 Toneladas Métricas (TM) (Castillo, 2003). En Colombia el aporte de la acuicultura a la producción pesquera nacional supera el 27% de la producción total, siendo los productos de acuicultura más importantes en su orden: la tilapia (95% Tilapia roja: *Oreochromis* sp.), las cachamas (*Piaractus brachipomus* y *Colossoma macropomun*), los camarones de cultivo (*Litopenaeus vannamei* y *L. stylirostris*) y la trucha (*Oncorhynchus Mykiss*). (Castillo, 2001).



Foto 1. Tilapia Roja (*Oreochromis* spp).  
Fuente: Castillo 2006

Las tilapias se adaptan fácilmente a las condiciones de los diversos cuerpos de agua en que han sido introducidos, tales como arroyos, ríos, lagos, lagunas, presas, estanques, estuarios e incluso hábitats marinos. Aceptan con facilidad diferentes tipos de alimento, tanto los producidos naturalmente como los alimentos artificiales (derivados de subproductos agrícolas) (Luchini, 2006).

El oxígeno disuelto recomendado para el cultivo de cachama y tilapia corresponde a niveles superiores a 5 mg/L de oxígeno disuelto. No obstante, ambas especies toleran, temporalmente, concentraciones inferiores a 1.5 mg/L (Coche, 1982; citado por Mora *et al.*, 1997). A diferencia para la mayoría de los peces que a concentraciones de oxígeno disuelto entre 3 mg/L- 5 mg/L es deficiente, ocasionando metabolismo restringido y peligro de enfermedades. La tilapia puede vivir en condiciones ambientales adversas debido precisamente a que soporta bajas concentraciones de oxígeno disuelto. Ello se debe a la capacidad de su sangre a saturarse de oxígeno aún cuando la presión parcial de este último sea baja.

Los efectos de la alcalinidad no son directos sobre las tilapias, sino más bien sobre la productividad del estanque. Una alcalinidad superior a 175 mg CaCO<sub>3</sub>/L, resulta perjudicial, debido a las formaciones calcáreas que se producen y que afectan tanto a la productividad del estanque como a los peces al dañar sus branquias. Una alcalinidad de aproximadamente 75 mg CaCO<sub>3</sub>/L, se considera adecuada y propicia para enriquecer la productividad del estanque (Saavedra, 2006).

La tilapia roja (*Oreochromis sp*) por sus hábitos alimentarios, capacidad de adaptación, fácil reproducción, resistencia a enfermedades y posibilidades de soportar condiciones adversas en cultivo, con amplia tolerancia y rápido crecimiento, es ideal para producción en estanques bajo sistemas extensivos o intensivos. Las tilapias han demostrado ser peces con rápida maduración y numerosos desoves anuales, reproduciéndose en los estanques a una temprana edad (dos a tres meses) y cada treinta días si las temperaturas son aptas (Borja, 2003).

#### **4.1.1 CLASIFICACIÓN**

Según los niveles de explotación los cultivos pueden ser: extensivos (poca inversión y baja producción), intensivos (mayor inversión y alta producción) y semi-intensivos (inversión y producción intermedias) (INAPE, 1999).

Los cultivos extensivos pueden realizarse en embalses, lagos pequeños, generalmente utilizados con otros fines (riego, abrevaje de ganado, generación de energía eléctrica, etc.). Debido a esto se cuenta con menos posibilidades de controlar las condiciones del cuerpo de agua y la población de peces. La densidad de siembra inicial es de 100 a 800 individuos por hectárea, no se requiere alimentación artificial, ni cuidados diarios. Los cultivos intensivos se desarrollan en lugares diseñados para piscicultura (estanques, jaulas), lo que no impide que sean utilizados para otros fines. El ambiente y los peces son periódicamente controlados. Las densidades iniciales son de 1.200 a 5.000 individuos por hectárea, requieren alimentación y cuidados diarios. En los semi-intensivos la alimentación natural es complementada con alimento artificial en alguna etapa del desarrollo. El control del ambiente y de los peces es menos riguroso.

#### **4.1.2 PROCESO PRODUCTIVO**

La producción de alevinos se divide en las fases de reproducción, larvicultura, y precría; en términos generales, el proceso es el siguiente: mediante el desove

en cautiverio, entre machos y hembras previamente seleccionados, se obtienen las Ovas (huevos embrionados) que son posteriormente depositadas en incubadoras o estanques, donde se convierten en larvas. Dependiendo de la especie se efectúa un proceso de determinación del sexo. En el caso particular de la tilapia, se inicia un ciclo de 30 días, en el cual las larvas permanecen exclusivamente para suministro de hormonas para efectos de reversión sexual. Se espera que al finalizar esa etapa se obtenga alevinos de 1 g y que al menos el 95% de la población sean machos. Finalmente, los alevinos son trasladados a estanques de mayor tamaño, donde son cultivados hasta que éstos alcancen un peso cercano a los 30 g que normalmente se logra en 90 días (pre-cría). Después de que los alevinos tienen un peso aproximado de 180 g, a partir de ese momento, el pez pasa a la etapa de engorde, donde es cultivado hasta llevarlo a un peso por encima de los 300 g. La duración de estas dos actividades por general es de 6 meses (Agro cadenas, 2005).

La cosecha es la etapa final del cultivo. Se pueden realizar cosechas totales o parciales, dependiendo de la cantidad y frecuencia con que se desee tener producto disponible para la comercialización. Las cosechas se realizan cuando los peces han alcanzado un tamaño adecuado para su venta. Para la cosecha se pueden utilizar atarrayas o chinchorros (Saavedra, 2006).

## 4.2 CALIDAD DEL AGUA PARA EL CULTIVO DE TILAPIA

La calidad del agua está determinada por sus propiedades físicas y químicas, entre las más importantes se destacan: temperatura, oxígeno disuelto, pH y transparencia. Estas propiedades influyen en los aspectos productivos y reproductivos de los peces, por lo que, los parámetros del agua deben mantenerse dentro de los rango óptimos para el desarrollo de la tilapia (Saavedra, 2006).

Tabla 1. Calidad del agua para el cultivo de tilapia

INDICADORES PARÁMETROS	RANGOS
Temperatura	25.0 - 32.0 °C
Oxígeno Disuelto	5.0 - 9.0 mg/L
pH	6.0 - 9.0
Alcalinidad Total	50 - 150 mg/ L
Dureza Total	80 - 110 mg/ L
Calcio	60 - 120 mg/ L
Nitritos	0.1 mg/ L
Nitratos	1.5 - 2.0 mg/ L
Amonio Total	0.1 mg/ L
Hierro	0.05 - 0.2 mg/ L
Fosfatos	0.15 - 0.2 mg/ L
Dióxido de Carbono	5.0 - 10 mg/ L
Sulfuro de Hidrógeno	0.01 mg/ L

Fuente: Saavedra, 2006.

### 4.3 POSIBLES CONTAMINANTES GENERADOS

Los residuos contaminantes de la acuicultura incluyen todos los materiales generados en el proceso y que no son removidos del sistema, usualmente sólidos suspendidos, nitrógeno y fósforo provenientes de la materia orgánica transportada por el agua, las deyecciones de los peces y del alimento no consumido (García y Yasnó, 2007).

En el vertido de aguas residuales tratadas el nitrógeno y el fósforo revisten una gran importancia. Los vertidos que contienen estos nutrientes provocan el proceso de eutrofización de lagos y embalses, estimulando el crecimiento de algas y plantas acuáticas arraigadas en cursos de agua poco profundos. La presencia de estas plantas puede interferir con los usos beneficiosos de los recursos hidráulicos. Los efectos de eutrofización dependen de la frecuencia y el volumen de las descargas, también de las características del cuerpo receptor (Goldburg *et al.*, 2001). Por otra parte, la elevada concentración de nitrógeno en efluentes puede ocasionar otros efectos negativos como son la reducción de la concentración de oxígeno disuelto en las aguas receptoras, toxicidad para la vida acuática, efectos negativos sobre la efectividad de la desinfección con cloro, peligro para la salud pública y efectos sobre el potencial de un agua residual para ser reutilizada (Grupotar, 2005).

Según Holmer (2004); citado por Hermosilla *et al.* (2005) los resultados de las concentraciones de nitrógeno total, fosforo total y los contenidos de materia orgánica parecen ser superiores en los meses más cálidos. Este aumento es consecuencia de un incremento en la cantidad de alimento añadida y no ingerida por los peces. En los meses cálidos, el crecimiento de los peces es mayor debido a que las altas temperaturas del agua aceleran su metabolismo y, por tanto, el requerimiento alimenticio es mayor. Este aumento en la cantidad de alimento incorporada y no ingerida significa más materia orgánica susceptible de ser remineralizada por acción microbiana, produciendo, no solo una demanda de oxígeno disuelto, sino también un flujo de nutrientes hacia la columna de agua. Los sólidos suspendidos disminuyen la demanda de oxígeno disuelto ocasionando efectos significativos sobre el cuerpo receptor (Soto *et al.*, 2007)

### 4.4 ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO

Pardo *et al.* (2006) distinguen dos métodos de tratamiento de efluentes, el primero es la disminución de la cantidad del efluente aplicando mejores prácticas de manejo para prevenir la contaminación del agua tales como no usar tasas de siembra ni de alimentación superiores a la capacidad de carga del efluente; usar prácticas de alimentación conservadoras evitando la

sobreoferta; fertilizar solamente lo necesario para promover el fitoplancton; reducir el recambio de agua tanto como sea posible; cosechar sin drenar el estanque y pasar el efluente por un tanque de sedimentación antes de la descarga final (Boyd, 2003). El segundo método consiste en mejorar la calidad del efluente antes de ser lanzado al ambiente; las técnicas utilizadas son:

**Sedimentación del efluente:** los estanques de sedimentación deben retener el agua por un tiempo suficiente para la disminución de los sólidos. El tiempo de detención en un estanque de sedimentación afecta directamente el tamaño y número de estanques de sedimentación necesarios para tratar estos efluentes (Pardo *et al.*, 2006).

**Filtración por moluscos:** los moluscos bivalvos son filtradores muy eficientes, son capaces de disminuir en la columna de agua el fitoplancton (Dame y Dankers, 1991). Los bivalvos no solamente disminuyen el plancton, sino que también reducen los niveles de nutrientes y la concentración de sólidos suspendidos en la columna de agua (Soto y Mena, 1999).

**Filtración por plantas acuáticas:** las plantas acuáticas se han utilizado en el tratamiento de efluentes piscícolas aprovechando su capacidad para sobrevivir, crecer y reproducirse en condiciones adversas generadas por la contaminación y al mismo tiempo incorporar o favorecer la eliminación de contaminantes (Arguello *et al.*, 2000).

#### **4.5 PLANTAS ACUÁTICAS**

Las plantas acuáticas, denominadas también macrofitas, cumplen un papel muy importante en los ecosistemas acuáticos. Brindan directa o indirectamente alimento, protección y un gran número de hábitats para muchos organismos de estos ecosistemas. Muchas de estas plantas son útiles para el ser humano, puesto que sirven de alimento, son materia prima para la industria y se usan en procesos de biorremediación, ya que pueden absorber algunas sustancias disueltas y brindar oxígeno mediante la fotosíntesis. Sin embargo, en algunos cuerpos de agua artificiales podrían crear problemas, porque pueden interferir con el uso que le da el hombre, al obstruir su flujo o la navegación y al crear ambientes propicios para plagas, enfermedades y vectores que afectan la salud humana (Cook y Gut, 1974; citado por Arroyave, 2004). No obstante, si las plantas acuáticas se manejan adecuadamente, su poder de proliferación, capacidad de absorción de nutrientes y bio acumulación de contaminantes del agua las convierten en una herramienta útil en el tratamiento de aguas residuales.

Las principales ventajas de los sistemas de tratamiento con plantas acuáticas son su bajo costo de construcción y mantenimiento y su simplicidad de operación. Además, se utiliza un recurso disponible hasta ahora no

aprovechado en muchos lugares y que puede tener diversos usos (Olguín y Hernández, 1998; citado por Arroyave, 2004). Una de las desventajas de esta tecnología es que se requiere un área considerable para la construcción de los canales. Adicionalmente, se necesita instalar plantas piloto para evaluar variables de diseño específicas para cada región, cada planta y cada tipo de efluente (Arroyave, 2004).

Las macrofitas ocupan diversas zonas de los ecosistemas acuáticos. Dentro del grupo de plantas flotantes es frecuente observar en lagunas o en las áreas de flujo lento en ríos y quebradas la duckweed.

#### 4.6 LAGUNAS DUCKWEED

Duckweed (*Spirodela polyrrhiza*), es el nombre común de una pequeña planta acuática que flota libre sobre las superficies de aguas estancadas salobres o frescas; pertenece a la familia *Lemnaceae*, de la cual existen alrededor de 40 especies.



Foto 2. Duckweed (*Spirodela polyrrhiza*)

#### CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA

Reino: Plantae  
División: Magnoliophyta  
Clase: Liliopsida



Orden: Alismatales  
 Familia: Lemnaceae  
 Género: Spirodela  
 Especie: Spirodela polyrrhiza

La estructura de duckweed consiste en pequeñas hojas delgadas, de forma redonda, agrupadas en frondas y una raíz no ramificada. Mientras las frondas se mantienen en la superficie del agua, la raíz inmersa en esta, da la estabilidad impidiendo que esta se pueda girar como consecuencia del viento (Landolt, 1986; citado por Caicedo *et al.*, 2007).

Estas plantas presentan varias ventajas que las hacen adecuadas para su aplicación en el tratamiento de aguas residuales: 1) Se reproducen vegetativamente, cada planta individual produce cerca de 20 nuevas plantas durante su tiempo de vida, las plantas hijas hacen lo mismo, originando un crecimiento exponencial, cuyo limitante va a ser la presencia y disponibilidad de nutrientes. 2) Las plantas no tienen tejidos celulares rígidos que mantener. 3) La planta transforma los nutrientes presentes en el agua en un tejido vegetal de alta calidad.

En la tabla 2 se especifica el rango de contenido de nutrientes en aguas donde duckweed ha sido encontrada.

Tabla 2. Rango de contenido de nutrientes en aguas donde duckweed ha sido encontrada (todas las cantidades en mg/L, excepto la conductividad en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  adaptado de Landolt, 1986).

Parámetro	Rango Absoluto	Rango para el 95% de las muestras
pH	3.5-10.4	5.0-9.5
Conductividad	10-10900	50-2000
Ca	0.1-350	1.0-80
Mg	0.1-230	0.5-50
Na	1.3->1000	2.5-300
K	0.5-100	1.0-30
N	0.003-43	0.02-10
P	0.000-56	0.003-2
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	8-500	10-200
Cl	0.1-4650	1-2000
S	0.03-350	1-200

Duckweed es considerada como una de las plantas de más rápido crecimiento en el mundo, puesto que frecuentemente dobla su biomasa en dos o tres días bajo condiciones ideales de disposición de nutrientes, luz solar y temperatura (Skillicorn *et al.* 1993), con la misma o mayor tasa durante horas nocturnas que la presentada en horas diurnas. La tasa de crecimiento de duckweed reportada en la literatura es de  $0,3 \text{ d}^{-1}$  en agua residual doméstica cruda y medio Huttner (Bermaat y Hanif, 1998; Caicedo *et al.*, 2000). Pinto (2000; citado por Espejo *et*

*al.*, 2006) reportó tasa de crecimiento de duckweed y azolla de 0,297 individuos/d. Lasfar *et al.* (2007) reportó tasa de crecimiento de duckweed de 0,41 d<sup>-1</sup> para concentraciones de P y N en un rango de 1 a 20 mg/L y 3 a 120 mg/L, respectivamente. También reporta un rápido decremento en la tasa de crecimiento 0,13 d<sup>-1</sup> cuando las concentraciones de P y N son menores 1 y 3 mg/L, respectivamente.

La problemática ambiental generada por los efluentes piscícolas, ha exigido la utilización de alternativas que permitan eliminar o minimizar dicha contaminación. En los últimos años ha tenido un gran auge la utilización de sistemas de lagunas facultativas cubiertas con duckweed, ya que son alternativas de tratamiento económicas y de fácil aplicación. Se han desarrollado tecnologías que han sido estudiadas y documentadas.

Pedraza (1997), citado por Chará (1998), reporta una disminución en la demanda bioquímica de oxígeno de 247 a 149 mg/L y una reducción en los sólidos suspendidos totales de 214 a 58 mg/L en una granja porcina en el Valle del Cauca utilizando este sistema de tratamiento. La capacidad de remoción de fosfatos fue estudiada en condiciones de laboratorio por Obek y Hasar (2002) encontraron que duckweed puede remover ortofosfato eficientemente si se cosecha frecuentemente. Encontraron que la concentración inicial de 15 mg/l fue reducida a 0,5 mg/L al final de un período de 8 días.

Caicedo *et al.* (2005) realizaron un estudio sobre el efecto del tratamiento anaeróbico en el desempeño de las lagunas de estabilización duckweed, éste consistió en una planta piloto de dos líneas de 7 estanques duckweed en serie. Una línea recibió agua residual desarenada y la otra recibió el efluente de un reactor UASB. Ambas líneas operaron en un tiempo de retención hidráulico de 21 días. El sistema monitoreó temperatura, pH, oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, sólidos suspendidos totales, fósforo total, diferentes formas de nitrógeno y producción de biomasa. No se observó ningún efecto sobre el pH y la temperatura en ambos sistemas. La concentración de oxígeno fue mayor en el reactor UASB. En términos de materia orgánica ambos sistemas tuvieron remoción mayor al 85%. La calidad del efluente en términos de sólidos suspendidos fue de 96% y 97% en el sistema con y sin pretratamiento, respectivamente. La remoción de nitrógeno total fue de 63% y 68%, la remoción de fósforo fue de 24% y 29% en el sistema con y sin pretratamiento, respectivamente.

Gamarra (2006) complementó el tratamiento de las aguas residuales de la Universidad Pontificia Bolivariana Bucaramanga a través de una planta piloto integrada con *Spirodela sp* y realizó la evaluación de la eficiencia de remoción de nutrientes (fósforo y nitrógeno), coliformes totales, con diferentes alturas de lámina de agua; se obtuvieron eficiencias hasta de 77.07% para nitrógeno amoniacal, 97.10% fósforo total.

El Shafai (2007) realizó un estudio sobre la recuperación de nutrientes de agua residual doméstica usando un sistema UASB-Duckweed, éste consistió en un

tratamiento de agua residual a escala piloto utilizando un reactor UASB de 40 L con un tiempo de retención hidráulica de 6 horas, seguido por tres estanques duckweed en serie con un tiempo de retención hidráulico de 15 días en total. Durante el verano el sistema de tratamiento alcanzó remociones de 93%, 96% y 91% para DQO, DBO y SST, respectivamente. La eficiencia de remoción del amonio, nitrógeno total y fósforo fue de 98%, 85% y 78%, respectivamente. Durante el invierno el sistema fue eficiente en remover DQO, DBO y SST, pero no para la remoción de nutrientes

#### 4.7 AZOLLA

El género *Azolla* corresponde a diminutos helechos acuáticos, que flotan libremente en la superficie del agua (Espinass, 1979; citado por Ly, 2004), está distribuido en el trópico y en ecosistemas acuáticos a temperatura fresca (Arora y Singh, 2003). *Azolla* es una planta que consiste en un corto tallo ramificado que posee raíces que cuelgan hacia abajo en el agua. Cada hoja es bilobulada, el lóbulo superior contiene clorofila verde mientras que el lóbulo inferior es incoloro. Este helecho se multiplica generalmente de forma vegetativa, y puede duplicar su biomasa en cuatro días (NAAP, 1985; citado por Ly, 2004). Los helechos de agua invaden hábitats acuáticos, forman colchones densos en cuerpos de agua con movimientos lentos y causan deterioro en el uso del agua y sobre la biodiversidad de los sistemas acuáticos. Por otro lado constituye un elemento interesante en el sistema de agricultura sustentable (McConnachie, 2004; citado por Leterme y Londoño, 2009).

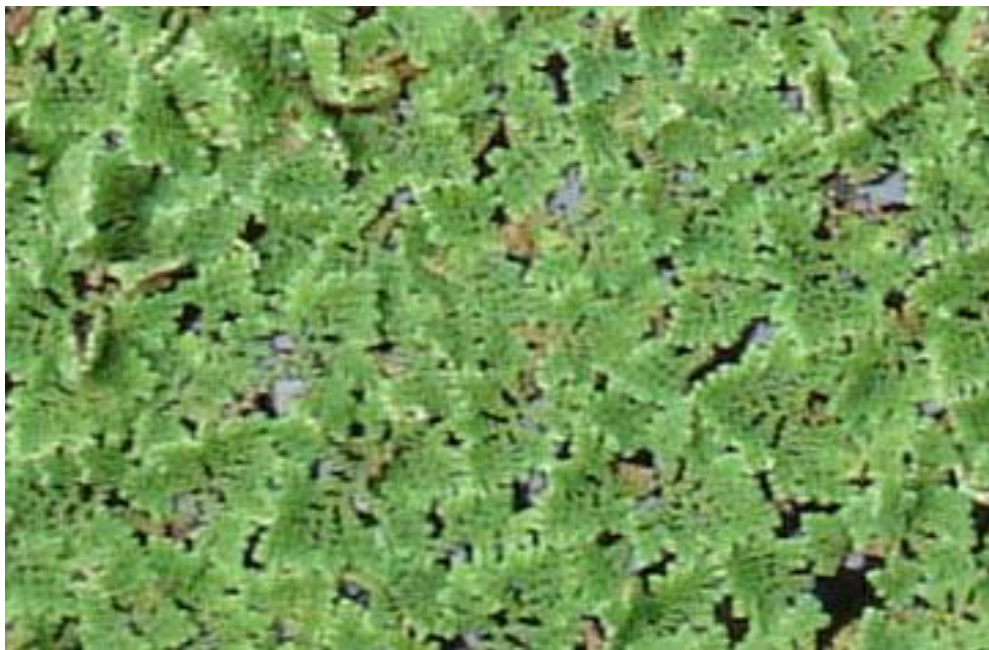


Foto 3. *Azolla pinnata*

## CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA

Reino: Plantae  
División: Pteridophyta  
Clase: Filicopsida  
Orden: Hydropteridales  
Familia: Azollaceae  
Género: Azolla  
Especie: Azolla pinnata

Azolla presenta una asociación simbiótica con el alga fijadora de nitrógeno *Anabaena azollae*, ambas son competentes fotosintéticamente pero el helecho proporciona fotosíntesis al alga mientras que la cianobacteria proporciona los requerimientos de N de la asociación. Esta asociación es sobresaliente por su alta productividad y alta tasa de fijación de nitrógeno (Arora y Singh, 2003).

Los campos de arroz constituyen ambientes ideales para el crecimiento de azolla, de tal forma que se utiliza como biofertilizador de N (Lumpkin y Plucknett, 1980). Además de biofertilizador de N, azolla tiene múltiples usos tales como herbicida biológico, alimento para animales y como purificador de agua. Por ejemplo fue utilizada como alimento en granjas porcinas colombianas, donde reportó un contenido de 184 a 317 g de proteína cruda/Kg de materia seca (Leterme y Londoño, 2009).

Azolla, también es conocida por acumular nutrientes como P, K y minerales del agua y dejarlos disponibles para las plantas. Se estudia la posibilidad de utilizar azolla en la agricultura en suelos pobres en nutrientes, así como también en la biofertilización de elementos esenciales como el Fe, debido a la habilidad de la biomasa seca de azolla para absorber iones metálicos (Kiguli, 2000). El uso de azolla como biofertilizador tiene limitantes debido a su alta tasa de aplicación (0.5-1 Ton/ha), la biomasa es altamente perecedera y no se puede almacenar; además todas las aplicaciones de azolla requieren biomasa fresca para producir un volumen suficiente. La producción de biomasa depende de la tasa relativa de crecimiento y el tiempo, mientras que la eficiencia como biofertilizante de N depende del alto potencial de fijación de nitrógeno (Arora y Singh, 2003). Azolla puede crecer en aguas residuales con déficit de N y remover P, aún cuando el N sea escaso (Arora y Saxena, 2005; Redding, 1997). Sin embargo la urea presente en el medio acelera el crecimiento (Shiomi y Kitoh, 1991).

Al igual que con duckweed se ha utilizado azolla como tratamiento de aguas residuales, por ejemplo Redding (1997) realizó un estudio en el cual comparó un efluente piscícola sin tratamiento con tres sistemas de macrófitas acuáticas: *Rorippa nasturtiumaquaticum* (el sistema emergente); *Azolla filiculoides* (Lam) (el sistema flotante); y, *Elodea nuttallii* (Planch) (el sistema sumergido) y encontró que las concentraciones de amonio, nitrato y fósforo se redujeron significativamente en comparación del agua residual sin tratamiento.

Forni *et al.* (2001) evaluaron el crecimiento de azolla y la remoción de nitrógeno y fósforo en aguas residuales de una planta de acuicultura experimental, en medio Hoagland y en una cisterna. Encontraron que la producción de biomasa y la actividad nitrogenásea fue mayor en el medio Hoagland. La conductividad eléctrica y los nitratos disminuyeron considerablemente en los tres medios, la remoción más alta de nitrato se obtuvo en la planta de acuicultura experimental. La concentración de fosfato fue muy baja.

Arora y Saxena (2005) estudiaron el crecimiento de *Azolla microphylla* en aguas residuales municipales de tratamiento secundario, la cual contenía fósforo reactivo y metales pesados. Azolla mostró buen potencial de crecimiento en éste tipo de efluentes y la biomasa seca no mostraba presencia de metales pesados.

## 5 METODOLOGÍA

### 5.1 GENERALIDADES SITIO DE ESTUDIO

El estudio se desarrolló en la Estación Piscícola la "Yunga" ubicada en el Municipio de Popayán del Departamento del Cauca vía al Tambo, compuesta por 17 estanques de producción de Tilapia Roja para fines comerciales, cuya producción es de 4.000 Kg por cosecha. El agua que abastece la piscícola se capta de la quebrada "Agua sucia" y el efluente se vierte a la misma.



Figura 1. Ubicación planta piloto estación piscícola la Yunga.

## 5.2 CARACTERIZACIÓN DEL EFLUENTE

Para caracterizar el efluente de los estanques de Tilapia Roja, se realizó un muestreo compuesto por lapsos de diez minutos hasta obtener la muestra compuesta, el punto de muestreo corresponde al efluente de los estanques piscícolas. Para la recolección de la muestra se utilizó un recipiente plástico de 2 litros que se transportaba dentro de una nevera de icopor para garantizar su conservación.

Los parámetros de temperatura, oxígeno disuelto, pH y conductividad eléctrica se midieron en campo utilizando la sonda multi paramétrica y los demás parámetros se analizaron en el laboratorio utilizando metodologías del Standard Methods (ver anexo A). Esta caracterización se realizó dos veces por semana como se indica en la tabla 3

Tabla 3. Parámetros de medición para la caracterización del efluente en la estación piscícola la Yunga

<b>Parámetro</b>	<b>Nº de Análisis</b>
Temperatura	24
Oxígeno Disuelto	24
pH	24
Sólidos Suspendidos	24
DBO <sub>5</sub>	24
DQO	24
Nitrógeno Amoniacal	24
Nitrógeno Total	24
Fósforo	24
Alcalinidad	24

Para el evento de la cosecha se realizó un muestreo compuesto por lapsos de 20 minutos inicialmente; luego se redujo a lapsos de 10 minutos para obtener la muestra completa, ya que el evento tuvo una duración de 2 horas aproximadamente. Se tomaron 3 muestras del mismo punto, se midieron los parámetros de temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y pH en campo; los demás parámetros fisicoquímicos se realizaron en el laboratorio.

### 5.2.1 Análisis estadístico

Para analizar los resultados de la caracterización del efluente de tilapia roja en la estación piscícola la Yunga se utilizó el programa estadístico SPSS 16. Para conocer el comportamiento de los parámetros estudiados a través del tiempo

se aplicó el procedimiento de Estimación curvilínea para determinar la curva de mejor ajuste teniendo en cuenta la significancia estadística. La prueba T para una muestra, se aplicó para comparar el valor promedio con un valor de referencia. La prueba no paramétrica (prueba de Mann-Whitney) se aplicó para determinar si el evento de cosecha tiene efecto significativo sobre la calidad del efluente en comparación con las etapas de levante y engorde.

### **5.3 ADAPTACIÓN DE DUCKWEED Y AZOLLA A LAS CONDICIONES AMBIENTALES DEL EFLUENTE DE TILAPIA ROJA EN LA ESTACIÓN PISCÍCOLA LA YUNGA**

La semilla de duckweed se consiguió en las instalaciones de la Universidad del Valle, para el montaje en la planta piloto; la cual se dispuso en recipientes adecuados que permitieran su traslado desde Cali hasta Popayán.

Una vez obtenida la semilla de duckweed se llevó al laboratorio de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la Universidad del Cauca, donde se dispuso en un recipiente y se le agregó agua de la piscícola de la Yunga, después de 7 días se le cambió el agua. La semilla permaneció en el laboratorio por un periodo de 15 días aproximadamente, luego se realizó la siembra (28 de Octubre de 2008) de manera descendente en cada laguna. Se realizó un seguimiento periódico para observar su evolución, debido a la escasez de la densidad de duckweed, a las 3 semanas fue necesario agregar más semillas para incrementar la población inicial.

Después de tres meses de haber sembrado duckweed y observado su comportamiento durante este tiempo, se encontró que estaba amarillenta, roja por el envés, deteriorada y el crecimiento de la población no era representativo; además de alta presencia de algas en las lagunas. Entonces se procedió a cubrir los tanques para observar si había alguna mejoría, ya que se encontró que la planta se estresa al estar expuesta a la luz solar (Skillicorn *et al.*, 1993).

Debido a que no se hallaron cambios en la adaptación de duckweed en la planta piloto de la Estación Piscícola la Yunga se optó por realizar un experimento a escala de laboratorio que duró 15 días utilizando duckweed y azolla para evaluar la tasa relativa de crecimiento y su capacidad de adaptación a las condiciones del efluente de tilapia en un sistema Batch, el cual permitió compararlas y explicar el comportamiento del sistema piloto de la Yunga.

El sistema Batch fue compuesto por doce contenedores de icopor de 473 ml de los cuales seis se utilizaron para la siembra de duckweed y seis para azolla, se determinaron tres etapas en las cuales se realizó una réplica de cada semilla por etapa (ver foto 3). La primera etapa consideró el contenedor con la superficie totalmente cubierta con la planta y destapado, la segunda etapa



consideró el contenedor con la superficie cubierta a la mitad y destapado y la tercera etapa consideró el contenedor con la superficie cubierta a la mitad y tapado con malla Raschel negra "Polisombra" que evita el paso de la luz en un 80%.



Foto 4. Montaje sistema batch escala laboratorio

El experimento se ubicó en las instalaciones del Bioterio de la Universidad del Cauca, adecuando una caseta con techo de Agrolene de 7X6 m "Plástico transparente calibre 7" que permite el paso de la luz y una mesa donde se colocaron los contenedores (ver foto 4).



Foto 5. Ubicación sistema batch escala laboratorio en las instalaciones del bioterio-Universidad del Cauca

La semilla de duckweed se obtuvo en la Universidad del Valle y la azolla en la Estación Piscícola Pambío. Estas se llevaron al laboratorio y permanecieron ahí por un período de siete días aproximadamente. Se recolectó agua de la Yunga y se caracterizó para conocer las condiciones iniciales, luego se

procedió a pesar las plantas y se realizó la siembra. Para la primera etapa se pesó 10 g aproximadamente de cada semilla y para la segunda y tercera etapa se pesó 5 g respectivamente. Se utilizó tul para facilitar la manipulación de la semilla en el momento de pesarla, de tal manera que se revistió el contenedor con el tul, se le agregó agua a una profundidad de 4.5 cm dejando un borde libre de 2.5 cm, luego se agregó la semilla y se utilizó una banda elástica para ajustar el tul. Para el cálculo de la tasa relativa de crecimiento las plantas se escurrían por un lapso de 20 minutos, aproximadamente y luego se procedía a pesarlas, este procedimiento se realizó todos los días a la misma hora durante el experimento.

#### **5.4 DESEMPEÑO DUCKWEED Y AZOLLA EN LA TRATABILIDAD DEL EFLUENTE DE TILAPIA ROJA EN LA ESTACIÓN PISCÍCOLA LA YUNGA**

Una vez obtenidos los resultados de la tasa de crecimiento de las plantas, se procedió a sembrar azolla en la planta piloto y disponer la duckweed en un solo tanque para aumentar su densidad, cubrir los recipientes con polisombra (ver foto 5) y colocar techo. La azolla se dispuso en dos recipientes, uno cubierto con polisombra y otro descubierto. La eficiencia de remoción se evaluó en un sistema continuo con tiempo de retención de 12 h y en un sistema batch con tiempo de retención de 7 días. Se realizaron dos muestreos debido a que la duckweed no creció lo suficiente, uno a los 8 días en el sistema continuo y otro a los 15 días en el sistema batch; durante cada muestreo se tomaron tres muestras, una de duckweed y dos de azolla.



Foto 6. Cubrimiento de los tanques con polisombra

## 6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1 CARACTERIZACIÓN EFLUENTE

La caracterización del efluente generado en el proceso productivo de tilapia roja en la Estación Piscícola la Yunga, se realizó en las etapas de levante y engorde (ver anexo B), y cosecha teniendo en cuenta un punto de muestreo, los resultados se presentan a continuación en la tabla 4 y 5.

Tabla 4. Resumen parámetros del efluente en la estación piscícola la Yunga, etapas levante y engorde.

	TEMP	O.D	DBO <sub>5</sub>	DQO	pH	PT	NH <sub>3</sub> -N	NT	ALC FF	ALC T	SST
	(°C)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(Und)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L CaCO <sub>3</sub> )	(mg/L CaCO <sub>3</sub> )	(mg/L)
<b>PROM</b>	25,53	5,63	10,77	66,13	8,24	0,07	0,29	1,49	1,15	15,28	56,83
<b>DESV</b>	2,11	2,42	2,31	19,57	0,70	0,02	0,16	0,79	2,00	3,44	20,72
<b>MAX</b>	30,90	10,60	15,00	104,00	9,50	0,11	0,80	2,87	6,00	24,00	96,00
<b>MIN</b>	21,80	1,50	6,53	21,00	6,80	0,03	0,05	0,22	0,00	10,00	22,00
CC (Ton/mes)			0,0279	0,1714		0,0002	0,0008	0,0039			0,1473
N° <b>DATOS</b>	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24

Prom: promedio; Desv: desviación estándar; Max: máximo; Min: mínimo; CC: carga contaminante

Tabla 5. Resumen parámetros del efluente en la estación piscícola la Yunga, evento cosecha.

M	T	OD	DBO <sub>5</sub>	DQO	pH	PT	NH <sub>3</sub> -N	NT	ALC FF	ALC T	SST
	°C	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	Unid	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/l CaCO <sub>3</sub> )	(mg/l CaCO <sub>3</sub> )	(mg/L)
1	23,5	9	16,41	98	9,7	0,129	0,056	0,336	4,00	20	116
2	23,6	8,5	16,78	76	9,8	0,135	0,056	0,28	2,00	26	106
3	23,7	8,7	17,60	60	9,7	0,125	0,112	0,168	4,00	14	92

M: muestra

#### 6.1.1 Temperatura

El valor promedio de la temperatura fue de  $25,53 \pm 2,11$  °C en las etapas de levante y engorde y de  $23,6 \pm 0,10$  °C en el evento de cosecha, esta variación de temperatura obedece a las condiciones climáticas de la zona de estudio. La temperatura fue variable durante el muestreo y se mantuvo en un rango entre 21-31°C (ver figura 2). Se analizó su comportamiento través del tiempo y no se encontró que la tendencia de los puntos se ajustara a una curva ( $P > 0,05$ ).

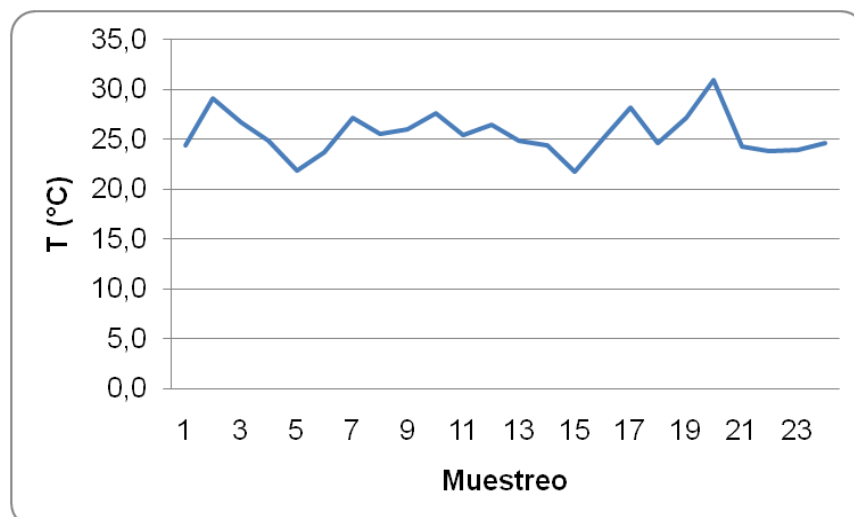


Figura 2. Variación temperatura hídrica (T)

Los valores obtenidos de temperatura son altos, esto obedece a la incidencia de los rayos solares sobre los estanques facilitando el proceso de fotosíntesis y por ende la proliferación de algas, las cuales se observaban como una capa verdosa sobre la superficie de los recipientes. El aumento de la temperatura del agua afecta la disposición de oxígeno y la tasa de sedimentación de sólidos por el cambio en la viscosidad (Romero, 2004).

Se realizó la prueba T para comparar el valor promedio de temperatura con el valor de vertimiento de efluentes líquidos en un cuerpo de agua, estipulado por el decreto 1594 de 1984 (cap. VI, art 72); encontrando que en promedio, la temperatura es significativamente menor que el valor de referencia (Diferencia de medias = - 14,467; P = 0,000; ver anexo N). Según lo dispuesto en el decreto, el efluente respecto a este parámetro, se puede descargar directamente al cuerpo de agua receptor ya que la temperatura es menor a 40 °C. En caso de reutilizar este efluente para la producción de tilapia, el valor de la temperatura es adecuado ya que de acuerdo con Saavedra (2006) está dentro del rango óptimo para el cultivo de tilapia (25-32 °C).

### 6.1.2 pH

Los valores de pH promedio son de  $8,24 \pm 0,7$  para las etapas de levante y engorde, y  $9,73 \pm 0,06$  para el evento de cosecha. El valor de pH en las etapas de levante y engorde está dentro de los parámetros de calidad admisible (5 a 9 unidades) para el vertimiento del efluente a un cuerpo de agua, según el decreto 1594 de 1984 (cap. VI, art 72) a diferencia del evento de cosecha. De acuerdo con la norma RAS (Título B, Tabla B.2.1) se clasifica como una fuente de abastecimiento aceptable (6.0 y 8.5 unidades), mientras que en la cosecha se clasifica como una fuente deficiente (3,8 a 10,5 unidades). El comportamiento de pH durante el muestreo fue variable y se mantuvo en un

rango entre 6,8 y 9,5 (ver figura 3), esta variación obedece a la actividad fotosintética realizada por las algas presentes en las lagunas. Se realizó la estimación curvilínea y se encontró que no hay significancia estadística ( $P > 0,05$ ; ver anexo N), los puntos no se ajustaron a ninguna curva de tendencia.

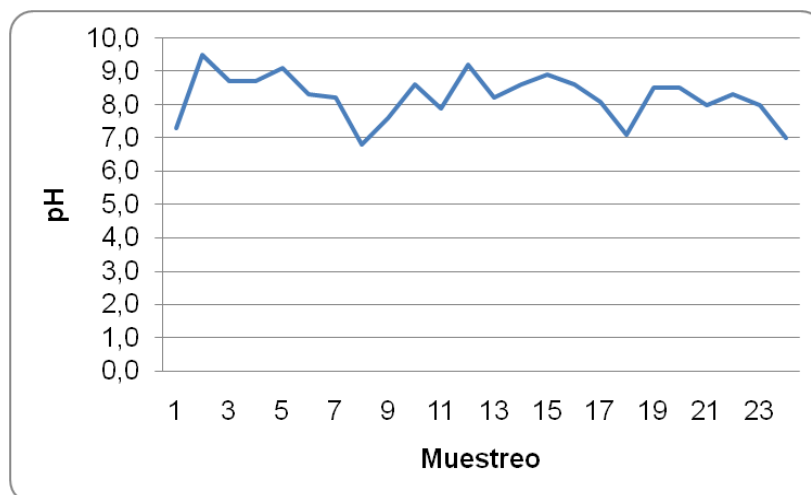


Figura 3. Variación de pH

El rango aceptable para el cultivo de tilapia se extiende entre pH 6,5 y 8,5 por lo que se puede recircular este efluente, a diferencia de la cosecha que no puede ser recirculado ya que no se encuentra dentro de los rangos establecidos para el cultivo de tilapia. Se encontró significancia estadística entre las etapas de levante y engorde respecto al evento de cosecha ( $P = 0,005$ ), es decir, la calidad del efluente se afecta por el evento de cosecha ya que este parámetro aumenta.

### 6.1.3 Oxígeno Disuelto

El oxígeno disuelto promedio fue de  $5,63 \pm 2,42$  mg/L en las etapas de levante y engorde y de  $8,73 \pm 0,25$  mg/L en la cosecha. El rango máximo de oxígeno disuelto 10,6 mg/L fue debido a que la mayor cantidad de oxígeno en el agua en estanques de cultivo proviene del producido por el proceso de fotosíntesis realizado por los vegetales, especialmente las algas (Saavedra, 2006). El valor mínimo de 1,5 mg/L en poco tiempo de exposición, no constituye un factor limitante para el desarrollo del cultivo.

El oxígeno disuelto presenta un comportamiento variable, este parámetro disminuyó durante el período del muestreo; esta variación fue resultado de la competencia por el oxígeno entre los organismos acuáticos presentes. En la estimación curvilínea se encontró significancia estadística ( $P = 0,022$ ;  $R^2 = 0,218$ ; ver anexo N), donde el mejor ajuste corresponde a la asociación lineal

(ver figura 4). Se observa que la variabilidad del oxígeno disuelto depende en un 21,8 % del incremento en los días de muestreo.

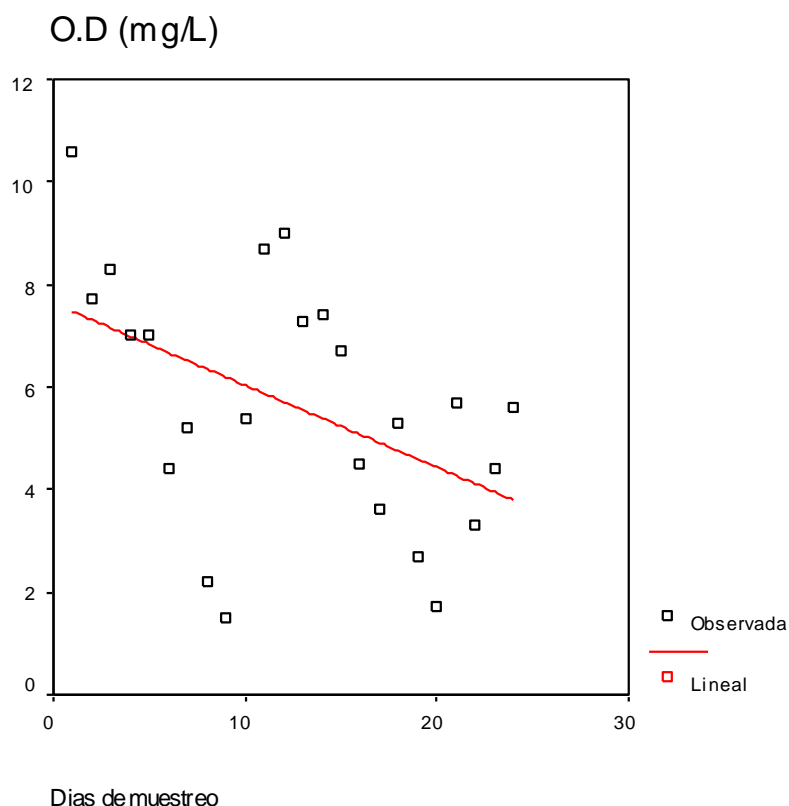


Figura 4. Curva de mejor ajuste oxígeno disuelto (O.D)

El valor promedio de oxígeno disuelto del efluente corresponde a un valor aceptable para el cuerpo de agua receptor, ya que está por encima de los 4 mg/L, valor en el cual en aguas naturales se pueden evitar efectos perjudiciales sobre la vida acuática. La diferencia entre la media (5,633 mg/L) y el valor de referencia (4 mg/L) es de 1,633, por lo cual se concluye que en promedio el oxígeno disuelto es significativamente mayor que el valor de referencia ( $P = 0,003$ ).

#### 6.1.4 Demanda Bioquímica de Oxígeno ( $DBO_5$ ) y Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La  $DBO_5$  promedio fue de  $10,77 \pm 2,31$  mg/L en las etapas de levante y engorde y de  $16,93 \pm 0,61$  mg/L en cosecha, los cuales indican una calidad muy deficiente ( $> 4$  mg/L), para fines de potabilización del efluente, respecto a los criterios establecidos en el RAS 2000 (Título B, Tabla B.2.1); el comportamiento durante el muestreo fue variable (ver figura 5), la estimación

curvilínea no mostró significancia estadística ( $P > 0,05$ ; ver anexo N), los puntos no se ajustaron a ninguna curva tendencia. Se realizó la prueba T para comparar el valor promedio de la demanda bioquímica de oxígeno con el valor de calidad del agua para abastecimiento, estipulado por el RAS 2000; se encontró que en promedio, la  $DBO_5$  es significativamente mayor que el valor de referencia (Diferencia de medias = 6,7658;  $P = 0,000$ )

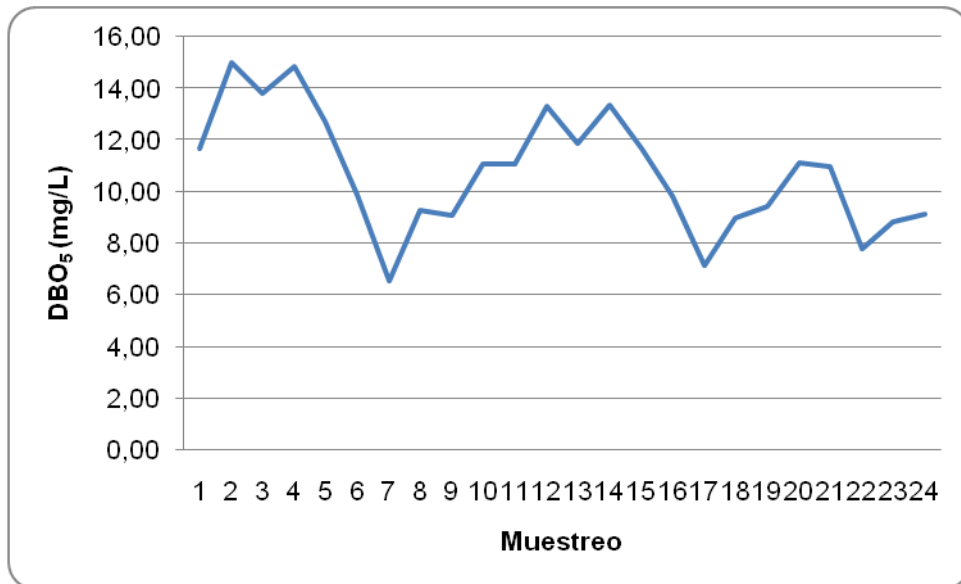


Figura 5. Variación demanda bioquímica de oxígeno ( $DBO_5$ )

Por otro lado los valores promedio de DQO en las etapas de levante y engorde fue de  $66,13 \pm 19,57$  mg/L y  $78 \pm 19,08$  mg/L en cosecha, son valores altos debido a la presencia de altas concentraciones de algas y sólidos suspendidos que elevan este parámetro, lo que indica la presencia de contaminantes orgánicos. Se identificó una asociación cúbica (ver figura 6), la cual se ajustaba con mayor significancia a la tendencia de los puntos ( $P = 0,012$ ;  $R^2 = 0,417$ ; ver anexo N). Se observó que la variabilidad de DQO depende en un 41,7% del incremento en los días de muestreo.

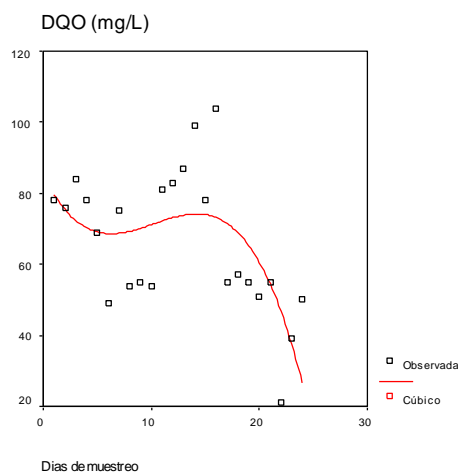


Figura 6. Curva de mejor ajuste demanda química de oxígeno (DQO)

Debido a los altos valores de DQO (21-104 mg/L) se realizó el ensayo DQO filtrada (17 - 48,5 mg/L) para observar su comportamiento y se obtuvo que esta se redujo a la mitad del valor inicial, aproximadamente (ver figura 7). Esto corrobora la presencia de algas que proporcionan un exceso de sólidos suspendidos en las muestras.

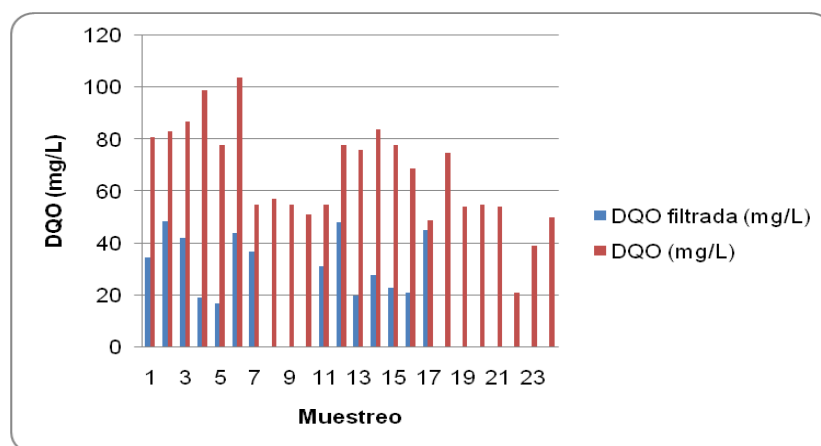


Figura 7. Variación demanda química de oxígeno

La DBO<sub>5</sub> y DQO en el evento de cosecha presentaron un incremento (57 % en DBO<sub>5</sub> y 18 % en DQO) respecto a las etapas de levante y engorde, como se observa en La figura 8, debido a los sólidos incorporados al efluente por el movimiento del agua en el evento de cosecha que resuspende los lodos sedimentados en los estanques de tilapia. Según la prueba no paramétrica existe un efecto significativo de la cosecha sobre la demanda bioquímica de oxígeno respecto a las etapas de levante y engorde ( $P = 0,005$ ), es decir, la calidad del efluente disminuye en cosecha.

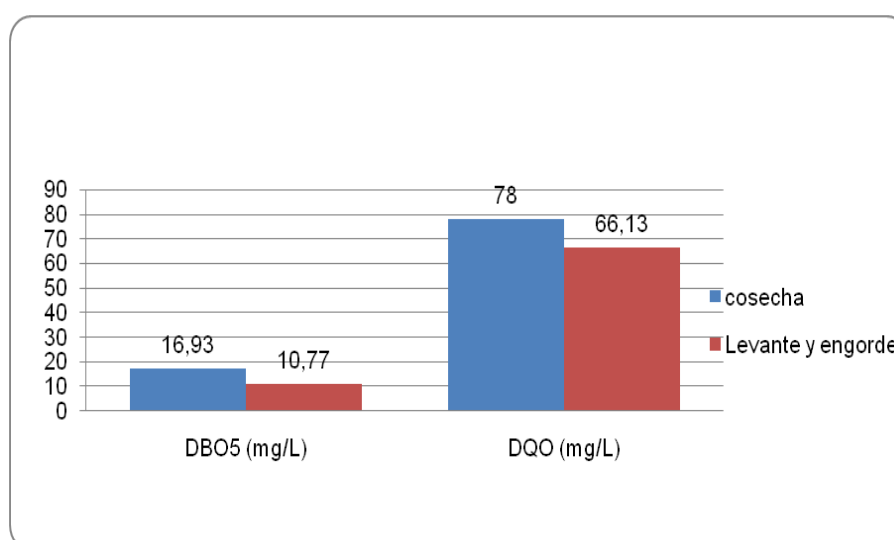


Figura 8. Comparación DBO<sub>5</sub> y DQO etapa de levante-engorde y cosecha

El valor máximo de DBO<sub>5</sub> en las etapas de levante y engorde fue de 15,0 mg/L, que corresponde a la materia orgánica generada por restos de alimento, excretas y biomasa. El valor mínimo de DBO<sub>5</sub> fue 6,53 mg/L, este descenso se



presentó por efecto de la dilución debido a las constantes precipitaciones que se presentaron en ciertos períodos del muestreo. La relación  $DBO_5/DQO$  para las etapas de levante y engorde es de 0,1628, lo cual indica que este efluente no se considera altamente biodegradable, ya que para que un agua residual se considere altamente biodegradable la relación  $DBO_5/DQO$  debe ser mayor a 0.3 (RAS 2000, Bloque 1; A1.14).

Los límites máximos de vertimiento permitidos son utilizados con base en cada caso y el valor numérico del criterio de calidad estándar depende de la naturaleza del efluente y de las características de cuerpo receptor (Boyd, 2003). Por ejemplo el efluente de una granja para el cultivo de camarón se puede descargar a cuerpos de agua con una  $DBO_5$  máxima de 30 mg/L (Boyd y Gautier, 2000; citado por Boyd, 2003). El cual comparado con el efluente de la estación piscícola de la Yunga es tres veces superior. Por otro lado, la Corporación Internacional de Finanzas de Washington (1998; citado por Boyd, 2003) sugiere que para efluentes líquidos el valor máximo de  $DBO_5$  es de 50 mg/L, este valor es el mismo para efluentes piscícolas. Para un caudal 1 L/s la carga de materia orgánica generada es de 0,0279 Ton/mes y 0,1714 Ton/mes para  $DBO_5$  y DQO, respectivamente, en las etapas de levante y engorde. Comparada con la carga orgánica de  $DBO_5$  generada en la estación piscícola de Pambío es menor, la cual reporta un valor de 0,067 Ton/mes (De la Cruz y Salazar, 2007).

### **6.1.5 Sólidos Suspendidos Totales**

El valor promedio de los sólidos suspendidos en las etapas de levante y engorde fue de  $56,83 \pm 20,72$  mg/L y en el evento de cosecha fue de  $104,67 \pm 12,06$  mg/L, el comportamiento de éstos durante el período de muestreo fue decreciente, hecho que se atribuye al efecto de la dilución por las frecuentes precipitaciones en el sitio de estudio. Mediante la estimación curvilínea se estableció que había significancia estadística ( $P = 0,027$ ;  $R^2 = 0,203$ ; ver anexo N) y que la curva de mejor ajuste es la exponencial (ver figura 9). La variabilidad observada de los sólidos suspendidos totales depende en un 20,3 % del incremento en los días de muestreo.

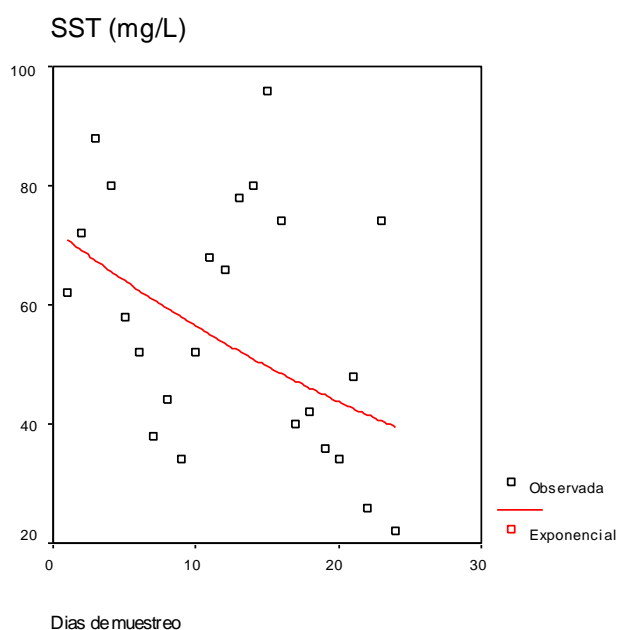


Figura 9. Curva tendencia sólidos suspendidos totales (SST)

Para un caudal 1 L/s la carga de sólidos generada es de 0,15 Ton/mes para las etapas de levante y engorde, aunque el valor en sí es bajo comparado con otros efluentes piscícolas como el de tilapia en la piscifactoría Pambío y el de trucha en la piscícola de Quintero que reportan cargas de sólidos máxima de 36,5 Ton/mes con un caudal promedio de 12,5 L/s (De la Cruz y Salazar, 2007) y 1,5 Ton/mes con un caudal promedio de 59,33 L/s (García y Yasnó, 2007), respectivamente.

El valor máximo que se puede descargar de sólidos suspendidos sugerido por la Corporación de finanzas internacional de Washington (1998; citado por Boyd, 2003), es de 50 mg/L para efluentes líquidos, el cual es el mismo valor recomendado por Boyd y Gautier (2000; citado por Boyd, 2003) para efluentes de una granja para el cultivo de camarón. El efluente presentado en la estación piscícola de la yunga es superior a los valores recomendados por consiguiente se requiere de algún tipo de tratamiento para disminuir la cantidad de sólidos suspendidos y descargar directamente sobre el cuerpo receptor. A través de la prueba no paramétrica se estableció que existe un efecto significativo ( $P = 0,007$ ) de la cosecha sobre los SST, respecto a las etapas de levante y engorde, pues estos aumentan durante la actividad de pesca.

### 6.1.6 Alcalinidad

En la mayoría de los ensayos la alcalinidad a la fenolftaleína (F) fue cero y se comparó con la alcalinidad total (M), obteniéndose que la alcalinidad a la

fenolftaleína es menor que un medio de la alcalinidad total ( $F < (1/2) * M$ ), esto quiere decir, que las especies presentes son  $\text{CO}_3^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$ . En el caso de la cosecha la alcalinidad a la fenolftaleína fue 3,33 mg  $\text{CaCO}_3/\text{L}$ .

La alcalinidad total promedio en las etapas de levante y engorde fue de  $15,28 \pm 3,44$  mg  $\text{CaCO}_3/\text{L}$  y en el evento de cosecha fue de  $20 \pm 6,00$  mg  $\text{CaCO}_3/\text{L}$ , los cuales están muy por debajo del valor máximo permisible (100 mg/L, decreto 475 de 1998, cap. III, art 8, literal b) para agua potable.

La tendencia de la alcalinidad total durante el muestreo fue variable en un rango amplio entre 10 y 24 mg  $\text{CaCO}_3/\text{L}$  (ver Figura 10); no se encontró significancia estadística ( $P > 0,05$ ; ver anexo N), los datos no se ajustaron a ninguna curva de tendencia. Se realizó la prueba T para comparar el valor promedio de la alcalinidad con el valor de calidad para agua potable estipulado por el decreto 475 de 1998 (cap. III, art 8, literal b); encontrando que en promedio, la alcalinidad es significativamente menor que el valor de referencia (Diferencia de medias = - 84,7167;  $P = 0,000$ ).

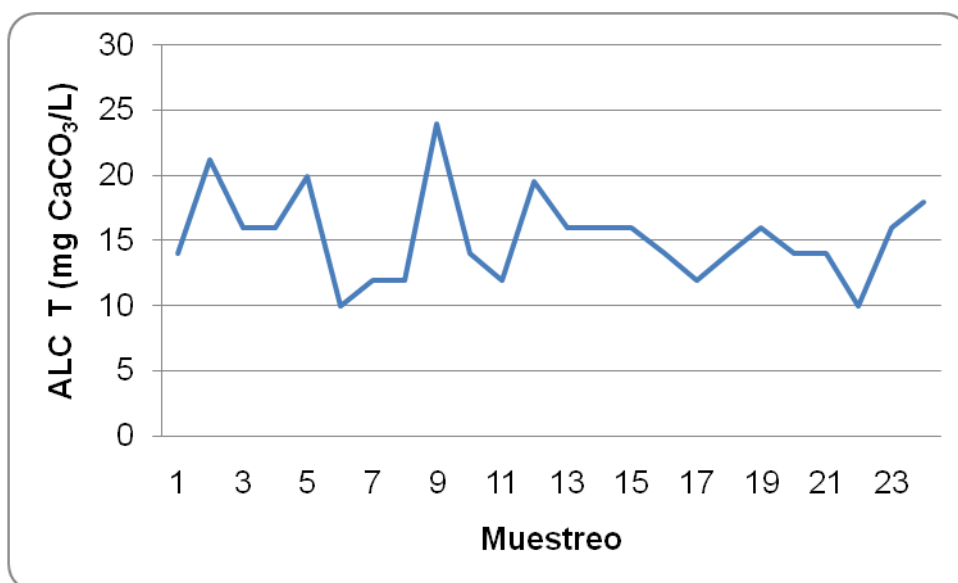


Figura 10. Variación alcalinidad total (ALC T)

### 6.1.7 Nitrógeno

El valor promedio de nitrógeno amoniacal fue  $0,29 \pm 0,16$  mg/L y el nitrógeno total fue de  $1,49 \pm 0,79$  mg/L en las etapas de levante y engorde, los cuales son acordes con los criterios de calidad admisibles ( $< 10$  mg/L, Decreto 1594 de 1984, cap IV, art 38) para la destinación del recurso para consumo humano y doméstico, e indican que para su potabilización se requiere tratamiento convencional. La carga contaminante de nitrógeno amoniacal y nitrógeno total generada para un caudal de 1 L/s es de 0,0008 Ton/mes y 0,0039 Ton/mes,

respectivamente, en las etapas de levante y engorde. Además, este efluente desde el punto de vista de descarga de nitrógeno amoniacal comparado con el efluente de una granja para el cultivo de camarón no presenta problema ya que esta se puede descargar con 3 mg/L nitrógeno amoniacal (Boyd y Gautier, 2000; citado por Boyd, 2003) el cual es superior al presentado en la estación piscícola de la Yunga.

El nitrógeno inicialmente tendió a disminuir, sin embargo presentó incremento durante cierto tiempo y finalmente disminuyó; este comportamiento variable se atribuye al efecto de la dilución sobre el efluente, ya que se presentaron constantes precipitaciones durante el muestreo. Se realizó la estimación curvilínea y se encontró significancia tanto para  $\text{NH}_3\text{-N}$  ( $P= 0,016$ ;  $R^2 = 0,327$ ; ver anexo N) como para NT ( $P= 0,001$ ;  $R^2 = 0,586$ ; ver anexo N), las curvas de tendencia que mejor se ajustaron fueron cuadrática y cúbica, respectivamente (ver figuras 10 y 11). La variabilidad observada en  $\text{NH}_3\text{-N}$  depende en un 32,7 % del incremento en los días de muestreo y la variabilidad observada en NT depende en un 58,6 % del incremento en los días de muestreo. Por otro lado la cosecha tiene un efecto significativo sobre el  $\text{NH}_3\text{-N}$  ( $P = 0,010$ ) y sobre el NT ( $P = 0,018$ ) respecto a las etapas de levante y engorde.

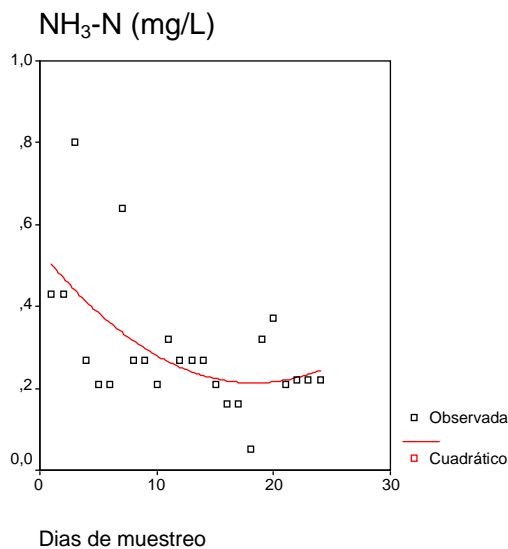


Figura 11. Curva de mejor ajuste nitrógeno amoniacal ( $\text{NH}_3\text{-N}$ )

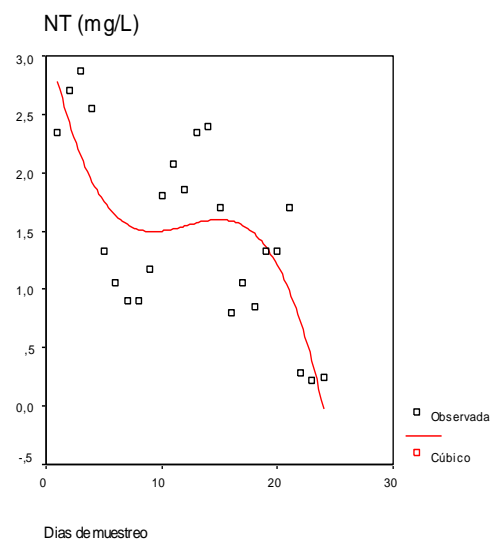


Figura 12. Curva de mejor ajuste nitrógeno total (NT)

El efluente de la estación piscícola la Yunga presenta bajos niveles de nutrientes por lo que es poco probable que se presente el proceso de eutrofización, ya que el vertimiento de un efluente rico en nutrientes favorece la liberación adicional del fósforo y el nitrógeno contenidos, acelerando dicho proceso (Molina y Vergara, 2005).

### 6.1.8 Fósforo

El valor promedio del fósforo total fue  $0,07 \pm 0,02$  mg/L en las etapas de levante y engorde y  $0,130 \pm 0,00$  mg/L en el evento de cosecha, su comportamiento fue variable durante el muestreo (ver figura 13); no se encontró significancia estadística ( $P > 0,05$ ; ver anexo N), la tendencia de los puntos no se ajustó a ninguna curva de tendencia. El evento de cosecha afecta de manera significativa ( $P = 0,005$ ) este parámetro en comparación con el efecto que causan las etapas de levante y engorde.

La carga contaminante de fósforo total generada para un caudal de 1 L/s es de 0,0001 Ton/mes, en las etapas de levante y engorde. El efluente respecto a éste parámetro no presenta problemas comparado con el efluente de una granja para el cultivo de camarón el cual recomienda 0,3 mg/L de fosforo total para vertimiento (Boyd y Gautier, 2000; citado por Boyd, 2003).

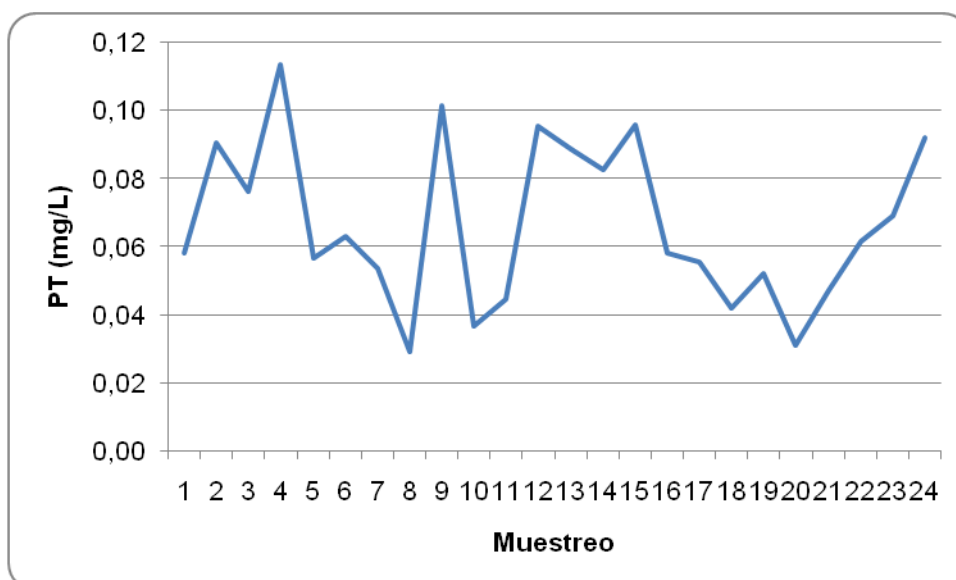


Figura 13. Variación fósforo total (PT)

Estadísticamente los resultados de la caracterización del efluente muestran que el oxígeno disuelto, la demanda química de oxígeno, el nitrógeno amoniacal, el nitrógeno total y los sólidos suspendidos totales se ajustaron a ciertas curvas de tendencia ( $P < 0,05$ ); sin embargo, el coeficiente de determinación ( $R^2 < 6$ ) muestra que el ajuste es muy pobre. Por otro lado se determinó que el evento de cosecha tiene un efecto significativo ( $P < 0,05$ ) sobre la calidad del efluente comparado con las etapas de levante y engorde, es decir, disminuye su calidad en los siguientes parámetros: oxígeno disuelto, pH, demanda bioquímica de oxígeno, nitrógeno, fósforo y sólidos suspendidos totales.

El efluente de la estación piscícola la Yunga en la mayoría de los parámetros evaluados cumple con los criterios de calidad establecidos en el decreto 1594 de 1984 y el RAS 2000; por otro lado las cargas contaminantes, comparadas

con los efluentes de trucha en la piscícola de Quintero y tilapia en la piscifactoría de Pambio, son bajas. Sin embargo por las concentraciones que presenta en DBO<sub>5</sub> (10.77 mg/L), DQO (66.13 mg/L) y SST (56.83 mg/L) se cataloga este efluente de mala calidad. Además, indica que su tratamiento, es difícil por la alta dilución que presenta.

## 6.2 CRECIMIENTO Y ADAPTACIÓN DE DUCKWEED Y AZOLLA A LAS CONDICIONES AMBIENTALES DEL EFLUENTE DE TILAPIA ROJA EN LA ESTACIÓN PISCÍCOLA LA YUNGA

Se encontró que duckweed descubierta presentaba color amarillento en la superficie y rojizo en el envés (ver foto 7 y 8) a diferencia de la que estaba cubierta con polisombra, la cual se observaba verde. En el caso de azolla se observó un color rojizo en ambas etapas (ver foto 9) notándose mayor intensidad en la azolla descubierta, además de presentar deterioro y desprendimiento.



Foto 7. Comparación duckweed



Foto 8. Coloración duckweed descubierta



Foto 9. Comparación azolla

Por el comportamiento observado respecto al color en ambas plantas, se encontró que la luz solar es un factor limitante en el desarrollo adecuado de duckweed y azolla, por tanto éste debe ser controlado para garantizar su desarrollo. Bajo ciertas condiciones, existe un pigmento de antocianina, que le confiere al helecho un color entre rojiza y carmelita. La coloración mencionada está asociada con la sobre fertilización del reservorio acuático, mucha contaminación o también un exceso de luz solar. Azolla prefiere más un lugar sombreado que estar a plena luz solar (Ly, 2004).

Los resultados del comportamiento del peso de la semilla de azolla y duckweed a través del tiempo se presentan a continuación en la tabla 6.

Tabla 6. Peso de la semilla de azolla y duckweed a través del tiempo

FECHA	DÍA	AZOLLA						DUCKWEED					
		1AD	1A'D	2AD	2A'D	3AC	3A'C	1DD	1D'D	2DD	2D'D	3DC	3D'C
02/03/09	0	10	10	5	5	5	5	10	10	5	5	5	5
02/04/09	1	10,2223	10,7956	5,7077	5,3049	5,2856	5,1422	10,536	10,27	5,3307	5,6613	5,0488	5,7264
02/06/09	3	10,9105	10,9466	5,9379	5,6109	5,3264	5,2163	10,775	10,59	5,87	6,2399	5,4732	5,8376
02/09/09	6	11,2419	11,1811	6,5545	5,6749	5,5316	5,3659	11,335	10,74	6,5409	7,005	5,6451	5,9355
02/11/09	8	11,8318	11,6997	7,1351	6,9894	5,5846	5,4111	11,425	11,15	7,0401	7,6215	6,0423	6,0053

1AD y 2AD: contenedor con azolla descubierta; 3AC: contenedor con azolla cubierta con polisombra; 1A'D, 2A'D y 3A'C: corresponden a las replicas de cada etapa de azolla; 1DD y 2DD: contenedor con duckweed descubierta; 3DC: contenedor con duckweed cubierta con polisombra; 1D'D, 2D'D y 3D'C: corresponden a las replicas de cada etapa de duckweed.

El crecimiento de estas plantas fue ascendente, en la figura 14 y 15 se observa que azolla y duckweed descubiertas presentan mayor crecimiento, respectivamente.

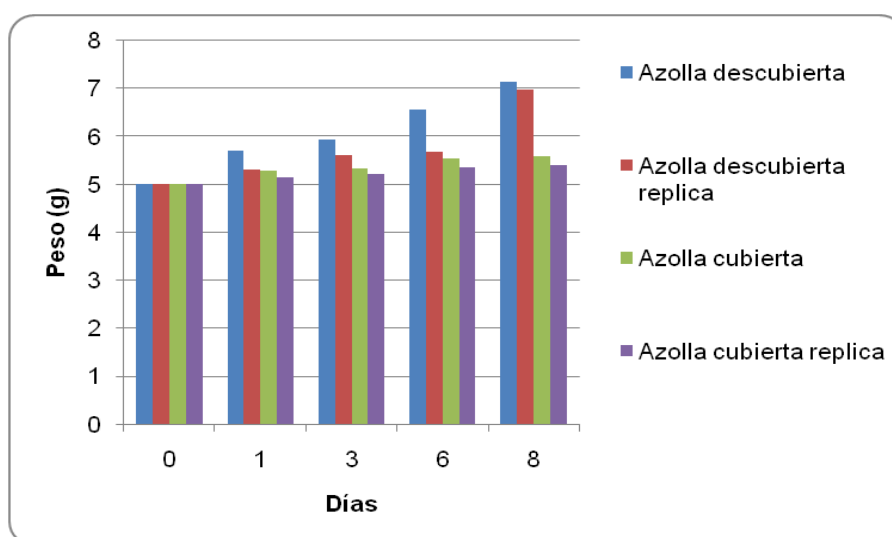


Figura 14. Comportamiento del peso de azolla a través del tiempo



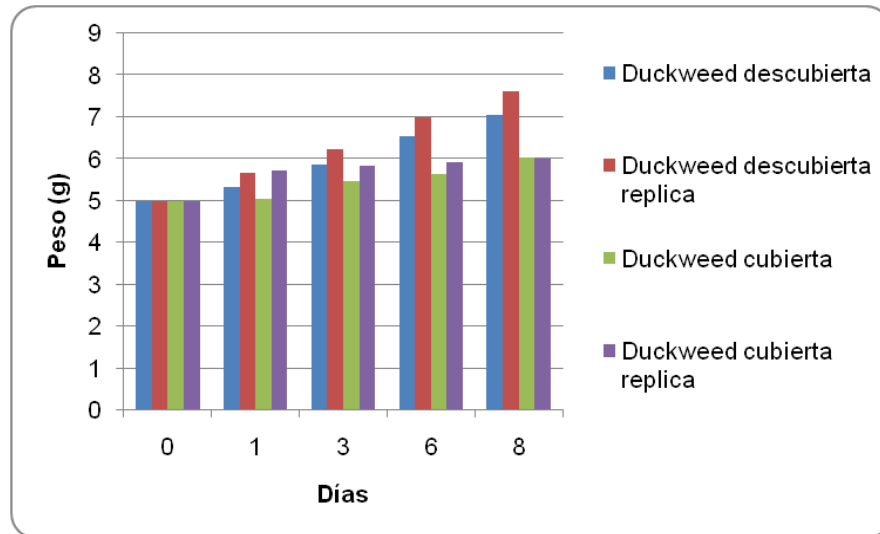


Figura 15. Comportamiento del peso de duckweed a través del tiempo

Los resultados del cálculo de la tasa relativa de crecimiento de duckweed y azolla se presentan a continuación en la tabla 7.

Tabla 7. Tasa relativa de crecimiento (TRC) duckweed (D) y azolla (A)

FECHA	AZOLLA						DUCKWEED					
	1AD	1A'D	2AD	2A'D	3AC	3A'C	1DD	1D'D	2DD	2D'D	3DC	3D'C
TRC (g/día)	0,23	0,21	0,27	0,25	0,07	0,05	0,18	0,14	0,26	0,33	0,13	0,13
TRC (g/m <sup>2</sup> *día)	27,48	25,50	32,03	29,84	8,77	6,17	21,38	17,21	30,61	39,33	15,64	15,08
TRC <sub>prom</sub> (g/m <sup>2</sup> *día)	26,49		30,93		7,47		19,29		34,97		15,36	

1AD y 2AD: contenedor con azolla descubierta; 3AC: contenedor con azolla cubierta con polisombra; 1A'D, 2A'D y 3A'C: corresponden a las replicas de cada etapa de azolla; 1DD y 2DD: contenedor con duckweed descubierta; 3DC: contenedor con duckweed cubierta con polisombra; 1D'D, 2D'D y 3D'C: corresponden a las replicas de cada etapa de duckweed.

En este experimento la tasa relativa de crecimiento de azolla fue 30,93 g/m<sup>2</sup>\*día y la de duckweed fue 34,97 g/m<sup>2</sup>\*día (ver anexo M), para una densidad inicial de siembra de 600 g/m<sup>2</sup>\*día, respectivamente.

La tasa relativa de crecimiento de duckweed calculada en el presente estudio es baja (34,97 g/m<sup>2</sup>\*día, para una densidad de 600 g/m<sup>2</sup>\*día) comparada con las tasas de crecimiento de duckweed reportadas por otros autores; Skillicorn *et al.*, (1993) reportan que en el programa experimental de Mirzapur para una densidad de 600 g/m<sup>2</sup>\*día la tasa relativa de crecimiento de *Spirodela* está entre 50-150 g/m<sup>2</sup>\*día y Caicedo *et al.*, (2005) reportan que en un sistema con pretratamiento la producción de biomasa fresca esta en un rango de 54 – 90 g/m<sup>2</sup>\*día para *Spirodela polyrrhiza* (NH<sub>3</sub>-N 30,5 ± 5,3 mg/L y PT 6,8 ± 2,0 mg/L) y en un sistema sin pretratamiento es de 36 – 84 g/m<sup>2</sup>\*día (NH<sub>3</sub>-N 26,4 ± 4,4 mg/L y PT 6,8 ± 1,8 mg/L).

Las tasas relativas de crecimiento reportadas por estos autores en comparación con la calculada en este estudio, son mayores debido a que estos efluentes presentan mayor concentración de nutrientes (fósforo y nitrógeno). El

factor que afectó, principalmente, el crecimiento de duckweed fue la baja concentración de nutrientes (0,07 mg/L PT, 0,29 mg/L NH<sub>3</sub>-N, 1,49 mg/L NT) presentes en el efluente piscícola. De acuerdo con Lasfar *et al* (2007) otros factores limitantes son fotoperíodo y temperatura, los rangos óptimos para el crecimiento de duckweed corresponden a 13 h y 26 °C, respectivamente.

En la tabla 8 se presentan los datos de comparación de la tasa relativa de crecimiento por día según la especie (Duckweed y Azolla).

Tabla 8. Comparación tasa relativa de crecimiento por día

TASA RELATIVA DE CRECIMIENTO POR DIA (g/m <sup>2</sup> *d)									
		AZOLLA				DUCKWEED			
		AD	A'D	AC	A'C	DD	D'D	DC	D'C
FECHA	DÍA	5 g	5 g	5 g	5 g	5 g	5 g	5 g	5 g
03/02/2009	0	-	-	-	-	-	-	-	-
04/02/2009	1	84,93	36,59	34,28	17,07	39,69	79,37	5,86	87,18
06/02/2009	3	37,52	24,44	13,06	8,65	34,80	49,60	18,93	33,51
09/02/2009	6	31,09	13,50	10,63	7,32	30,82	40,10	12,90	18,71
11/02/2009	8	32,03	29,84	8,77	6,17	30,61	39,33	15,64	15,08

AD: azolla descubierta; A'D: azolla descubierta copia; AC: azolla cubierta; A'C: azolla cubierta copia; DD: duckweed descubierta; D'D: duckweed descubierta copia; DC: duckweed cubierta; D'C: duckweed cubierta copia.

En la figura 16 se puede observar que Azolla descubierta (AD) presenta mayor tasa de crecimiento; la mejor asociación que se ajusta a la tendencia de los datos es la polinómica ( $R^2 = 0,971$ ), es decir, la variabilidad observada en la tasa relativa de crecimiento de azolla depende en un 97,1% del incremento en los días de muestreo.

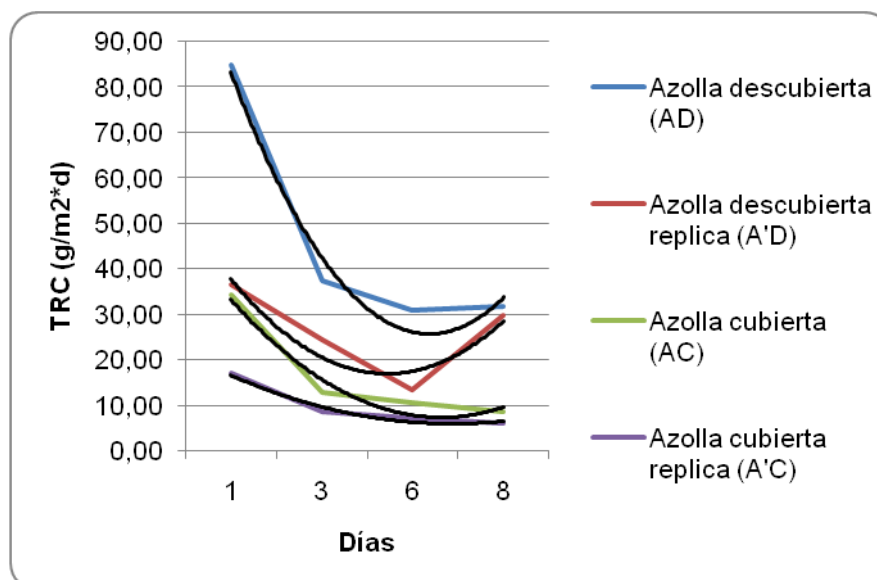


Figura 16. Comparación de la TRC de Azolla por día

En la figura 17 se puede observar que Duckweed descubierta (D'D) presenta mayor tasa de crecimiento; mediante el coeficiente de determinación ( $R^2 =$

0,993) se estableció que la mejor asociación que se ajusta a la tendencia de los datos es la polinómica, es decir, la variabilidad observada en la tasa relativa de crecimiento de duckweed depende en un 99,3% del incremento en los días de muestreo.

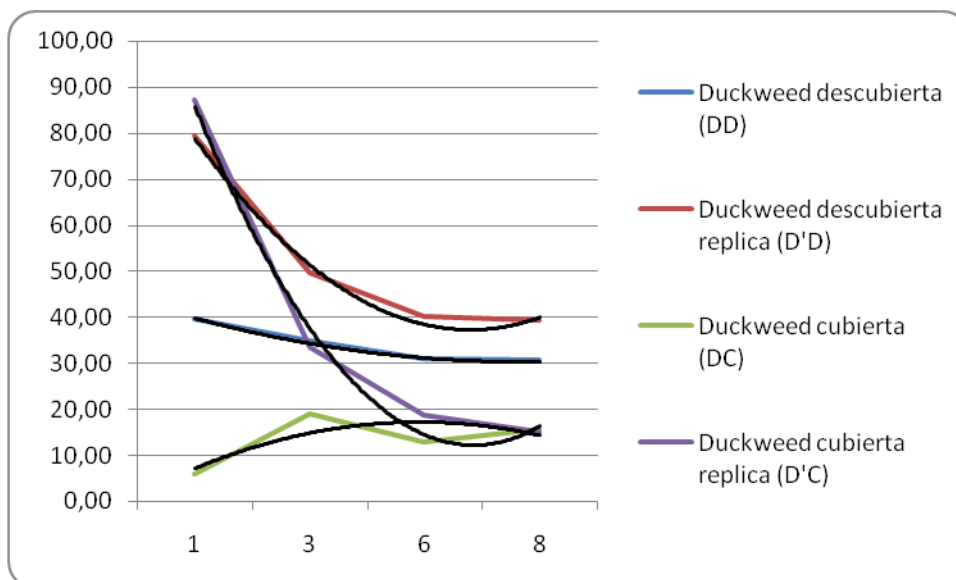


Figura 17. Comparación de la TRC de Duckweed por día

En la tabla 9 se presentan los datos de comparación de la tasa relativa de crecimiento por día según la densidad inicial de siembra.

Tabla 9. Comparación tasa relativa de crecimiento por día según la densidad inicial de siembra

COMPARACIÓN TASA RELATIVA DE CRECIMIENTO POR DIA ( $g/m^2*d$ ) SEGÚN DENSIDAD									
		AZOLLA				DUCKWEED			
		1AD	1A'D	2AD	2A'D	1DD	1D'D	2DD	2D'D
FECHA	DÍA	10 g	10 g	5 g	5 g	10 g	10 g	5 g	5 g
DENSIDAD INICIAL ( $g/m^2*d$ )		1200		600		1200		600	
02/03/2009	0	-	-	-	-	-	-	-	-
02/04/2009	1	26,68	95,48	84,93	36,59	64,32	32,32	39,69	79,37
02/06/2009	3	36,42	37,87	37,52	24,44	30,99	23,67	34,80	49,60
02/09/2009	6	24,84	23,62	31,09	13,50	26,71	14,87	30,82	40,10
02/11/2009	8	27,48	25,50	32,03	29,84	21,38	17,21	30,61	39,33

1AD: azolla descubierta; 1A'D: azolla descubierta copia; 2AD: azolla descubierta; 2A'D: azolla descubierta copia 1DD: duckweed descubierta; 1D'D: duckweed descubierta copia; 2DD: duckweed descubierta; 2D'D: duckweed descubierta copia.

NOTA: Para el numeral 1 la densidad inicial de siembra corresponde a  $1200 g/m^2*d$  y para el numeral 2 la densidad inicial de siembra corresponde a  $600 g/m^2*d$

En la figura 18 se puede observar que azolla descubierta (2AD) con densidad inicial de siembra de  $600 g/m^2*d$  es la que presenta mayor tasa de crecimiento; sin embargo, se distingue una competencia marcada con azolla descubierta (1A'D) con densidad de siembra inicial de  $1200 g/m^2*d$ ; la mejor asociación que

se ajusta a la tendencia de los datos es la polinómica tanto para 2AD ( $R^2 = 0,971$ ) como para 1A'D ( $R^2 = 0,989$ ); se observó que la variabilidad de la tasa relativa de crecimiento de 2AD y 1A'D dependen en un 97,1% y 98,9 % del incremento en los días de muestreo, respectivamente.

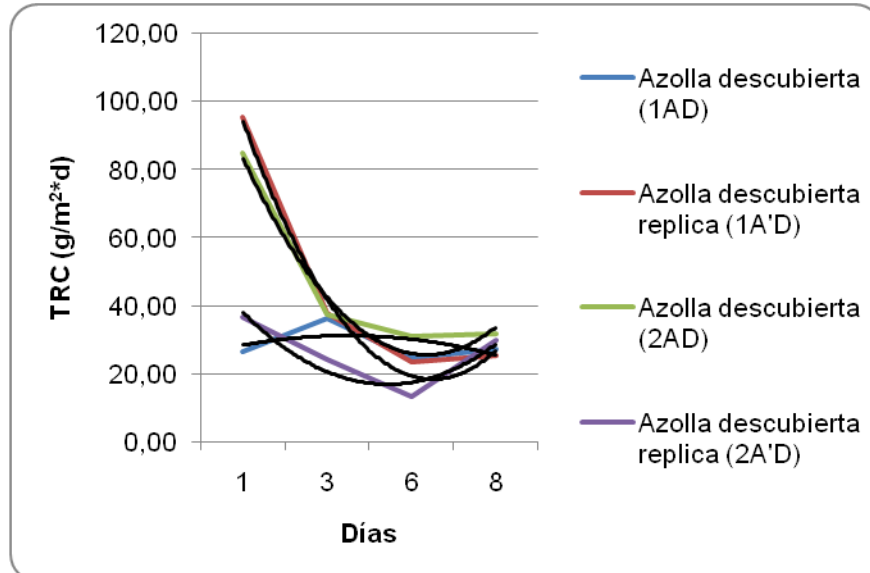


Figura 18. Comparación densidad inicial de siembra de azolla por días.

En la figura 19 se observa que duckweed descubierta (2D'D) con densidad inicial de siembra de  $600 \text{ g/m}^2\text{*d}$ , presenta mayor tasa de crecimiento; por tanto se sugiere esta densidad inicial de siembra; a través del coeficiente de determinación ( $R^2 = 0,993$ ) se pudo observar que la variabilidad de la tasa de crecimiento de duckweed depende en un 99,3% del incremento en los días de muestreo.

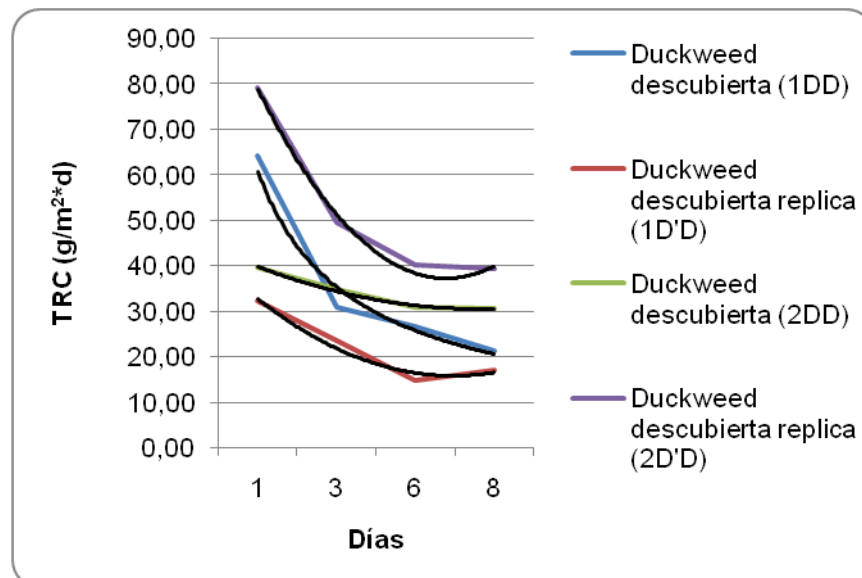


Figura 19. Comparación densidad inicial de siembra de duckweed por días.

Las gráficas 18 y 19 muestran que entre el sexto y octavo día se estabiliza la tasa relativa de crecimiento tanto para azolla como para duckweed, por lo cual se sugiere cosecharlas en este período. Gráfica y numéricamente se determinó que la densidad inicial de siembra adecuada para duckweed y azolla es de 600 g/m<sup>2</sup>\*día, ya que, particularmente para duckweed con una densidad mayor el hacinamiento de las plantas inhibe su crecimiento (Willett, 2005).

La deficiencia de fósforo y nitrógeno en el efluente de la estación piscícola la Yunga limitaron el crecimiento de duckweed ya que en condiciones adecuadas el cultivo de duckweed convierte importantes cantidades de nutrientes en biomasa; cuando se desarrollan las colonias de duckweed éstas utilizan los nutrientes y minerales disueltos en la columna de agua y los convierten en tejido vegetal (Skillicorn *et al.*, 1993)

Duckweed presentó estrés térmico que se evidenció por la coloración rojiza de la planta tanto en el experimento a escala de laboratorio como en la planta piloto (ver anexo O); la capa de duckweed que flota en la superficie del estanque se calienta en el sol mucho más rápido que la columna de agua debajo de ésta. La incidencia de la luz solar puede dañar el cultivo (Skillicorn *et al.*, 1993) ya que la capa de duckweed absorbe y refleja la radiación solar (krishna y Polprasert, 2008). Para mitigar el estrés térmico se construyó un techo en la planta piloto y se procedió a cubrir el cultivo con polisombra (ver foto 10), de la misma manera como se hizo en el experimento a escala de laboratorio; la planta mejoró la apariencia pero el tamaño de las frondas se redujo (ver foto 11).



Foto 10. Readecuación planta piloto



Foto 11. Apariencia duckweed después de cubrir

En términos de pH, se encontró que pH elevados ( $> 9,5$ ) tienen un efecto inhibitorio sobre el crecimiento de duckweed. Ello ocasionaría que nunca se cubra completamente una laguna de duckweed donde exista alto crecimiento algal (Zirschy y Red, 1988; citado por Caicedo *et al.*, 2000; Willett, 2005)

En la planta piloto duckweed presentó un crecimiento casi nulo durante el muestreo, esto obedece a que los cultivos de duckweed son resistentes en términos de supervivencia, pero sensibles en términos de florecencia. Pueden sobrevivir y recuperarse de extremos de temperatura, cargas de nutrientes y pH. Sin embargo para el florecimiento del cultivo es necesario regular y mantener en límites razonables estos factores (Skillicorn *et al.*, 1993). Los resultados de crecimiento obtenidos en el experimento a escala de laboratorio confirman el bajo crecimiento de duckweed en la estación piscícola la Yunga; por otro lado azolla presentó mejor adaptación a las condiciones del efluente (ver foto 12 y 13).



Foto 12. Apariencia azolla en la planta piloto la Yunga



Foto 13. Apariencia duckweed en la planta piloto la Yunga

### **6.3 DESEMPEÑO DUCKWEED Y AZOLLA EN LA TRATABILIDAD DEL EFLUENTE DE TILAPIA ROJA EN LA ESTACIÓN PISCÍCOLA LA YUNGA**

Los resultados del desempeño de duckweed y azolla en el tratamiento del efluente, se presentan a continuación en la tabla 10.

Tabla 10. Parámetros fisicoquímicos evaluados en el tratamiento del efluente piscícola mediante duckweed y azolla.

SISTEMA	MUESTRA	T	O.D	pH	DBO <sub>5</sub>	DQO	PT	NH <sub>3</sub> -N	NT	ALC T	SST
		(°C)	(mg/L)	(und)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L CaCO <sub>3</sub> )
CONTINUO (24/03/09)	Azolla cubierta	23,5	4,80	6,94	9,73	55	0,09	0,40	2,15	22	54
	Duckweed cubierta	23,3	4,80	6,81	9,80	62	0,09	0,22	0,99	20	52
	Azolla descubierta	23,1	6,60	6,84	8,69	55	0,08	0,36	2,02	14	48
BATCH (31/03/09)	Azolla cubierta	20,3	8,40	6,61	5,72	12	0,00	0,45	2,46	18	22
	Duckweed cubierta	20,3	9,20	7,75	6,24	<10	0,00	0,18	0,72	16	18
	Azolla descubierta	20,2	9,70	6,45	4,23	<10	0,00	0,40	2,33	12	14

Comparando la calidad inicial del efluente con el efluente tratado, se encontró que la temperatura hídrica disminuyó de 25,53 °C a 23,3 °C en el sistema continuo y de 25,53 °C a 20,3 °C en el sistema batch, debido a la construcción del techo y al cubrimiento de los tanques de duckweed y azolla con polisombra.

El oxígeno disuelto aumentó, la concentración más alta se presentó en azolla descubierta tanto en el sistema continuo (6,6 mg/L) como en el batch (9,7 mg/L), esto obedece a la actividad fotosintética realizada por la planta, la cual confiere oxígeno al medio y por la interacción de la superficie con la atmósfera.

El pH disminuyó de 8,24 a 6,81 en el sistema continuo y de 8,24 a 6,45 en el sistema batch, debido a la baja presencia de algas en el medio. Por otro lado, se presentaron considerables decrementos en las concentraciones de materia orgánica (4,23 mg/L en DBO<sub>5</sub>, < 10 mg/L en DQO y 14 mg/L en SST) y consumo total de fósforo (PT), principalmente en el sistema batch con azolla descubierta.

Los resultados de las eficiencias de remoción de duckweed y azolla en el tratamiento del efluente, se presentan a continuación en la tabla 11.

Tabla 11. Eficiencias de remoción de duckweed y azolla

SISTEMA	MUESTRA	DBO <sub>5</sub> (%)	PT (%)	NH <sub>3</sub> -H (%)	NT (%)	SST (%)
CONTINUO (24/03/09)	Azolla cubierta	10	-34	-39	-44	5
	Duckweed cubierta	9	-24	23	34	8
	Azolla descubierta	19	-20	-24	-35	16
BATCH (31/03/09)	Azolla cubierta	47	100	-54	-65	61
	Duckweed cubierta	42	100	38	52	68
	Azolla descubierta	61	100	-39	-56	75

La eficiencia de remoción del sistema continuo en general fue baja, azolla descubierta presentó mayor remoción en DBO<sub>5</sub> (19%) y SST (16%) respecto a duckweed y azolla cubiertas con polisombra; mientras que duckweed muestra



mayor remoción en Nitrógeno amoniacal ( $\text{NH}_3\text{-N}$  23%) y Nitrógeno Total ( NT 34%). Por otro lado, hay incremento de fósforo en el sistema debido al desprendimiento de material vegetal proveniente de las plantas que reincorporan este nutriente al medio, por tanto no hay remoción. La eficiencia de remoción con plantas acuáticas depende en gran parte de las condiciones climáticas (luz solar y temperatura), tiempo de retención hidráulica, carga orgánica y densidad de la planta (krishna y Polprasert, 2008).

Azolla en ambos sistemas presenta incrementos en nitrógeno ( $\text{NH}_3\text{-N}$  y NT), esto obedece a que es una planta con alta actividad nitrogenásea y fijación de nitrógeno debido a su asociación con *Anabaena azollae*. Por otro lado, azolla es una planta muy perecedera, por lo cual el material vegetal degradado reincorpora N al medio.

El sistema Batch presenta mayor eficiencia de remoción en comparación al sistema continuo, esto se debe al consumo del sustrato por parte de las plantas, ya que durante el tiempo de retención (7 días) se restringe su entrada y salida, consumiéndose el sustrato disponible del medio; se destaca la azolla descubierta en la remoción de  $\text{DBO}_5$  (61%) y SST (75%) respecto a duckweed y azolla cubiertas con polisombra; mientras que duckweed se destaca por la remoción de nitrógeno ( $\text{NH}_3\text{-N}$  = 38 % y NT = 52 %).

De acuerdo con el decreto 1594 de 1984 la remoción obtenida en  $\text{DBO}_5$  y SST no cumple con lo establecido, ya que para el vertimiento a un cuerpo de agua debe alcanzar una remoción igual o superior al 80%. Esto corrobora la dificultad en el tratamiento del efluente de tilapia roja y la baja biodegradabilidad.

La remoción de materia orgánica y sólidos suspendidos totales obedece a la absorción directa de éstos por microorganismos asociados a las raíces de las plantas (Gamarra *et al*, 2006). Las raíces de las plantas actúan como medio filtrante, en el cual se adhieren los sólidos y remueve materia orgánica; además, la duckweed previene el crecimiento de algas que contribuyen al incremento de los sólidos (krishna y Polprasert, 2008). La remoción de fósforo y nitrógeno se lleva a cabo a través de la biofiltración, en el caso de duckweed.

Otros autores encontraron resultados similares, donde las tasas de remoción son altas, por ejemplo krishna y Polprasert (2008) reportaron máximas eficiencias de remoción de  $\text{DBO}_5$ ,  $\text{NH}_3\text{-N}$ , NT y SST de 88, 68, 58 y 87%, respectivamente, en el tratamiento de aguas residuales mediante un modelo cinético de remoción de materia orgánica y nutrientes basado en duckweed con un tiempo de retención de 10 días.

De acuerdo con los resultados se encontró mayor eficiencia en el sistema batch respecto al sistema continuo, se determinó que azolla es fijadora de nitrógeno y que duckweed no creció debido a las condiciones climáticas del sitio y no se adaptó a las características del efluente de tilapia roja. Comparando la calidad inicial del efluente (sin tratamiento) con la calidad de éste una vez tratado se

encontró que el tratamiento mejoró la calidad, por tanto se puede recircular para el cultivo de tilapia; sin embargo no es apto para el vertimiento del mismo sobre un cuerpo receptor ni tampoco es apto para el consumo humano según los criterios de calidad establecidos en el RAS 2000.

## 7 CONCLUSIONES

Se caracterizó el efluente del proceso productivo de tilapia roja en la estación piscícola la Yunga, de acuerdo con los resultados encontrados este se puede catalogar de mala calidad para el vertimiento del mismo sobre un cuerpo receptor y destinación del recurso para consumo humano y doméstico, debido a las concentraciones de  $\text{DBO}_5$  (10,77 mg/L), DQO (66,13 mg/L) y SST (56,83 mg/L) las cuáles indican que es necesario tratamiento. Por otro lado la dilución presente en el efluente hace difícil su tratamiento.

Se calculó la tasa relativa de crecimiento de duckweed  $34,97 \text{ g/m}^2\cdot\text{día}$ , para una densidad inicial de siembra de  $600 \text{ g/m}^2\cdot\text{día}$ . Las condiciones climáticas presentadas en la zona de estudio y el bajo contenido de nutrientes en el efluente no fueron adecuados para el crecimiento óptimo. La planta presentó altos niveles de estrés, deterioro y baja tasa relativa de crecimiento, en el transcurso del estudio no se observaron cambios en su desarrollo.

La tasa relativa de crecimiento de azolla calculada en este estudio fue  $30,93 \text{ g/m}^2\cdot\text{día}$ , para una densidad inicial de siembra de  $600 \text{ g/m}^2\cdot\text{día}$ , esta planta presentó mejor adaptabilidad a las condiciones ambientales del efluente.

Se evaluó la eficiencia de remoción de duckweed y azolla en el efluente de tilapia roja y se determinó que duckweed tiene mayor potencial para el tratamiento, sin embargo su crecimiento no es representativo; por otro lado se encontró que azolla es una planta fijadora de nitrógeno por tanto no es adecuada para la remoción de este nutriente.

La mayoría de los parámetros evaluados (PT,  $\text{NH}_3\text{-N}$ , NT) en este estudio presentaron altas remociones mejorando la calidad del efluente de tilapia roja, permitiendo su recirculación para uso pecuario; no obstante la remoción de  $\text{DBO}_5$  y SST (< 80%) no fue suficiente para el vertimiento de este efluente en un cuerpo receptor y no es apto para consumo humano y doméstico.

## 8 RECOMENDACIONES

Para garantizar un buen desarrollo y desempeño de duckweed se requiere cubrir la superficie del recipiente con una cantidad suficiente de la semilla, ya que la densidad es un factor importante para el crecimiento, una adecuada densidad inicial de siembra es  $600 \text{ g/m}^2 \cdot \text{d}$ .

Debido a la baja tasa relativa de crecimiento y mínima adaptabilidad a las características del efluente de tilapia roja, no se sugiere la utilización de duckweed para el tratamiento de este efluente.

La escasez de documentación sobre el tratamiento de efluentes piscícolas mediante el uso de duckweed hace necesario profundizar en este tipo de investigaciones que sirven de soporte para posteriores estudios.

Debido a que azolla es una planta muy perecedera y el hacinamiento de duckweed inhibe su crecimiento, se sugiere cosecharlas entre seis y ocho días.

## BIBLIOGRAFÍA

ACOSTA-Nassar M, MORELL J, Corredor J. The nitrogen budget of a tropical semi-intensive freshwater fish culture pond. *Journal of the World Aquaculture Society*. Mayagüez, Puerto Rico. 1994; 25:261-270.

AGUILERA, Cristóbal. Gestión de residuos y manejo ambiental, Curso de recirculación para acuicultura marina. Guadalajara, México 2006. P 7, 36.

ARGUELLO GÁLVEZ, José Darinel; ARIAS ESTRELLA, Domingo; CALDERÓN ROCHER, Lorena. Uso de la macrofitas sumergida *egeria densa* para el tratamiento de aguas residuales. Mérida, Yucatán. México 2000. P 3-4.

ARORA, Anju; SAXENA Sudhir Cultivation of *Azolla microphylla* biomass on secondary-treated Delhi municipal effluents. New Delhi, India. *Biomass and Bioenergy*. 2005; 29: 60-64.

ARORA, Anju; SINGH P.K. Comparison of biomass productivity and nitrogen fixing potential of *Azolla* spp. New Delhi, India. *Biomass Bioenergy*. 2003; 24: 175–178.

ARROYAVE, María del Pilar. La lenteja de agua (*lemna minor l.*): una planta acuática promisorio. *Revista EIA*, ISSN 1794-1237 Número 1 p. 33-38. Febrero 2004 Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín (Colombia).

BEVERIDGE, M.C.M. Piscicultura en jaulas y corrales. Modelos para calcular la capacidad de carga y las repercusiones en el ambiente. *FAO Doc. Téc. Pesca*. 1986; 255: 100.

BORJA GALLARDO, Francisco Javier; GONZÁLEZ SALCEDO, Luis Octavio; QUINTERO de VALLEJO, Victoria Eugenia. Diseño modelo de estanques climatizados para el cultivo de tilapia roja, *oreochromis sp*, localizados en la zona fría del Valle del Cauca, Colombia. Trabajo de grado Ingeniero Agrícola. Palmira: Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira. 2003. P 4.

BOYD, Claude E. Guidelines for aquaculture effluent management at the farm-level. Auburn, USA. *Aquaculture* 2003; 226: 101-112.

CAICEDO J. R., VAN DER STEEN N. P., ARCE O. and GIJZEN H. J. (submitted) Effects of total ammonium nitrogen concentration and pH on growth rate of duckweed (*Spirodela polyrrhiza*). Cali-Colombia. 2000. Wat. Res. 34 (15): 3829-3835.

CAICEDO, J.R; VAN DER STEEN, N.P; GIJZEN, H.J. Avances en el desarrollo de la tecnología de lagunas con lenteja de agua para la remoción de nitrógeno. Cali-Colombia. 2007. P 173-179.

CAICEDO, J.R; VAN DER STEEN, N.P; GIJZEN, H.J. The effect of anaerobic pre-treatment on the performance of duckweed stabilization ponds. Seminario Internacional sobre Métodos Naturales para el tratamiento de aguas residuales. Universidad del Valle/Instituto Cinara. Cali-Colombia. 2005. P 48-56.

CASTILLO CAMPO, Luis Fernando. La importancia de la tilapia roja en el desarrollo de la piscicultura en Colombia. Asociación Red Cauca, Alevinos del Valle. Cali-valle, Colombia. 2001. P 1-20.

CASTILLO CAMPO, Luis Fernando. Tilapia Roja 2003. Una evolución de 22 años, de la incertidumbre al éxito. Asociación Red Cauca, Alevinos del Valle. Cali-valle, Colombia. 2003. P 1-83.

CELIS HIDALGO, José; JUNOD MONTAÑO, Julio; SANDOVAL ESTRADA, Marco. Recientes aplicaciones de la depuración de aguas residuales con plantas acuáticas. Chillán-Chile. Theoria. 2005; 14 (1): 17-25.

CHARÁ O, Juan David. El potencial de las excretas porcinas para uso múltiple y los sistemas de descontaminación productiva. CIPAV. 1998. P

MORA, J; BERECIARTU G; GARRIDO A; TORRES N. Engorde de tilapia roja e híbridos de cachamas para el aprovechamiento de reservorios acuáticos en plantaciones de caña de azúcar en la región centroccidental de Venezuela. En: IV Encuentro Nacional de acuicultura (Marzo 18-21 de 1997. San Juan de los Morros). Memorias. Venezuela. 1997. P 210-226.

COLOMBIA. LOS MINISTERIOS DE LA PROTECCIÓN SOCIAL Y DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 475 de 1998 (Marzo 10). Por el cual se expiden normas técnicas de calidad del agua potable. Diario oficial. Bogotá, D.C, 1998. N°. 43259. P 8.

COLOMBIA. LOS MINISTERIOS DE LA PROTECCIÓN SOCIAL Y DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 1594 de 1984 (Junio 26). Por el cual se reglamenta el Título I de la ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III – Libro II del Título III de la Parte II Libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto al uso del agua y residuos líquidos. Diario oficial. Bogotá, D.C, 1984. N°. 36700.

DAME R, DANKERS N, PRINS T, JONGSMA H, SMAAL A. The influence of mussel beds on nutrients in the Western Wadden Sea and Eastern Scheldt Estuaries. 1991; 14 (2): 130-138.

DE LA CRUZ, Carlos Andrés y SALAZAR FERNANDEZ, Andrés Felipe. Caracterización y estudio de tratabilidad del efluente de estaciones piscícolas, Trabajo de grado Ingeniería Ambiental. Popayán: Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil. Ingeniería Ambiental. 2007. p 1-2.

EI-SHAFI, Fatma A; EI-GOHARY, Fayza A; NASR, N; VAN DER STEEN, Peter. GIJZEN, Huub. Nutrient recovery from domestic wastewater using a UASB-duckweed ponds system. Dokki, Egypt. Bioresource Technology. 2007; 98: 798-806.

ESPEJO-DIAZ, A; SÁNCHEZ, R; GONZÁLEZ, R; SILVA, A; VARGAS, A; MERCHÁN, P; NOUEL, G. Producción de biomasa de la lenteja de agua (lemna minor), fertilizada con estiércol de ovinos. Asociación latinoamericana de producción animal. Archivos latinoamericanos de producción animal. Lara, Venezuela. 2006; 14: 84-85

FAO 2003. El papel de la acuicultura en la mejora de la seguridad alimentaria y la nutrición. Comité de Seguridad Alimentaria Mundial, 29º período de secciones, Roma 12-14 Mayo 2003.

FORNI, C; CHEN, J; TANCIONI, L; GRILLI, M. Evaluation of the fern azolla for growth, nitrogen and phosphorus removal from wastewater. Great Britain. Water Res. 2001; 35 (6): 1592–1598.

GAMARRA HERNANDEZ, Yolanda; SARMIENTO FORERO, Juan; HIGUERA QUINTERO, Oscar; VILLAMIZAR RUEDA, Fredy; ACEVEDO AGUILAR, Fernanda. Evaluación de un modelo piloto integrado para postratamiento del efluente del RAP utilizando *Spirodela sp.* Bucaramanga, Colombia. Rev. Colomb. Biotecnol. 2006; 8(2): 5-15.

GARCIA RENDON, César Augusto y YASNÓ VARILA, José Julián. Selección y diseño de alternativas para el tratamiento de afluentes y efluentes del proceso de producción piscícola caso trucha en el municipio de Silvia Cauca, Trabajo de grado Ingeniería Ambiental. Popayán: Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Civil. Ingeniería Ambiental. 2007. P 17-18.

GOLDBURG, R.J., M.S. ELLIOTT, R.L. NAYLOR. Marine Aquaculture in the United States: Environmental Impacts and Policy Options. Pew Oceans Commission, Arlington, Virginia. 2001. P13-14

GROSS A, BOYD C, WOOD C. Nitrogen transformations and balance in channel catfish ponds. Auburn, USA. Aquacultural Engineering. 2000; 24: 1–14.

GRUPO DE TRATAMIENTOS AMBIENTALES DE LOS RECURSOS (GRUPOTAR). Estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR). Depuración de aguas residuales. Tratamiento terciario. Eliminación De Nutrientes. 2005.

HERMOSILLA, Jorge C, ROMERO I, MARTÍ E y CABAÑERO M.a D. Diferencias espaciales y estacionales en el contenido de nutrientes, demanda de oxígeno y potencial redox en sedimentos bajo una instalación de producción acuícola en jaulas. X Congreso Nacional de Acuicultura.Valencia, España 2005. P 29 – 33.

HERNANDEZ MUÑOZ, Aurelio. Depuración de aguas residuales. Madrid-España: Paraninfo S.A, 1998. P 474.

INSTITUTO NACIONAL DE PESCA (INAPE). Depto. Biología Pesquera. La piscicultura como complemento de la actividad agropecuaria, Montevideo, Uruguay. 1999. P 2-3.

ISLAM, Shahidul. Nitrogen and phosphorus budget in coastal and marine cage aquaculture and impacts of effluent loading on ecosystem: review and analysis towards model development. Kyoto, Japan. Marine Pollution Bulletin 2005; 50: 48–61.

KIGULI LN. The utilization of *Azolla filiculoides* Lam. as a biofertilizers under dry land conditions. . MSc thesis Rhodes University. 2000.

KRISHNA, K.C. POLPRASERT, Chongrak . An integrated kinetic model for organic and nutrient removal by duckweed-based wastewater treatment (DUBWAT) system Pathumthani, Thailand. Ecological engineering. 2008; 34: 243–250

LA CADENA DE LA PISCICULTURA EN COLOMBIA (AGROCADENAS), Una mirada global de su estructura y dinámica 1991-2005. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural Observatorio AgroCADENAS Colombia. 2005; 16: 1- 4.

LASFAR, Samir; MONETTE, Frédéric; MILLETTE, Louise; AZZOUZ, Abdelkrim. Intrinsic growth rate: a new approach to evaluate the effects of temperature, photoperiod and phosphorus-nitrogen concentration on duckweed growth under controlled eutrophication. Montréal, Canada. Water research. 2007; 41: 2333-2340

LETERME, Pascal; LONDOÑO, Angela M; MUÑOZ, Jaime E; SÚAREZ, Jeimmy; BEDOYA, Carlos A;SOUFFRANT, Wolfgang B; BULDGEN, André. Nutritional value of aquatic ferns (*Azolla filiculoides* Lam. and *Salvinia molesta* Mitchell) in pigs. Palmira, Colombia. Animal Feed Science and Technology. 2009; 149: 135–148.



LUCHINI, L. Tilapia: su cultivo y sistemas de producción. Dirección de Acuicultura. 2006. P 6.

LUMPKIN TA, PLUCKNETT DL. Azolla: botany, physiology and use as green manure. New York. Economic Botany 1980; 34(2): 111–153.

LY, Julio. Macrofitas acuáticas flotantes en sistemas integrados de producción animal. Habana, cuba. 2004. P 89-107

MAEJIMA, Kazuhiro; UHEDA, Eiji; KITO, Shunji; SHIOMI, Nobuyuki. Differences in growth rate, nitrogen fixation and numbers of cyanobionts and heterocysts among three *Azolla pinnata* var. *pinnata* strains. Osaka, Japan. Environmental and Experimental Botany. 2002; 47: 143–147.

MOLINA DOMÍNGUEZ L; VERGARA MARTÍN J. M. Impacto ambiental de jaulas flotantes: estado actual de conocimientos y conclusiones prácticas. Gran Canaria, España. Bol. Inst. Esp. Oceanogr. 2005; 21 (1-4): 75-79.

OBEK, E. and H. HASAR. 2002. Role of duckweed (*Lemna minor* L.) harvesting in biological phosphate removal from secondary treatment effluents. Fresenius Environmental Bulletin. 11:27-29 (Abstract).

PAPOUTSOGLU, S; DePauw, N; Joyce, J. Impact of aquaculture on aquatic environment in relation to applied production system. Special Publication, European Aquaculture Society. 1991. P 71-76.

PARDO, Sandra; SUAREZ, Héctor; SORIANO, Eduardo. Tratamiento de efluentes: una vía para la acuicultura responsable. Montería, Colombia. Rev. MVZ Córdoba. 2006; 11 Supl(1): 20-25.

PEDRAZA, G. Implementación y evaluación de un sistema de descontaminación de aguas servidas con plantas acuáticas. Maestría en Desarrollo Sostenible de Sistemas Agrarios. Universidad Javeriana-CIPAVIMCA. 1997. P 89.

PIEDRAHITA R. Reducing the potential environmental impact of tank aquaculture effluents through intensification and recirculation. California USA. Aquaculture 2003; 226: 35-44.

REDDING, T; TODD, S; MIDLEN, A. The Treatment of Aquaculture Wastewaters. A Botanical Approach. Journal of Environmental Management. 1997; 50: 283–299.

ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Tratamiento de aguas residuales: Teoría y principios de diseño. Bogotá: Escuela colombiana de Ingeniería Ambiental, 2004. P 70. ISBN: 958-8060-13-3.

REGLAMENTO TECNICO DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BASICO. RAS-2000. Sección II. Título E. Tratamiento de Aguas Residuales. Noviembre 2000. Bogotá, D.C.

SAAVEDRA MARTÍNEZ, María Auxiliadora. Manejo del cultivo de tilapia. Managua-Nicaragua. 2006. P 13, 21.

SALAZAR ARIZA, Gustavo. Instituto Nacional de Pesca y Acuicultura. División de Acuicultura. Situación de la acuicultura rural de pequeña escala en Colombia, importancia, perspectiva y estrategias para su desarrollo. 1999. P 2-23

SCHMITTOU H. Situation outlook and prospects of the world's aquaculture feed supply. In: Simpósio Internacional Sobre Nutrição de Peixes e Crustáceos, Campos de Jordão, Sao Paulo. Anais Colégio Brasileiro de Nutrição Animal (CBNA) 1995. P 9-32.

SHIOMI Nobuyuki, KITOH Sunhji. Effect of Mineral Nutrients and Combined Nitrogen Sources in the Medium on Growth and Nitrogen Fixation of the Azolla-Anabaena Association. Osaka, Japan. Soil science and plant nutrition. 1991 37(3): 419-426.

SKILLICORN, Paul; SPIRA, William; JOURNEY, William. Duckweed aquaculture. A new aquatic farming system for developing countries. The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank, Washington DC. 1993. P 2-68.

SOTO Doris, MENA Guillermo. Filter feeding by the freshwater mussel, *Diplodon chilensis*, as a biocontrol of salmon farming eutrophication. Chile. Aquaculture. 1999. 171: 65-81.

SOTO D; AGUILAR-MANJARREZ, J; HISHAMUNDA, N. (eds). Building an ecosystem approach to aquaculture. FAO/Universitat de les Illes Balears Expert Workshop. Palma de Mallorca, Spain. 2007. P 218.

Standard Method for the Examination of Water and Wastewater. 20<sup>th</sup>, Edic. APAPH, AWWA, WEF. 1998.

TACON A, Forster I. Aquafeeds and the environment: policy implications. Aquaculture. 2003; 226: 181-189.

TEICHERT-CODDINGTON DR, MARTINEZ D, RAMIREZ E. Characterization of shrimp farm effluents in Honduras and chemical budgets of selected nutrient. Honduras. 1996. P 70-84.

TROELL M, Neori A, CHOPIN T, Buschmann AH. Biological wastewater treatment in aquaculture more than just bacteria. World Aquaculture 2005; 36: 27-29.

VERMAAT, J.E. and HANIF,M.K. Performance of Common Duckweed Species (*Lemna Gibba*) and the Water Fern *Azolla Filiculoides* on Different Types of Wastewater. Great Britain. *Water Res.* 1998; 32(9), 2569–2576

WILLETT, Dan. Duckweed-based wastewater treatment systems: Design aspects and integrated reuse options for Queensland's conditions. Brisbane Island Aquaculture Research Centre. Queensland Department of Primary Industries and Fisheries. 2005. P 2-24.

## **ANEXOS**

Anexo A. Metodologías utilizadas para la caracterización del agua

<b>Parámetro</b>	<b>Referencia</b>	<b>Método Estándar (Nº)</b>
DBO	Standard Methods-Volumétrico	5210-B
DQO	Standard Methods-Colorimétrico	5220-D
N total	Digestor para nitrógeno programable-Velp científica	4500
N amoniacal	Destilador automático- Velp científica modelo UDK 142	4500
P	Standard Methods-Cloruro estañoso	4500-P
Oxígeno disuelto	Sonda multiparamétrica	4500-O-G
pH	Sonda multiparamétrica	4500-H+B
T	Sonda multiparamétrica	2550
Alcalinidad	Volumétrico	2320B
SST	Standard Methods- Filtro whatman 934-AH	2540D

Fuente: Metodologías Standard Methods for the examination of Water and wastewater 20Th Edition.

## Anexo B. Caracterización del efluente en la estación piscícola la Yunga

MUESTREO N°	T (° C)	O.D (mg/L)	pH	COND (µS/cm)	DBO <sub>5</sub> (mg/L)	DQO (mg/L)	DQO <sub>fil</sub> (mg/L)	PO <sub>4</sub> (mg/L)	PT (mg/L)	NH <sub>3</sub> -N (mg/L)	NT (mg/L)	ALC FF (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	ALC T (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	SST (mg/L)
1	26,50	10,60	9,20	28,00	13,33	78	31,2	0,2928	0,0756	0,43	2,34	0,00	19,6	62
2	24,90	7,70	8,20	25,20	11,88	76	48,3	0,2720	0,0703	0,43	2,71	4,00	16	72
3	24,40	8,30	8,60	25,00	13,37	84	20	0,2534	0,0655	0,8	2,87	2,00	16	88
4	21,80	7,00	8,90	21,10	11,66	78	28	0,2948	0,0761	0,27	2,55	0,00	16	80
5	25,10	7,00	8,60	21,30	9,80	69	23	0,1789	0,0462	0,21	1,33	0,00	14	58
6	28,20	4,40	8,10	24,90	7,13	49	21	0,1706	0,0441	0,21	1,06	0,00	12	52
7	24,60	5,20	7,10	25,90	8,99	75	45	0,1292	0,0334	0,11	0,9	0,00	14	38
8	27,10	2,20	8,50	26,90	9,43	54	-	0,1602	0,0414	0,27	0,9	0,00	16	44
9	30,90	1,50	8,50	26,40	11,14	55	-	0,0961	0,0248	0,27	1,17	4,00	14	34
10	24,30	5,40	8,00	19,82	10,99	54	-	0,1458	0,0376	0,21	1,8	0,00	14	52
11	24,40	8,70	7,30	-	11,66	81	33,8	0,1789	0,0462	0,32	2,07	0,00	14	68
12	29,10	9,00	9,50	27,70	15,00	83	34,7	0,2783	0,0719	0,27	1,86	5,60	21,2	66
13	26,70	7,30	8,70	25,10	13,81	87	48,5	0,2348	0,0606	0,27	2,34	6,00	16	78
14	24,90	7,40	8,70	25,60	14,85	99	42	0,3487	0,0900	0,27	2,39	4,00	16	80
15	21,90	6,70	9,10	21,00	12,70	78	19	0,1747	0,0451	0,21	1,7	0,00	20	96
16	23,70	4,50	8,30	21,90	9,88	104	17	0,1934	0,0499	0,16	0,8	0,00	10	74
17	27,20	3,60	8,20	27,80	6,53	55	44	0,1644	0,0425	0,16	1,06	0,00	12	40
18	25,50	5,30	6,80	25,50	9,28	57	37	0,0899	0,0232	0,05	0,85	0,00	12	42
19	26,00	2,70	7,60	27,20	9,06	55	-	0,3114	0,0804	0,32	1,33	0,00	24	36
20	27,60	1,70	8,60	26,90	11,06	51	-	0,1126	0,0291	0,37	1,33	2,00	14	34
21	25,40	5,70	7,90	19,19	11,06	55	-	0,1375	0,0355	0,21	1,7	0,00	12	48
22	23,90	3,30	8,30	29,00	7,80	21	-	0,1892	0,0489	0,22	0,28	0	10	26
23	24,00	4,40	8,00	31,90	8,84	39	-	0,2120	0,0548	0,22	0,22	0	16	74
24	24,70	5,60	6,99	30,70	9,13	50	-	0,2824	0,0729	0,22	0,25	0	18	22

### Anexo C. Datos de campo

<b>MUESTRA</b>	<b>T (°C)</b>	<b>O.D (mg/L)</b>	<b>pH</b>	<b>COND (µS/cm)</b>
1	24,4	8,7	7,3	-
2	29,1	9,0	9,5	27,70
3	26,7	7,3	8,7	25,10
4	24,9	7,4	8,7	25,60
5	21,9	6,7	9,1	21,00
6	23,7	4,5	8,3	21,90
7	27,2	3,6	8,2	27,80
8	25,5	5,3	6,8	25,50
9	26,0	2,7	7,6	27,20
10	27,6	1,7	8,6	26,90
11	25,4	5,7	7,9	19,19
12	26,5	10,6	9,2	28,00
13	24,9	7,7	8,2	25,20
14	24,4	8,3	8,6	25,00
15	21,8	7,0	8,9	21,10
16	25,1	7,0	8,6	21,30
17	28,2	4,4	8,1	24,90
18	24,6	5,2	7,1	25,90
19	27,1	2,2	8,5	26,90
20	30,9	1,5	8,5	26,40
21	24,3	5,4	8,0	19,82
22	23,9	3,3	8,3	29,00
23	24,0	4,4	8,0	31,90
24	24,7	5,6	7,0	30,70
<b>PROMEDIO</b>	25,53	5,63	8,24	25,39
<b>DESVIACIÓN ESTÁNDAR</b>	2,11	2,42	0,70	3,35
<b>MÁXIMO</b>	30,90	10,60	9,50	31,90
<b>MÍNIMO</b>	21,80	1,50	6,80	19,19
<b>N° DATOS</b>	24	24	24	23

### Anexo D. Datos demanda bioquímica de oxígeno

MUESTRA	FACTOR DE DILUCIÓN (V/V)	VOL MUESTRA (ml)	VOL TIOSULFATO (ml)	OD INICIAL (mg/L)	VOL TIOSULFATO (ml)	OD FINAL (mg/L)	DBO <sub>5</sub> (mg/L)
1	3,75	202	6,84	6,77	3,7	3,66	11,66
2	3,75	202	7,06	6,99	3,02	2,99	15,00
3	3,75	202	6,96	6,89	3,24	3,21	13,81
4	3,75	202	6,98	6,91	2,98	2,95	14,85
5	3,75	202	7,08	7,01	3,66	3,62	12,70
6	3,75	202	7,08	7,01	4,42	4,38	9,88
7	3,75	202	6,98	6,91	5,22	5,17	6,53
8	3,75	202	6,94	6,87	4,44	4,40	9,28
9	3,75	202	7,04	6,97	4,6	4,55	9,06
10	3,75	202	6,98	6,91	4	3,96	11,06
11	3,75	202	7,14	7,07	4,16	4,12	11,06
12	3,75	202	7,1	7,03	3,51	3,48	13,33
13	3,75	202	6,74	6,67	3,54	3,50	11,88
14	3,75	202	7	6,93	3,4	3,37	13,37
15	3,75	202	7,06	6,99	3,92	3,88	11,66
16	3,75	202	7,12	7,05	4,48	4,44	9,80
17	3,75	202	7	6,93	5,08	5,03	7,13
18	3,75	202	6,96	6,89	4,54	4,50	8,99
19	3,75	202	7,1	7,03	4,56	4,51	9,43
20	3,75	202	7	6,93	4	3,96	11,14
21	3,75	202	7,12	7,05	4,16	4,12	10,99
22	3,75	202	6,52	6,46	4,42	4,38	7,80
23	3,75	202	6,84	6,77	4,46	4,42	8,84
24	3,75	202	7,06	6,99	4,6	4,55	9,13
<b>PROMEDIO</b>							10,77
<b>DESVIACIÓN ESTÁNDAR</b>							2,31
<b>MÁXIMO</b>							15,00
<b>MÍNIMO</b>							6,53
<b>N° DATOS</b>							24



Anexo E. Datos demanda química de oxígeno

MUESTRA	VOL MUESTRA (ml)	DQO (mg/L)	DQO FILTRADA (mg/L)
1	3	81	33,8
2	3	83	34,7
3	3	87	48,5
4	3	99	42
5	3	78	19
6	3	104	17
7	3	55	44
8	3	57	37
9	3	55	
10	3	51	
11	3	55	
12	3	78	31,2
13	3	76	48,3
14	3	84	20
15	3	78	28
16	3	69	23
17	3	49	21
18	3	75	45
19	3	54	
20	3	55	
21	3	54	
22	3	21	
23	3	39	
24	3	50	
<b>PROMEDIO</b>		66,13	32,76
<b>DESVIACIÓN ESTÁNDAR</b>		19,57	11,54
<b>MÁXIMO</b>		104,00	48,50
<b>MÍNIMO</b>		21,00	17,00
<b>N° DATOS</b>		24	15

Anexo F. Datos fósforo

MUESTRA	FACTOR DE DILUCIÓN (Vol/Vol)	ABSORBANCIA	PO <sub>4</sub> (mg/L)	PT (mg/L)
1	4	0,113	0,18	0,06
2	4	0,161	0,28	0,09
3	4	0,14	0,23	0,08
4	4	0,195	0,35	0,11
5	4	0,111	0,17	0,06
6	4	0,12	0,19	0,06
7	4	0,106	0,16	0,05
8	4	0,07	0,09	0,03
9	4	0,177	0,31	0,10
10	4	0,081	0,11	0,04
11	4	0,093	0,14	0,04
12	4	0,168	0,29	0,10
13	4	0,158	0,27	0,09
14	4	0,149	0,25	0,08
15	4	0,169	0,29	0,10
16	4	0,113	0,18	0,06
17	4	0,109	0,17	0,06
18	4	0,089	0,13	0,04
19	4	0,104	0,16	0,05
20	4	0,073	0,10	0,03
21	4	0,097	0,15	0,05
22	4	0,118	0,19	0,06
23	4	0,129	0,21	0,07
24	4	0,163	0,28	0,09
<b>PROMEDIO</b>			0,20	0,07
<b>DESVIACIÓN ESTÁNDAR</b>			0,07	0,02
<b>MÁXIMO</b>			0,35	0,11
<b>MÍNIMO</b>			0,09	0,03
<b>N° DATOS</b>			24	24

## Anexo G. Datos nitrógeno

MUESTRA	VOL MUESTRA (ml)	NORMALIDAD HCL (N)	VOL HCL BLANCO (ml)	VOL HCL MUESTRA (ml)	NH3-N (mg/L)	VOL HCL BLANCO (ml)	VOL HCL MUESTRA (ml)	NT (mg/L)
1	50	0,0095	0,18	0,3	0,32	0,22	1	2,07
2	50	0,0095	0,3	0,4	0,27	0,46	1,16	1,86
3	50	0,0095	0,3	0,4	0,27	0,46	1,34	2,34
4	50	0,0095	0,3	0,4	0,27	0,46	1,36	2,39
5	50	0,0095	0,22	0,3	0,21	0,3	0,94	1,7
6	50	0,0095	0,22	0,28	0,16	0,3	0,6	0,8
7	50	0,0095	0,22	0,28	0,16	0,3	0,7	1,06
8	50	0,0095	0,22	0,24	0,05	0,3	0,62	0,85
9	50	0,0095	0,28	0,4	0,32	0,26	0,76	1,33
10	50	0,0095	0,28	0,42	0,37	0,26	0,76	1,33
11	50	0,0095	0,28	0,36	0,21	0,26	0,9	1,7
12	50	0,0095	0,3	0,46	0,43	0,46	1,34	2,34
13	50	0,0095	0,3	0,46	0,43	0,46	1,48	2,71
14	50	0,0095	0,3	0,6	0,8	0,46	1,54	2,87
15	50	0,0095	0,22	0,32	0,27	0,3	1,26	2,55
16	50	0,0095	0,22	0,3	0,21	0,3	0,8	1,33
17	50	0,0095	0,22	0,3	0,21	0,3	0,7	1,06
18	50	0,0095	0,22	0,26	0,64	0,3	0,64	0,9
19	50	0,0095	0,28	0,38	0,27	0,26	0,6	0,9
20	50	0,0095	0,28	0,38	0,27	0,26	0,7	1,17
21	50	0,0095	0,28	0,36	0,21	0,26	0,94	1,8
22	50	0,01	0,08	0,16	0,22	0,18	0,28	0,28
23	50	0,01	0,08	0,16	0,22	0,18	0,26	0,22
24	50	0,008	0,8	0,9	0,22	1,44	1,55	0,25
<b>PROMEDIO</b>					0,29			1,49
<b>DESVIACIÓN ESTÁNDAR</b>					0,16			0,79
<b>MÁXIMO</b>					0,80			2,87
<b>MÍNIMO</b>					0,05			0,22
<b>N° DATOS</b>					24			24

## Anexo H. Datos alcalinidad

MUESTRA	VOL MUESTRA (ml)	NORMALIDAD H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (N)	VOL H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> CON FF	ALC FF (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	VOL H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> CON MN	ALC T (mg/L CaCO <sub>3</sub> )
1	50	0,02	0	0,0	0,7	14
2	50	0,02	0,28	5,6	1,1	21,2
3	50	0,02	0,3	6,0	0,8	16
4	50	0,02	0,2	4,0	0,8	16
5	50	0,02	0	0,0	1	20
6	50	0,02	0	0,0	0,5	10
7	50	0,02	0	0,0	0,6	12
8	50	0,02	0	0,0	0,6	12
9	50	0,02	0	0,0	1,2	24
10	50	0,02	0,1	2,0	0,7	14
11	50	0,02	0	0,0	0,6	12
12	50	0,02	0	0,0	1	19,6
13	50	0,02	0,2	4,0	0,8	16
14	50	0,02	0,1	2,0	0,8	16
15	50	0,02	0	0,0	0,8	16
16	50	0,02	0	0,0	0,7	14
17	50	0,02	0	0,0	0,6	12
18	50	0,02	0	0,0	0,7	14
19	50	0,02	0	0,0	0,8	16
20	50	0,02	0,2	4,0	0,7	14
21	50	0,02	0	0,0	0,7	14
22	50	0,02	0	0,0	0,5	10
23	50	0,02	0	0,0	0,8	16
24	50	0,02	0	0,0	0,9	18
<b>PROMEDIO</b>				1,2		15,28
<b>DESVIACIÓN ESTÁNDAR</b>				2,00		3,44
<b>MÁXIMO</b>				6,00		24,00
<b>MÍNIMO</b>				0,00		10,00
<b>Nº DATOS</b>				24		24

Anexo I. Datos sólidos suspendidos totales

MUESTRA	VOL MESTR A (ml)	PESO FILTRO (g)	PESO FILTRO + SOLIDO (g)	PESO SOLIDO (g)	SST (mg/L)
1	50	0,113	0,1164	0,0034	68
2	50	0,1127	0,116	0,0033	66
3	50	0,1132	0,1171	0,0039	78
4	50	0,1131	0,1171	0,004	80
5	50	0,1131	0,1179	0,0048	96
6	50	0,1129	0,1166	0,0037	74
7	50	0,1131	0,1151	0,002	40
8	50	0,1134	0,1155	0,0021	42
9	50	0,1142	0,116	0,0018	36
10	50	0,1122	0,1139	0,0017	34
11	50	0,1134	0,1158	0,0024	48
12	50	0,1124	0,1155	0,0031	62
13	50	0,1136	0,1172	0,0036	72
14	50	0,1133	0,1177	0,0044	88
15	50	0,1142	0,1182	0,004	80
16	50	0,113	0,1159	0,0029	58
17	50	0,1137	0,1163	0,0026	52
18	50	0,114	0,1159	0,0019	38
19	50	0,1133	0,1155	0,0022	44
20	50	0,1138	0,1155	0,0017	34
21	50	0,1135	0,1161	0,0026	52
22	50	0,1133	0,1146	0,0013	26
23	50	0,113	0,1167	0,0037	74
24	50	0,1121	0,1132	0,0011	22
<b>PROMEDIO</b>					56,83
<b>DESVIACIÓN ESTÁNDAR</b>					20,72
<b>MÁXIMO</b>					96,00
<b>MÍNIMO</b>					22,00
<b>N° DATOS</b>					24

Anexo J. Datos evento cosecha

DATOS DE CAMPO					
FECHA	MUESTRA	T (°C)	O.D (mg/L)	pH	COND (µS/cm)
12/02/2009	1	23,5	9	9,7	29,9
12/02/2009	2	23,6	8,5	9,8	29,4
12/02/2009	3	23,7	8,7	9,7	29,2

DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO								
FECHA	MUESTRA	FACTOR DE DILUCIÓN (Vol/Vol)	VOL MUESTRA (ml)	VOL TIOSULFATO (ml)	OD INICIAL (mg/L)	VOL TIOSULFATO (ml)	OD FINAL (mg/L)	DBO5 (mg/L)
12/02/2009	1	3,75	202	6,88	6,81	2,46	2,44	16,41
12/02/2009	2	3,75	202	6,86	6,79	2,34	2,32	16,78
12/02/2009	3	3,75	202	6,88	6,81	2,14	2,12	17,60

DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO			
FECHA	MUESTRA	VOL MUESTRA (ml)	DQO (mg/L)
12/02/2009	1	3	98
12/02/2009	2	3	76
12/02/2009	3	3	60

FÓSFORO					
FECHA	MUESTRA	FACTOR DE DILUCIÓN (Vol/Vol)	ABSORBANCIA	PO4 (mg/L)	PT (mg/L)
12/02/2009	1	4	0,218	0,40	0,1292
12/02/2009	2	4	0,226	0,41	0,1346
12/02/2009	3	4	0,212	0,38	0,1252

ANEXO J. (Continuación) Datos evento cosecha

NITRÓGENO							
FECHA	MUESTRA	VOL HCL BLANCO (ml)	VOL HCL MUESTRA (ml)	NH3-N (mg/l)	VOL HCL BLANCO (ml)	VOL HCL MUESTRA (ml)	NT (mg/L)
12/02/2009	1	0,08	0,1	0,06	0,2	0,3	0,34
12/02/2009	2	0,08	0,1	0,06	0,2	0,28	0,28
12/02/2009	3	0,08	0,12	0,11	0,2	0,24	0,17

ALCALINIDAD							
FECHA	MUESTRA	VOL MUESTRA (ml)	NORMALIDAD H2SO4 (N)	VOL H2SO4 CON FF (ml)	ALC A LA FF (mg/L CaCO3)	VOL H2SO4 CON MN (ml)	ALC T (mg/L CaCO3)
12/02/2009	1	50	0,02	0,2	4	1	20
12/02/2009	2	50	0,02	0,1	2	1,3	26
12/02/2009	3	50	0,02	0,2	4	0,7	14

SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES						
FECHA	MUESTRA	VOL MUESTRA (ml)	PESO FILTRO (g)	PESO FILTRO + SOLIDO (g)	PESO SÓLIDO (g)	SST (mg/L)
12/02/2009	1	50	0,1125	0,1183	0,0058	116
12/02/2009	2	50	0,1132	0,1185	0,0053	106
12/02/2009	3	50	0,113	0,1176	0,0046	92

Anexo K. Datos desempeño duckweed y azolla

DATOS DE CAMPO					
FECHA	SISTEMA	MUESTRA	T (°C)	O.D (mg/L)	pH
24/03/2009	CONTINUO	Azolla cubierta	23,5	4,8	6,94
24/03/2009		Duckweed cubierta	23,3	4,8	6,81
24/03/2009		Azolla descubierta	23,1	6,6	6,84
31/03/2009	BATCH	Azolla cubierta	20,3	8,4	6,61
31/03/2009		Duckweed cubierta	20,30	9,2	7,75
31/03/2009		Azolla descubierta	20,2	9,7	6,45

DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO									
FECHA	SISTEMA	MUESTRA	FACTOR DE DILUCIÓN (Vol/Vol)	VOL MUESTRA (ml)	VOL TIOSULFATO (ml)	OD INICIAL (mg/L)	VOL TIOSULFATO (ml)	OD FINAL (mg/L)	DBO5 (mg/L)
24/03/2009	CONTINUO	Azolla cubierta	3,75	202	6,9	6,83	4,28	4,24	9,73
24/03/2009		Duckweed cubierta	3,75	202	7	6,93	4,36	4,32	9,80
24/03/2009		Azolla descubierta	3,75	202	6,92	6,85	4,58	4,53	8,69
31/03/2009	BATCH	Azolla cubierta	3,75	202	7,02	6,95	5,48	5,43	5,72
31/03/2009		Duckweed cubierta	3,75	202	7,1	7,03	5,42	5,37	6,24
31/03/2009		Azolla descubierta	3,75	202	7,08	7,01	5,94	5,88	4,23

DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO				
FECHA	SISTEMA	MUESTRA	VOL MUESTRA (ml)	DQO (mg/L)
24/03/2009	CONTINUO	Azolla cubierta	3	55
24/03/2009		Duckweed cubierta	3	62
24/03/2009		Azolla descubierta	3	55
31/03/2009	BATCH	Azolla cubierta	3	12
31/03/2009		Duckweed cubierta	3	<10
31/03/2009		Azolla descubierta	3	<10



ANEXO K. (Continuación) Datos desempeño duckweed y azolla

FÓSFORO						
FECHA	SISTEMA	MUESTRA	FACTOR DE DILUCIÓN (Vol/Vol)	ABSORBANCIA	PO4 (mg/L)	PT (mg/L)
24/03/2009	CONTINUO	Azolla cubierta	4	0,166	0,29	0,09
24/03/2009		Duckweed cubierta	4	0,155	0,27	0,09
24/03/2009		Azolla descubierta	4	0,151	0,26	0,08
31/03/2009	BATCH	Azolla cubierta	4	0,006	0	0,00
31/03/2009		Duckweed cubierta	4	0,01	0	0,00
31/03/2009		Azolla descubierta	4	0,002	0	0,00

NITRÓGENO								
FECHA	SISTEMA	MUESTRA	VOL HCL BLANCO (ml)	VOL HCL MUESTRA (ml)	NH3-N (mg/L)	VOL HCL BLANCO (ml)	VOL HCL MUESTRA (ml)	NT (mg/L)
24/03/2009	CONTINUO	Azolla cubierta	0,8	0,98	0,4	1,44	2,4	2,15
24/03/2009		Duckweed cubierta	0,8	0,9	0,22	1,44	1,88	0,99
24/03/2009		Azolla descubierta	0,8	0,96	0,36	1,44	2,34	2,02
31/03/2009	BATCH	Azolla cubierta	1,1	1,3	0,45	0,8	1,9	2,46
31/03/2009		Duckweed cubierta	1,1	1,18	0,18	0,8	1,12	0,72
31/03/2009		Azolla descubierta	1,1	1,28	0,4	0,8	1,84	2,33

ANEXO K. (Continuación) Datos desempeño duckweed y azolla

ALCALINIDAD								
FECHA	SISTEMA	MUESTRA	VOL MUESTRA (ml)	NORMALIDAD H2SO4 (N)	VOL H2SO4 CON FF (ml)	ALC FF (mg/L CaCO3)	VOL H2SO4 CON FF (ml)	ALC T (mg/L CaCO3)
24/03/2009	CONTINUO	Azolla cubierta	50	0,02	0	0,00	1,10	22
24/03/2009		Duckweed cubierta	50	0,02	0	0,00	1,00	20
24/03/2009		Azolla descubierta	50	0,02	0	0,00	0,70	14
31/03/2009	BATCH	Azolla cubierta	50	0,02	0	0,00	0,90	18
31/03/2009		Duckweed cubierta	50	0,02	0	0,00	0,80	16
31/03/2009		Azolla descubierta	50	0,02	0	0,00	0,60	12

SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES							
FECHA	SISTEMA	MUESTRA	VOL MESTRA (ml)	PESO FILTRO (g)	PESO FILTRO + SOLIDO (g)	PESO SOLIDO (g)	SST (mg/L)
24/03/2009	CONTINUO	Azolla cubierta	50	0,1119	0,1146	0,0027	54
24/03/2009		Duckweed cubierta	50	0,1123	0,1149	0,0026	52
24/03/2009		Azolla descubierta	50	0,1123	0,1147	0,0024	48
31/03/2009	BATCH	Azolla cubierta	50	0,1134	0,1145	0,0011	22
31/03/2009		Duckweed cubierta	50	0,1137	0,1146	0,0009	18
31/03/2009		Azolla descubierta	50	0,1131	0,1138	0,0007	14

## Anexo L. Cálculo ejemplo parámetros fisicoquímicos

### 1. Demanda Bioquímica de Oxígeno

$$OD_i = \frac{((V_t * N_t) * f * 1000)}{V_m}$$

$$OD_f = \frac{((V_t * N_t) * f * 1000)}{V_m}$$

$$DBO_5 = (OD_i - OD_f) * F$$

V<sub>t</sub>: volumen del titulante consumido

N<sub>t</sub>: normalidad del titulante

V<sub>m</sub>: volumen de muestra

OD<sub>i</sub>: oxígeno disuelto inicial

D<sub>f</sub>: oxígeno disuelto final

f: factor de equivalencia para esta reacción

DBO<sub>5</sub>: demanda bioquímica de oxígeno

F: factor de dilución

$$OD_i = \frac{((6,84 \text{ ml} * 0,025 \text{ N}) * 8 * 1000)}{202 \text{ ml}}$$

$$OD_i = 6,77 \text{ mg/L de O}_2$$

$$OD_f = \frac{((3,7 \text{ ml} * 0,025 \text{ N}) * 8 * 1000)}{202 \text{ ml}}$$

$$OD_f = 3,66 \text{ mg/L de O}_2$$

F = 300 ml / 80 ml = 3,75; se toma una muestra de 80 ml y se afora a 300 ml con agua destilada.

$$DBO_5 = (6,77 - 3,66) * 3,75$$

$$DBO_5 = 11,66 \text{ mg/L de O}_2$$

### 2. Fósforo

$$PO_4 = \frac{(Abs - 0,0266) * F}{1,932}$$

$$PT = \frac{PO_4 * (PM \text{ del fósforo})}{PM \text{ del fosfato}}$$

Abs: absorbancia

F: factor de dilución

PO<sub>4</sub>: fosfatos

PT: fósforo total

PM: peso molecular

F = 100 ml / 25 ml = 4; se toma una muestra de 25 ml y se afora a 100 ml con agua destilada.

$$PO_4 = \frac{((0,113 - 0,0266) * 4)}{1,932}$$

$$PO_4 = 0,18 \text{ mg/L}$$

$$PT = \frac{0,18 \text{ mg/L} * 30,9738 \text{ g/mol}}{94,9714 \text{ g/mol}}$$

$$PT = 0,06 \text{ mg/L}$$

### 3. Nitrógeno

$$NH_3-N = \frac{(V_t - V_{tb}) * N * 14000}{V_m}$$

$$NT = \frac{(V_t - V_{tb}) * N * 14000}{V_m}$$

NH<sub>3</sub>-N: Nitrógeno amoniacal

NT: Nitrógeno total

V<sub>t</sub>: Volumen del titulante consumido

Anexo L. (Continuación) Cálculo ejemplo parámetros fisicoquímicos

Vtb: volumen del titulante consumido en el blanco  
 N: normalidad  
 Vm.: volumen de muestra

$$NH_3-N = \frac{(0,3 \text{ ml} - 0,18 \text{ ml}) * 0,0095N * 14000}{50 \text{ ml}}$$

$$NH_3-N = 0,32 \text{ mg/L}$$

$$NT = \frac{(1,0 \text{ ml} - 0,22 \text{ ml}) * 0,0095N * 14000}{50 \text{ ml}}$$

$$NT = 2,07 \text{ mg/L}$$

4. Alcalinidad

$$ALC \text{ FF} = \frac{V_t * N}{V_m}$$

$$ALC \text{ T} = \frac{V_t * N}{V_m}$$

V t: Volumen titulante consumido

N: Normalidad de titulante  
 Vm: Volumen de muestra  
 ALC FF: alcalinidad a la fenolftaleína  
 ALC T: alcalinidad total

$$ALC \text{ FF} = \frac{0,2 \text{ ml} * 0,02 \text{ N} * 1000 * 50}{50 \text{ ml}}$$

$$ALC \text{ FF} = 4 \text{ mg/L}$$

$$ALC \text{ T} = \frac{0,8 \text{ ml} * 0,02 \text{ N} * 1000 * 50}{50 \text{ ml}}$$

$$ALC \text{ T} = 16 \text{ mg/L}$$

5. Sólidos Suspendidos Totales

$$SST = \frac{P_f \text{ del filtro} - P_i \text{ del filtro}}{V_m \text{ filtrada}}$$

Pf: peso final

Pi: peso inicial

Vm: volumen de muestra

$$SST = \frac{(0,1164 \text{ g} - 0,1130 \text{ g}) * 1000 \text{ ml} * 1000 \text{ mg}}{50 \text{ ml}}$$

$$SST = 68 \text{ mg/L}$$

Anexo M. Cálculo ejemplo de la tasa relativa de crecimiento (TRC) de duckweed

Para calcular la tasa relativa de crecimiento de duckweed se tuvo en cuenta el valor promedio entre la TRC de duckweed descubierta (DD) y TRC de duckweed descubierta replica (D'D).

$$TRC = \frac{Pf - Pi}{d}$$

donde  
Pf: peso final duckweed  
Pi: peso inicial duckweed  
d: días  
TRC: tasa relativa de crecimiento

$$TRC = \frac{7,0401 \text{ g} - 5 \text{ g}}{8 \text{ d}}$$

$$TRC = 0,25 \text{ g/d}$$

Para realizar la conversión de la TRC a  $\text{g/m}^2 \cdot \text{d}$  es necesario conocer el área de la superficie de siembra:

D: diámetro  
A: área superficie de siembra

$$TRC (\text{g/m}^2 \cdot \text{d}) = TRC (\text{g/d}) \cdot A$$

$$\text{donde } A = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

$$TRC = (0,25 \text{ g/d}) / \frac{(\pi \cdot (0,103 \text{ m})^2)}{4}$$

$$TRC = 30,61 \text{ g/m}^2 \cdot \text{d}$$

Tasa Relativa de Crecimiento (TRC) para duckweed descubierta replica (D'D)

$$TRC = \frac{Pf - Pi}{d}$$

donde  
Pf: peso final duckweed replica  
Pi: peso inicial duckweed replica  
d: días  
TRC: tasa relativa de crecimiento

$$TRC = \frac{7,6215 \text{ g} - 5 \text{ g}}{8 \text{ d}}$$

$$TRC = 0,33 \text{ g/d}$$

Para realizar la conversión de la TRC a  $\text{g/m}^2 \cdot \text{d}$  es necesario conocer el área de la superficie de siembra:

D: diámetro  
A: área superficie de siembra

$$TRC (\text{g/m}^2 \cdot \text{d}) = TRC (\text{g/d}) \cdot A$$

$$\text{donde } A = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

$$TRC = (0,33 \text{ g/d}) / \frac{(\pi \cdot (0,103 \text{ m})^2)}{4}$$

$$TRC = 39,33 \text{ g/m}^2 \cdot \text{d}$$

Con los resultados encontrados se determinó la tasa relativa de crecimiento promedio ( $TRC_{\text{prom}}$ ) para duckweed.

$$TRC_{\text{prom}} = \frac{(30,61 + 39,33) \text{ g/m}^2 \cdot \text{d}}{2}$$

$$TRC_{\text{prom}} = 34,97 \text{ g/m}^2 \cdot \text{d}$$

Anexo N. Análisis estadístico

Estimación curvilínea									
Independent: DIA									
Dependent	Mth	Rsq	d.f.	F	Sigf	b0	b1	b2	b3
T	LIN	0,006	22	0,13	0,724	25,817	-0,0227		
	QUA	0,057	21	0,63	0,541	24,6319	0,2508	-0,0109	
	CUB	0,058	20	0,41	0,745	24,3502	0,3737	-0,023	0,0003
	POW	0	22	3,20E-03	0,955	25,5206	-0,0012		
	EXP	0,005	22	0,1	0,754	25,7002	-0,0008		
OD	✓ LIN	0,218	22	6,12	0,022	7,6301	-0,1597		
	QUA	0,242	21	3,35	0,055	8,5601	-0,3744	0,0086	
	CUB	0,287	20	2,68	0,074	10,271	-1,1205	0,0817	-0,0019
	POW	0,183	22	4,92	0,037	9,3097	-0,2694		
	EXP	0,134	22	3,4	0,079	7,0625	-0,0271		
pH	LIN	0,133	22	3,38	0,079	8,6859	-0,0359		
	QUA	0,141	21	1,73	0,202	8,5305	-1,00E-05	-0,0014	
	CUB	0,21	20	1,77	0,185	9,1347	-0,2635	0,0244	-0,0007
	POW	0,127	22	3,19	0,088	8,9332	-0,0371		
	EXP	0,132	22	3,34	0,081	8,6772	-0,0044		
DBO <sub>5</sub>	LIN	0,109	22	2,68	0,116	12,1097	-0,1075		
	QUA	0,134	21	1,62	0,221	11,2001	0,1024	-0,0084	
	CUB	0,2	20	1,66	0,207	13,167	-0,7554	0,0757	-0,0022
	POW	0,103	22	2,52	0,127	12,7772	-0,085		
	EXP	0,108	22	2,66	0,117	11,9611	-0,0102		

Anexo N. (Continuación) Análisis estadístico

Estimación curvilínea									
Independent: DIA									
Dependent	Mth	Rsq	d.f.	F	Sigf	b0	b1	b2	b3
DQO	LIN	0,203	22	5,61	0,027	81,7174	-1,2474		
	QUA	0,322	21	4,99	0,017	64,9511	2,6218	-0,1548	
	✓ CUB	0,417	20	4,76	0,012	84,9499	-6,1002	0,6999	-0,0228
	POW	0,155	22	4,03	0,057	91,2369	-0,1629		
	EXP	0,246	22	7,16	0,014	85,0209	-0,0241		
DQOFILTRADA	LIN	0,007	11	0,08	0,784	30,9452	0,1604		
	QUA	0,008	10	0,04	0,962	30,2129	0,414	-0,0132	
	CUB	0,068	9	0,22	0,881	38,8966	-4,577	0,6477	-0,0236
	POW	0	11	1,80E-04	0,99	30,2384	0,0017		
	EXP	0,001	11	0,02	0,901	29,6764	0,0024		
PT	LIN	0,039	22	0,9	0,353	0,075	-0,0007		
	QUA	0,139	21	1,7	0,207	0,0938	-0,005	0,0002	
	CUB	0,166	20	1,33	0,294	0,1068	-0,0106	0,0007	-1,00E-05
	POW	0,098	22	2,4	0,135	0,0867	-0,1442		
	EXP	0,037	22	0,85	0,368	0,071	-0,0104		
NH <sub>3</sub> -N	LIN	0,255	22	7,52	0,012	0,4326	-0,0112		
	✓ QUA	0,327	21	5,09	0,016	0,5374	-0,0354	0,001	
	CUB	0,327	20	3,23	0,044	0,5372	-0,0354	0,001	1,40E-07
	POW	0,263	22	7,85	0,01	0,5399	-0,3231		
	EXP	0,228	22	6,49	0,018	0,4016	-0,0353		

Anexo N. (Continuación) Análisis estadístico

Estimación curvilínea									
Independent: DIA									
Dependent	Mth	Rsq	d.f.	F	Sigf	b0	b1	b2	b3
NT	LIN	0,399	22	14,6	0,001	2,3686	-0,0701		
	QUA	0,404	21	7,13	0,004	2,2236	-0,0367	-0,0013	
	✓ CUB	0,548	20	8,07	0,001	3,2123	-0,4679	0,0409	-0,0011
	POW	0,309	22	9,83	0,005	3,735	-0,4876		
	EXP	0,421	22	15,99	0,001	2,8307	-0,0669		
ALCT	LIN	0,011	22	0,25	0,624	15,9246	-0,0513		
	QUA	0,02	21	0,22	0,808	16,7326	-0,2378	0,0075	
	CUB	0,034	20	0,23	0,873	18,0669	-0,8197	0,0645	-0,0015
	POW	0,049	22	1,12	0,301	17,0579	-0,0584		
	EXP	0,026	22	0,58	0,453	15,8934	-0,005		
SST	LIN	0,15	22	3,89	0,061	71,029	-1,1357		
	QUA	0,171	21	2,16	0,14	63,6542	0,5662	-0,0681	
	CUB	0,231	20	2	0,147	80,5191	-6,789	0,6526	-0,0192
	POW	0,15	22	3,88	0,061	80,9771	-0,1863		
	✓ EXP	0,203	22	5,59	0,027	72,7247	-0,0254		



Anexo N. (Continuación) Análisis estadístico

Prueba T											
Estadístico para una muestra					Preba para una muestra						
										95% Intervalo de confianza para la diferencia	
	N	Media	Desviación típ.	Error típ. de la media	valor de prueba	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Inferior	Superior
Temp. (°C)	24	25,533	2,1145	0,4316	40,0	-33,52	23	0,000	-14,467	-15,36	-13,574
O.D (mg/L de O <sub>2</sub> )	24	5,633	2,4207	0,4941	4,0	3,306	23	0,003	1,633	0,611	2,655
pH	24	8,238	0,6946	0,1418	6,0	15,781	23	0,000	2,238	1,944	2,531
pH	24	8,238	0,6946	0,1418	8,5	-1,851	23	0,077	-0,262	-0,556	0,031
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	24	10,7658	2,30588	0,47069	4,0	14,374	23	0,000	6,7658	5,7921	7,7395
ALC T (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	24	15,2833	3,43684	0,70154	100,0	-120,8	23	0,000	-84,7167	-86,17	-83,2654

Anexo N. (Continuación) Análisis estadístico

**Prueba no paramétrica (Prueba de Mann-Whitney)**

RANGOS				
Parámetro	Proceso Productivo	N	Rango promedio	Suma de rangos
T (°C)	Levante y engorde	24	15,23	365,5
	Cosecha	3	4,17	12,5
O.D (mg/L)	Levante y engorde	24	12,79	307
	Cosecha	3	23,67	71
pH	Levante y engorde	24	12,5	300
	Cosecha	3	26	78
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	Levante y engorde	24	12,5	300
	Cosecha	3	26	78
DQO (mg/L)	Levante y engorde	24	13,48	323,5
	Cosecha	3	18,17	54,5
PT (mg/L)	Levante y engorde	24	12,5	300
	Cosecha	3	26	78
NH <sub>3</sub> -N (mg/L)	Levante y engorde	24	15,38	368
	Cosecha	3	3	9
NT (mg/L)	Levante y engorde	24	15,27	366,5
	Cosecha	3	3,83	11,5
ALC T (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	Levante y engorde	24	13,23	317,5
	Cosecha	3	20,17	60,5
SST (mg/L)	Levante y engorde	24	12,54	301
	Cosecha	3	25,67	77

### Anexo N. (Continuación) Análisis estadístico

Estadístico de contraste													
	T (°C)	O.D (mg/L)	pH	COND (μS/cm)	DBO <sub>5</sub> (mg/L)	DQO (mg/L)	PO <sub>4</sub> (mg/L)	PT (mg/L)	NH <sub>3</sub> -N (mg/L)	NT (mg/L)	ALC FF (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	ALC T (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	SST (mg/L)
U de Mann-Whitney	6,5	7	0	6	0	23,5	0	0	3	5,5	13	17,5	1
W de Wilcoxon	12,5	307	300	300	300	323,5	300	300	9	11,5	313	317,5	301
Z	-2,277	-2,239	-2,782	-2,288	-2,778	-0,967	-2,78	-2,802	-2,571	-2,356	-2,058	-1,455	-2,702
Sig. Asintót. (bilateral)	0,023	0,025	0,005	0,022	0,005	0,334	0,005	0,005	0,01	0,018	0,04	0,146	0,007
Sig. Exacta (2*(Sig.unilateral))	0,016a	0,021a	0,001a	0,018a	0,001a	0,351a	0,001a	0,001a	0,005a	0,011a	0,084a	0,162a	0,001a
a. No corregidos para los empates													
b. Variable de agrupación: Proceso productivo													

Anexo N. (Continuación) Análisis estadístico

**Prueba T**

Estadístico de grupo					
Parámetro	Proceso Productivo	N	Media	Desviación típ.	Error típ. de la media
T (°C)	Levante y engorde	24	25,533	2,1145	0,4316
	Cosecha	3	23,6	0,1	0,0577
O.D (mg/L)	Levante y engorde	24	5,633	2,4207	0,4941
	Cosecha	3	8,733	0,2517	0,1453
pH	Levante y engorde	24	8,238	0,6946	0,1418
	Cosecha	3	9,733	0,0577	0,0333
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	Levante y engorde	24	10,7658	2,30588	0,47069
	Cosecha	3	16,93	0,60902	0,35162
DQO (mg/L)	Levante y engorde	24	66,13	19,572	3,995
	Cosecha	3	78	19,079	11,015
PT (mg/L)	Levante y engorde	24	0	0,0239	0,00488
	Cosecha	3	0,13	0	0
NH <sub>3</sub> -N (mg/L)	Levante y engorde	24	0,2921	0,15748	0,03215
	Cosecha	3	0,0767	0,02887	0,01667
NT (mg/L)	Levante y engorde	24	1,4921	0,78503	0,16024
	Cosecha	3	0,2633	0,08622	0,04978
ALC T (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	Levante y engorde	24	15,2833	3,43684	0,70154
	Cosecha	3	20	6	3,4641
SST (mg/L)	Levante y engorde	24	56,83	20,717	4,229
	Cosecha	3	104,67	12,055	6,96

Anexo O. Estrés térmico presentado por duckweed



Anexo P. Fuente abastecimiento, quebrada “Agua sucia”



Anexo Q. Evento cosecha



## Anexo R. Construcción planta piloto estación piscícola la Yunga

