



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos
Hidráulicos, -ERIS-

UTILIZACIÓN DE PECES COMO TRATAMIENTO Terciario EN EFLUENTES DE UNA LAGUNA FACULTATIVA

Ing. Oscar Alberto Ordóñez Palma
Ing. José Manuel Aguilar Quezada

Asesorado por el M.Sc. Ing. Adán Pocasangre Collazos

Guatemala, marzo de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**UTILIZACIÓN DE PECES COMO TRATAMIENTO TERCIARIO EN
EFLUENTES DE UNA LAGUNA FACULTATIVA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO AL COMITÉ DE LA MAESTRÍA EN INGENIERÍA SANITARIA

POR

ING.OSCAR ALBERTO ORDÓÑEZ PALMA

ING.JOSÉ MANUEL AGUILAR QUEZADA

ASESORADO POR EL M.Sc. ING. ADÁN POCASANGRE COLLAZOS

AL CONFERÍRSELES EL TÍTULO DE

MAESTRO (MAGISTER SCIENTIFICA) EN INGENIERÍA SANITARIA

GUATEMALA, MARZO DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. Jose Miltón de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

EXAMINADOR	M.Sc. Ing. Zenón Much Santos
EXAMINADOR	M.Sc. Ing. Joram Matías Gil
EXAMINADOR	M.Sc. Ing. Adán Pocasangre Collazos

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presentamos a su consideración nuestro trabajo de graduación titulado:

UTILIZACIÓN DE PECES COMO TRATAMIENTO TERCIARIO EN EFLUENTES DE UNA LAGUNA FACULTATIVA

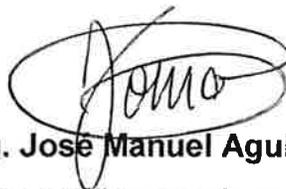
Tema que nos fuera asignado por la comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos ERIS, en el mes de agosto de 2014.



Ing. Oscar Alberto Ordóñez Palma

oscar59man@gmail.com

200915029



Ing. José Manuel Aguilar Quezada

joma_aguilar1991@gmail.com

200915273



FIUSAC

Guatemala, 17 de marzo de 2017

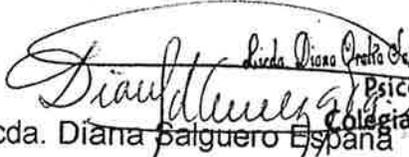
Ingeniero Pedro Saravia Celis
Director de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ing. Saravia

Por este medio extiendo constancia a la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos de la Facultad de Ingeniería, que se ha realizado satisfactoriamente la revisión y corrección de estilo del trabajo de graduación de Maestría en ciencias de Ingeniería Sanitaria, titulado: "Utilización de peces como tratamiento terciario en efluentes de una laguna facultativa" presentado por los estudiantes: Ing. Oscar Alberto Ordóñez Palma (carné: 200915029) e Ing. José Manuel Aguilar Quezada (carné: 200915273).

Para los requerimientos que su despacho necesite.

Atentamente,


Licda. Diana Saiguero España de Pinéquito
Psicóloga
Colegiado 2,103
Colegiado No. 2103
Facultad de Ingeniería



Guatemala, 20 de marzo de 2017

Señores
Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos
Universidad de San Carlos de Guatemala

Respetuosamente les informo que en mi calidad de Asesor y Coordinador de la Maestría de Ingeniería Sanitaria he revisado el trabajo de estudio especial Titulado: "Utilización de peces como tratamiento terciario en efluentes de una laguna facultativa" presentado por los estudiantes: Ingeniero Oscar Alberto Ordóñez Palma e Ingeniero José Manuel Aguilar Quezada.

Manifestando que los estudiantes antes mencionados, han cumplido de manera satisfactoria con los requisitos de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos –ERIS- y la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Agradeciendo la atención prestada a la presente, se suscribe de ustedes,
Atentamente,

"DID Y ENSEÑAD A TODOS"

M.Sc. Ing. Adán Ernesto Artemio Pocasangre Collazos
Asesor del Estudio
Coordinador de la Maestría de Ingeniería Sanitaria

Msc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos
Coordinador Maestría Ingeniería Sanitaria
ERIS / USAC





Guatemala, 21 de marzo de 2017

El director de Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos – ERIS- después de conocer el dictamen del tribunal examinador integrado por los profesores: M.Sc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos, M.Sc. Ing. Joram Matías Gil, M.Sc. Ing. Zenón Much Santos, así como el visto bueno del Coordinador de la Maestría en Ingeniería Sanitaria, M.Sc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collazos, la revisión lingüística realizada por la Lic. Diana Salguero España, colegiada No. 2103 al trabajo de los estudiantes Ingenieros Civiles Oscar Alberto Ordoñez Palma y José Manuel Aguilar Quezada, titulado: “Utilización de peces como tratamiento terciario en efluentes de una laguna facultativa”, en representación de la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado, procede a la autorización del mismo, en Guatemala, veintiuno de marzo de dos mil diecisiete.

“ID Y ENSEÑAR A TODOS”

IMPRÍMASE



M.Sc/Ing. Pedro Saravia Celis
Director

Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por iluminarme y bendecirme siempre.
Mis padres	Oscar Samuel Ordóñez Gálvez y Elsa Dalila Palma Ávalos de Ordóñez, con todo mi amor por las enseñanzas, apoyo y dedicación brindado durante mi vida.
Mi hermana	Dalila Melissa Ordóñez Palma, por estar siempre a mi lado y ser alguien incondicional en mi vida.
Mis abuelos maternos	Juan Alberto Palma Vásquez, Rosaura Ávalos Donado, por ser el modelo a seguir durante el resto de mi vida.
Mis abuelos paternos (q. e. p. d.)	Oscar Ordóñez, Aura Gilda Gálvez Álvarez, por su amor y ejemplo para mi vida.

Oscar Alberto Ordóñez Palma

AGRADECIMIENTOS A:

Mi novia

Helen Cecilia López López, por ser mi mayor inspiración y compartir tantas alegrías.

Mi tía

Vilma Yolanda Palma Ávalos, por apoyarme siempre.

ERIS

Por permitirme adquirir el conocimiento técnico y científico, y formarme como profesional.

**Universidad de San Carlos
de Guatemala**

Alma máter y casa de estudios que me inspiró a culminar esta carrera.

Oscar Alberto Ordóñez Palma

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Padre de misericordia a quien le debo todo lo que soy, por iluminarme y bendecirme siempre.
- Mis padres** Víctor René Aguilar Balsells y Vilma Elizabeth Quezada Méndez, con mi amor por todas las enseñanzas, apoyo, dedicación y empeño brindado durante mi vida; llevando siempre mis pasos por el camino del bien.
- Mis hermanos** Luis Fernando y Marcela Elizabeth Aguilar Quezada, por estar a mi lado, apoyarme y ser incondicionales en mi vida.
- Mi familia** Por el apoyo, cariño y por considerarme un ejemplo de vida.

José Manuel Aguilar Quezada

AGRADECIMIENTOS A:

Mis amigos

Por formar parte de un buen grupo de estudio y por los momentos que compartimos, así también a las personas especiales que me han acompañado durante mi vida.

Mi asesor

Ing. Adán Pocasangre, por todo su apoyo y enseñanzas durante la realización de este trabajo, y a lo largo de mis estudios.

ERIS

Por permitirme adquirir el conocimiento técnico y científico, y formarme como profesional.

Universidad de San Carlos de Guatemala

Alma máter y casa de estudios que inspiro a a culminar esta carrera.

José Manuel Aguilar Quezada

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
GLOSARIO	IX
OBJETIVOS	XI
INTRODUCCIÓN.....	XIII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	XV
HIPÓTESIS	XVII
JUSTIFICACIÓN Y BENEFICIARIOS	XIX
VIABILIDAD	XXI
ANTECEDENTES	XXVII
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Planta piloto ERIS Arturo Pazos Sosa	1
1.1.1. Generalidades.....	1
1.1.1.1. Clima.....	2
1.1.1.2. Topografía.....	2
1.1.1.3. Origen de las aguas residuales	2
1.2. Lagunas de maduración	3
1.2.1. Descripción	4
1.2.1.1. Funcionamiento.....	4
1.2.1.2. Criterios de diseño	5
1.3. Utilización de peces	6
1.3.1. Criterios generales	7
1.3.2. Características	7
1.3.3. Tipos de peces.....	8
1.3.3.1. Carpa común (<i>Cyprinus carpio</i>).....	8

	1.3.3.2.	Carpín dorado (<i>Carassius auratus</i>).....	9
	1.3.3.3.	Tilapia (<i>Oreochromis niloticus</i>).....	11
	1.3.4.	Evaluación de supervivencia	12
	1.3.4.1.	Carpa común	12
	1.3.4.2.	Carpín dorado	14
	1.3.4.3.	Tilapia	15
2.	METODOLOGÍA.....		17
2.1.	Delimitación del área de estudio		17
2.2.	Medición de caudal		17
2.3.	Época de monitoreo (radiación solar)		18
2.4.	Toma de muestras		20
	2.4.1.	Tipos de muestras	21
	2.4.2.	Número de muestras	22
2.5.	Microbiología de los peces		22
	2.5.1.	Calidad de los peces (Buras, 1987)	23
	2.5.2.	Efectos de salud asociados con el uso de aguas de desechos en peces	24
2.6.	Pre muestreo de la calidad del agua		24
2.7.	Determinación de los parámetros a analizar en función de los peces.....		26
2.8.	Diseño del tratamiento terciario		27
	2.8.1.	Aireación	33
2.9.	Monitoreo de la calidad del agua.....		35
2.10.	Resumen de la fase experimental		36
3.	RESULTADOS EXPERIMENTALES		37
3.1.	Resultados obtenidos en el tratamiento terciario		37
3.2.	Tasa de mortalidad de peces		46

3.3.	Tasa de letalidad de peces	46
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	51
4.1.	Análisis general del tratamiento terciario	51
4.1.1.	Evaluación por especie	56
4.1.1.1.	Carpa común	56
4.1.1.2.	Carpín dorado	58
4.1.1.3.	Tilapia	59
4.2.	Interpretación de resultados	60
	CONCLUSIONES	63
	RECOMENDACIONES	65
	BIBLIOGRAFÍA	67

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Muestra de alevín de carpa común	9
2.	Muestra de alevín de carpín dorado	10
3.	Muestra de alevín de tilapia	12
4.	Toma de muestras para análisis	20
5.	Requerimiento de calidad del agua para utilización de peces CEPIS/OPS.....	25
6.	Esquema general del sistema de tratamiento lagunar e implementación de tratamiento terciario.....	28
7.	La diferencia de densidad afecta a los peces y a la utilización del alimento natural disponible en el estanque	29
8.	Detalles del tratamiento terciario	31
9.	Estanques de muros de mampostería confinada tipo tabique	32
10.	Instalación de tubería en unidades de tratamiento terciario.....	34
11.	Estanque con baja concentración de oxígeno disuelto en el agua.	35
12.	Comportamiento de los valores muestreados en DBO ₅	41
13.	Comportamiento de los valores muestreados en DQO.....	42
14.	Comportamiento de los valores muestreados en coliformes totales	42
15.	Comportamiento de los valores muestreados en PH.....	43
16.	Comportamiento de los valores muestreados en sólidos disueltos.....	43
17.	Comportamiento de los valores muestreados en fósforo total	44
18.	Comportamiento de los valores muestreados en nitritos	44
19.	Comportamiento de los valores muestreados en nitratos	45
20.	Comportamiento de los valores muestreados en oxígeno disuelto	45

21.	Comparación parámetro DBO ₅	51
22.	Comparación parámetro DQO	52
23.	Comparación parámetro coliformes totales.....	52
24.	Comparación parámetro pH.....	53
25.	Comparación parámetro fósforo total.....	53
26.	Comparación parámetro STD	54
27.	Comparación parámetro nitritos.....	54
28.	Comparación parámetro nitratos.....	55
29.	Comparación parámetro oxígeno disuelto	55

TABLAS

I.	Ventajas y desventajas en lagunas facultativas	6
II.	Valores normales del agua para la sobrevivencia de la carpa	13
III.	Valores normales del agua para la sobrevivencia del carpín	14
IV.	Aforos realizados en campo.....	18
V.	Parámetros meteorológicos durante la época de monitoreo.....	19
VI.	Calidad de peces según Buras (1987)	23
VII.	Caracterización de las aguas residuales	26
VIII.	Parámetros seleccionados para su análisis.....	27
IX.	Resultados de muestra realizada en fecha 12/9/2014	37
X.	Resultados de muestra realizada en fecha 26/9/2014.....	38
XI.	Resultados de muestra realizada en fecha 10/10/2014.....	38
XII.	Resultados de muestra realizada en fecha 24/10/2014	39
XIII.	Resultados de muestra realizada en fecha 7/11/2014	39
XIV.	Resultados de muestra realizada en fecha 21/11/2014	40
XV.	Resultados de muestra realizada en fecha 9/1/2015.....	40
XVI.	Resultados de muestra realizada en fecha 23/1/2015	41
XVII.	Resumen de índice de mortalidad y letalidad	49

XVIII.	Porcentajes de remoción en los parámetros analizados en función de cada tipo de estaque	49
XIX.	Porcentajes de remoción por presencia de la carpín común en la unidad de tratamiento terciario.....	57
XX.	Porcentajes de remoción por presencia de la carpín dorado en la unidad de tratamiento terciario.....	58
XXI.	Porcentajes de remoción por presencia de la tilapia en la unidad de tratamiento terciario	59

GLOSARIO

Acuicultura	Conjunto de actividades técnicas y conocimientos de crianza de especies acuáticas, vegetales y animales.
Aerobia	Se utiliza para caracterizar a aquellos organismos o fenómenos que se dan a través del uso de oxígeno.
Anaerobia	Se aplica al organismo que vive y se desarrolla en ausencia del oxígeno.
Bioindicador	Especie que puede ser utilizada como índice de concentración, presencia o ausencia de un determinado compuesto o estado de un proceso.
Hábitat	Conjunto de factores físicos y geográficos que inciden en el desarrollo de un individuo, una población, una especie o grupo de especies determinados.
Piscicultura	Es la acuicultura de peces, término bajo el que se agrupan una gran diversidad de cultivos muy diferentes entre sí, en general denominados en función de la especie o la familia.

OBJETIVOS

General

Determinar la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando tres especies de peces como tratamiento terciario, en aguas provenientes de una laguna facultativa para la remoción de DBO_5 , fósforo total y coliformes fecales.

Específicos

1. Caracterizar los principales parámetros de calidad del agua pertenecientes a una laguna facultativa.
2. Implementar el uso de tres especies de peces en un proceso terciario de tratamiento de aguas residuales de origen doméstico.
3. Evaluar la eficiencia de los peces como tratamiento terciario para la remoción de DBO_5 , fósforo total y coliformes fecales, en las aguas provenientes de una laguna facultativa.

INTRODUCCIÓN

El empleo de aguas residuales domésticas en estanques con peces es tan antiguo como la misma piscicultura. En Asia, el uso de desperdicios era muy común, en donde el contenido de las letrinas era agregado al agua como abono o estas eran construidas directamente sobre el estanque.

Los primeros reportes científicos sobre las propiedades de fertilización de las aguas residuales en piscicultura aparecieron en Alemania durante el siglo XIX, dando inicio al empleo de las lagunas de estabilización de las aguas residuales como estanques piscícolas, probablemente estimulado por la escasez de alimentos durante la Segunda Guerra Mundial. Posterior a ella, la creciente industrialización con sus residuos usualmente tóxicos para los peces, tendió a limitar el empleo de las aguas residuales para la piscicultura.

En la India e Israel se consiguieron valiosos resultados trabajando con la reutilización de aguas residuales en los estanques piscícolas aumentando la producción de peces. El interés en los Estados Unidos de utilizar los afluentes de aguas residuales para piscicultura, coincidió con el uso explosivo de los estanques de oxidación o lagunas de estabilización de estas aguas. Así se reportan trabajos sobre la rentabilidad del uso de la materia orgánica como fertilizante para la producción piscícola.

En la planta de tratamiento Arturo Pazos se cuenta con un sistema de lagunas que cumple con el proceso de tratamiento de aguas residuales de origen doméstico, por ello se desea implementar un tratamiento terciario, utilizando las aguas provenientes de la laguna facultativa. De esa manera

evaluar la eficiencia en el tratamiento de las aguas residuales domésticas, utilizando peces como tratamiento terciario.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Una de las preocupaciones recientes es la utilización y máximo aprovechamiento del agua debido a la escasez que cada día afecta a todos. Las aguas residuales pueden ser reutilizadas siempre y cuando la calidad sea la indicada luego de ser tratada, con el fin de reducir costos en el empleo de agua potable proveniente de sistemas de abastecimiento. Dentro de los principales usos se encuentran la agricultura y la piscicultura, por lo tanto es importante aprovechar al máximo el agua residual tratada, promoviendo su utilización y darle mayor auge a las plantas de tratamiento con la finalidad de ser impulsadas para que se empleen en todos los sistemas de alcantarillado.

¿Es posible mejorar la calidad del agua residual doméstica mediante la utilización de peces como un tratamiento terciario capaz de remover DBO_5 , fósforo total y coliformes fecales? Para lograr tal estudio se propone analizar tres tipos de peces de estanque, los cuales serán utilizados con el fin de obtener agua con buena calidad luego del tratamiento.

Los peces que se proponen son: tilapia, carpa común y carpín dorado, estos se introducirán en estanques con aguas provenientes de una laguna facultativa, donde permanecerán por un tiempo de observación adecuado y se analizará la calidad del agua para verificar la eficiencia en el tratamiento.

Se desean obtener los resultados esperados y concluir la investigación de buena manera, con ello contribuir al desarrollo de la población, obteniendo aguas residuales domésticas tratadas, ayudando a darle sostenibilidad a los sistemas de tratamiento.

La contaminación de los cuerpos de agua es muy común en el país, el crecimiento acelerado de la población provoca que las autoridades no sean capaces de brindar los servicios básicos de una manera adecuada. Lo anterior se traduce a descargas de agua cruda (sin tratar) a los cuerpos receptores provocando gran contaminación aguas abajo, lo cual perjudica a toda la flora y fauna del lugar, y no únicamente a las personas, por ello la importancia de los procesos de tratamiento.

Mediante la implementación de peces se logra determinar si el agua es apta para la vida acuática que exista en el cuerpo de descarga, funcionando como bioindicadores de la calidad del agua.

HIPÓTESIS

El uso de peces como proceso terciario en las unidades de tratamiento de agua residual doméstica, remueve un veinte por ciento, el DBO₅, fósforo total y coliformes fecales.

JUSTIFICACIÓN Y BENEFICIARIOS

El tratamiento y caracterización de aguas residuales permite conocer la adaptabilidad de los peces para luego ser utilizados en un proceso terciario y evaluar su comportamiento dentro de las aguas residuales provenientes de la laguna facultativa. La planta de tratamiento de aguas residuales domésticas Arturo Pazos cuenta con un sistema de lagunas de estabilización como proceso de tratamiento, esto brinda la oportunidad de realizar una investigación orientada a la evaluación de la calidad del agua por medio de la adaptabilidad de los peces al medio.

Esta investigación se enfoca en conocer las ventajas o desventajas que pueden existir al utilizar los peces como proceso terciario en la fase final del tratamiento de las lagunas de estabilización, donde se espera que estos sirvan como un medio de remoción de parámetros físicos, químicos y microbiológicos en las aguas residuales.

Con la aplicación de esta investigación se conocerán los porcentajes de remoción que aportan los peces como proceso terciario en las aguas residuales domésticas, y con esto darle un enfoque diferente a la utilización de las aguas provenientes de las lagunas de estabilización.

Los principales beneficiarios de esta investigación serán:

Los cuerpos de agua de Guatemala, pues se promueven nuevas tecnologías para remover las sustancias contaminantes en ellos, así como los

profesionales interesados en la investigación; ya que a través de esta se darán características para nuevas tecnologías de tratamiento de aguas residuales.

LIMITACIONES

Las unidades utilizadas en el tratamiento terciario se construyeron a pequeña escala con dimensiones de 0,80 metros de ancho, 1,25 metros de largo y 0,60 metros de alto, con un volumen máximo de 0,50 metros cúbicos de flujo constante. Esto se dio debido a que no se contaba con áreas mayores para su construcción, además de los elevados costos en la construcción de estanques o lagunas de mayor magnitud.

La obtención de los peces utilizados en el desarrollo de la investigación se dificulta, ya que en la ciudad de Guatemala no existen criaderos de peces, por lo que es necesario viajar a San Jerónimo, Baja Verapaz o a Escuintla, para la obtención de tilapia, carpa común y carpín dorado, en este caso las tres especies utilizadas.

Limitada bibliografía sobre el uso de peces en aguas residuales provenientes de descargas domésticas.

Poca experimentación en Guatemala sobre la utilización de peces en aguas residuales.

ANTECEDENTES

El empleo de peces en aguas residuales domésticas inició en Alemania a fines del siglo XIX, y por otro lado en Calcuta (India) en 1930, donde actualmente se cuenta con el sistema de reúso más grande del mundo (Edwards, 1985). La acuicultura incorporada al sistema de tratamiento de aguas residuales en lagunas de estabilización es materia de investigación reciente, ya que la mayoría de sistemas existentes usan directamente el agua cruda o parcialmente tratada (Bartone, 1990). Aún no está claro si el uso de las aguas crudas promueve la transmisión de patógenos, especialmente en los países en desarrollo (WHO, 1989).

En América Latina, el uso de las aguas residuales se ha orientado principalmente a la agricultura, estimándose que actualmente existen en la región cerca de 500 000 hectáreas regadas con estas aguas. Alrededor de la Ciudad de México se estiman 90 000 hectáreas y otras 275 000 hectáreas en el resto del país; en Santiago de Chile existen 16 000 hectáreas (Bartone, 1990), y en Lima se estiman unas 3 000. Esta situación muestra la magnitud del reúso de las aguas residuales, que de un lado constituye un recurso muy valioso para la agricultura (agua con nutrientes), y del otro un serio riesgo para la salud pública. La importancia del reúso de las aguas residuales es mayor en las zonas áridas.

La Organización Panamericana de la Salud (OPS) ha considerado la necesidad de estudiar y fomentar el sistema de lagunas de estabilización, como una de las alternativas más viables para tratar las aguas residuales en los países de la región. Los bajos costos de tratamiento podrían ser absorbidos

total o parcialmente por actividades productivas, como la agricultura y la acuicultura. Es así que desde 1977, el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS) viene ejecutando diversos estudios en lagunas de estabilización.

Por las mismas razones, el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo/Banco Mundial y la Agencia Alemana de Cooperación Técnica (GTZ) vienen auspiciando desde 1983, proyectos de reúso en acuicultura de las aguas residuales tratadas en lagunas de estabilización, con la finalidad de definir una tecnología de producción acuícola, que pueda absorber el costo de tratamiento de las aguas residuales en lagunas de estabilización.

Estos estudios permitieron definir que las condiciones ambientales de las lagunas cuaternarias son satisfactorias para la supervivencia y crecimiento de los peces tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) y carpa común (*Cyprinus carpio*). Sin embargo, estas lagunas no resultaron prácticas para el cultivo de peces y se recomendó la construcción de estanques para ese fin, estos abastecidos con efluentes terciarios de las lagunas de estabilización. Los análisis microbiológicos, parasitológicos y toxicológicos preliminares mostraron, que al parecer, no existían impedimentos para destinar los peces al consumo humano directo (Moscoso y Nava, 1988).

En Guatemala existe el Acuerdo Gubernativo núm. 236-2006, el cual establece el Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y la disposición de lodos, que en su capítulo VII, Parámetros de aguas para reúso, en su artículo 34 indica que el agua debe ser tipo III, si se utiliza para acuicultura, es decir, para piscicultura y camaronicultura. Luego, en el capítulo 35 establece los parámetros y límites permisibles para reúso.

El Centro de Estudios del Mar y Acuicultura (CEMA) tiene como objetivo cumplir con fines de investigación establecidos por la Universidad de San Carlos de Guatemala, sin embargo, como ellos indican aún no han profundizado en estudios realizados con aguas residuales en el país.

La Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS) implementó en su planta piloto Arturo Pazos Sosa el uso de gansos como bioindicadores en sus lagunas de estabilización para una nueva propuesta dentro del programa de maestría de Ingeniería Sanitaria. Al no haber investigaciones en el país sobre la utilización de peces en aguas residuales domésticas tratadas, se considera que vale la pena iniciar una ruta de investigación que beneficie al desarrollo del país.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Planta piloto ERIS-Arturo Pazos Sosa

Con fines de apoyar a la docencia e investigación de los programas de maestría, la ERIS en 1974 crea la Planta piloto para el tratamiento de las aguas residuales “Ing. Arturo Pazos Sosa”. En la actualidad esta planta opera con sistemas a través de filtros percoladores, reactor anaerobio de flujo ascendente y lagunas de estabilización, entre otros. Consta de diversas unidades para el tratamiento de aguas residuales domésticas, provenientes de la colonia Aurora II.

El presente trabajo científico, como parte de investigación de los programas de maestría, se realizó utilizando el efluente del sistema de lagunas que conforman la planta Arturo Pazos Sosa.

1.1.1. Generalidades

La planta piloto de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos está ubicada en la diagonal 26, final 20–56 zona 13, colonia Aurora II en la ciudad de Guatemala. Geográficamente es localizada en 14° 35´ de latitud norte y 90° 32´ de longitud oeste. La planta de tratamiento brinda el servicio de sanear las aguas residuales domésticas de la población de la colonia donde se ubica, estimada en 3 350 habitantes. Tiene como fin permitir a los estudiantes de la maestría efectuar ensayos de tratamiento, comparar los diferentes procesos y capacitar a los operadores de otras plantas de tratamiento.

La planta experimental de tratamiento de aguas residuales domésticas “Ingeniero Arturo Pazos Sosa” cuenta con seis sistemas de tratamiento independientes que trabajan por gravedad. A continuación se menciona cada uno de los sistemas existentes en dicha planta:

- Lagunar.
- De riego, post sedimentación primaria.
- RAFA, filtro percolador, estanque de jancitos.
- Biodigestor clarificador.
- RAFA, filtro percolador, sedimentador secundario y patio de secado de lodos (todas las unidades prefabricadas de polietileno de alta densidad).
- De filtros percoladores torre.

1.1.1.1. Clima

La colonia Aurora II goza de un clima, generalmente agradable, casi primaveral a lo largo del año. La temporada de lluvias se extiende de mayo a noviembre, mientras que la estación seca abarca el resto del año, también tiende a soplar mucho viento, lo que puede reducir la temperatura aún más. Su temperatura media anual es de 21 °C.

1.1.1.2. Topografía

la planta de tratamiento Arturo Pazos Sosa, se encuentra en un área montañosa con barrancas que la delimitan, el lugar donde se encuentran los principales sistemas de tratamiento es semiplana, sin embargo, el resto de sistemas de tratamiento están en las barrancas del área, por lo que están propensos a movimientos de tierra y el acceso es complicado.

1.1.1.3. Origen de las aguas residuales

La clasificación de las aguas residuales se realiza con base en su origen, ya que este mismo es el que va a determinar su composición, es importante saber que las aguas residuales urbanas son los vertidos que se generan en los núcleos de las poblaciones urbanas como consecuencia de las actividades propias de estos, a su vez, estas presentan cierta homogeneidad en cuanto a su composición y carga contaminante, ya que sus aportes en teoría serán siempre los mismos.

Para el caso puntual del presente estudio realizado en la planta de tratamiento Arturo Pazos, se cuenta con un origen de aguas residuales domésticas, estas provenientes de viviendas, edificios públicos y otras instalaciones; incluyendo el agua utilizada para la limpieza de las calles y el control de incendios, así como las provenientes de pequeñas industrias y locales conectados al sistema de alcantarillado.

1.2. Lagunas de maduración

Son un proceso biológico natural que se beneficia de las condiciones climatológicas, en especial de las temperaturas elevadas, por lo que son un método sencillo para el tratamiento de aguas residuales. Las lagunas de maduración tienen como principal objetivo reducir la concentración de bacterias patógenas y materia orgánica. La secuencia habitual para el tratamiento de las aguas residuales domésticas por el sistema de lagunaje es la de laguna anaerobia seguida de laguna facultativa.

1.2.1. Descripción

Una laguna de estabilización de aguas residuales es una estructura simple para embalsar agua, de poca profundidad de 1 a 4 m y con períodos de retención de uno a cuarenta días. Las lagunas de estabilización tienen como propósito explícito conseguir que las aguas acumuladas en ellas lleguen a cumplir un conjunto de parámetros cuantitativos, fijados por ley, que permitan su descarga al ambiente receptor sin ocasionar problemas ambientales posteriores e inclusive ser utilizadas para riego de cultivos en general.

Las que reciben el agua residual cruda se les llama lagunas primarias, el sistema debe contar, por lo menos con dos lagunas primarias en paralelo con el objetivo de que una se mantenga en operación mientras se hace la limpieza de lodos de la otra. Las lagunas que reciben el efluente de una laguna primaria se denominan secundarias, y dependiendo la calidad del efluente que uno desea evacuar pueden llegar a terciarias, cuaternarias, entre otras.

1.2.1.1. Funcionamiento

Las lagunas de estabilización pueden funcionar de manera aeróbica, anaeróbica o conjunta; en el proceso aerobio se genera la descomposición de la materia orgánica, la cual se lleva a cabo en una masa de agua que contiene oxígeno disuelto, en este proceso participan bacterias aeróbicas o facultativas, las cuales originan compuestos inorgánicos que sirven de nutrientes a algas, estas a su vez producen el oxígeno que facilita la actividad de las mismas bacterias, asimismo, el proceso anaeróbico es más lento y puede originar malos olores, este tipo de entorno se establece cuando el consumo de oxígeno disuelto es mayor que la incorporación del mismo al cuerpo de agua, generando

que la laguna obtenga un color gris oscuro, debido a la fotosíntesis del agua y a la ausencia de oxígeno disuelto en la misma.

1.2.1.2. Criterios de diseño

A continuación se detallan los criterios y parámetros de diseños más utilizados al momento de diseñar lagunas de estabilización en sus diferentes tipos, como unidad de tratamiento de aguas residuales.

- Lagunas anaerobias: se caracteriza por la ausencia de oxígeno en el volumen de agua, y generalmente la carga orgánica aumenta en gran cantidad, la DBO excede la producción de oxígeno de las algas, actuando como un digestor anaeróbico abierto. Las lagunas anaerobias son estanques de mayor profundidad, varían entre 2,5 a 5 metros, con tiempos de retención del agua residual en ellas de 5 días, en este tipo de lagunas no se remueven los flotantes para conservar el calor y aislar la laguna del oxígeno atmosférico.
- Lagunas aerobias: en estas se espera, por diseño, que exista oxígeno disuelto en todo el sistema, producen altas cantidades de biomasa y sus profundidades son reducidas entre 0,3 a 0,45 metros, en donde la penetración de la luz solar hasta la zona más profunda es de gran importancia para la correcta producción de algas, los períodos de retención son muy cortos, y la eficiencia en la reducción de materia orgánica es efectuada por la acción de organismos aeróbicos, son utilizadas perfectamente en climas calientes y con buena radiación solar.
- Lagunas facultativas: estas son las más utilizadas, ya que tienen la característica de poseer una zona superior aerobia y otra inferior

anaerobia, existe una zona de transición en donde viven las bacterias facultativas, la profundidad de estas lagunas varía entre 1 y 2 metros. Estas lagunas se proyectan para tiempos de retención altos y cargas orgánicas bajas, con respecto a la eficiencia de remoción de materia orgánica, además alcanzan un valor hasta el 85 y un 99,9 % máximo en lo referido a la remoción de bacterias coliformes.

Tabla I. **Ventajas y desventajas en lagunas facultativas**

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Minimizar el área del sistema total de lagunas	Requerimiento de personal calificado y a tiempo completo
Reducir la carga orgánica, si esta es alta	Una limpieza mínima en un periodo no menor 2 a 6 años
Reducir las concentraciones de compuestos tóxicos	Contar con un sistema de manejo y disposición final de lodos
	Riesgo a malos olores

Fuente: elaboración propia.

1.3. Utilización de peces

Con el objetivo de reducir las enfermedades que se transmiten por las fuentes de agua contaminadas y prevenir la contaminación de los cuerpos hídricos del país, se propone la utilización de peces como proceso terciario en el tratamiento de aguas residuales, esto con la intención de incrementar las eficiencias de remoción y a la vez reducir los índices contaminantes en el agua.

1.3.1. Criterios generales

Es importante tomar en cuenta los siguientes criterios para la implementación de peces en el agua, los cuales se mencionan a continuación.

- Hacer un presupuesto y establecer estrategias: permitirá determinar las necesidades para comenzar y visualizar los objetivos que desean alcanzarse.
- Elegir una estructura para la investigación, obtener permisos con los organismos locales, municipales y nacionales que corresponda.
- Decidir el tipo de peces o si se quiere más de uno: determinará cómo debería organizarse el proceso.
- Dependiendo del tipo de peces que se elija, se necesitará construir un hábitat que funcione correctamente para ellos. Asegurar que los peces tengan el espacio suficiente para nadar.

1.3.2. Características

El espacio necesario para los estanques debe ser:

- Amplio, dado que necesitan nadar para evitar el estrés.
- Cómodo para la manipulación de las personas, ya que se tienen que introducir y sacar a los peces sin molestarlos ni tenerlos mucho tiempo fuera del agua.

- Con temperatura adecuada de agua, la cual deberá ser igual a la temperatura del estanque. Cambios bruscos de temperatura pueden producir estrés térmico en los peces.
- Máxima calidad de agua, lo importante en cuanto a la calidad del agua es que debe tener las mismas características físico químicas que el agua del estanque, en especial los nitritos y nitratos lo más bajo posible (0 lo ideal).
- Privado para los peces, se deben lograr dos grandes puntos: privacidad y equilibrio de temperatura.
- Buena oxigenación, el agua debe tener una buena concentración de oxígeno con lo que es necesario conectarle al recipiente un aireador. No aplicar ningún filtro ya que afectaría algún parámetro a evaluar.

1.3.3. Tipos de peces

La piscicultura contempla una cantidad muy amplia de peces destinados a satisfacer varias necesidades, entre estas las alimenticias, de repoblación u ornamentales o de jardines acuáticos. Durante la investigación se utilizarán tres especies de peces, carpa común, carpín dorado y tilapia.

1.3.3.1. Carpa común (*Cyprinus carpio*)

Es un pez de agua dulce, ha sido introducida en todos los continentes y está incluida en la lista de las 100 especies exóticas invasoras más dañinas del mundo de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza. Es nativa de cuerpos de aguas estancadas o lentas de las regiones templadas. Es un animal de fácil cultivo y resistente, capaz de sobrevivir en aguas salobres

con una temperatura entre 17 y 24 °C. En muchos lugares donde ha sido introducida se considera una amenaza para el ecosistema debido a su predilección por el sustrato vegetal de los fondos poco profundos, que sirve de alimento a numerosas especies animales. Su alimentación consiste, principalmente en plantas acuáticas, aunque también puede comer artrópodos, zooplancton, bentos, crustáceos, insectos o incluso peces muertos si se presenta la ocasión.

Figura 1. **Muestra de alevín de carpa común**



Fuente: planta piloto Arturo Pazos Sosa, ERIS.

1.3.3.2. Carpín dorado (*Carassius auratus*)

Es un pez de la familia de los ciprínidos, la carpa dorada es el pez más popular y vendido en el mundo entero; se le encuentra en la gran mayoría de las tiendas de acuarios, donde es posible conseguir algunas de las 125 variedades reconocidas actualmente, la carpa dorada descende del carpín (*Carassius carassius*) que habita el este de Asia, pez alargado y color marrón, de apariencia similar a la carpa dorada común.

El carpín dorado es un pez de pequeño tamaño, alcanzando como máximo los 60 cm de largo y los 3 kg de peso, aunque los animales criados en acuario rara vez llegan a la mitad de este tamaño, en especial las formas de selección.

El cuerpo es corto y macizo, con la cabeza de forma triangular y desprovista de escamas. A diferencia de otras carpas carece de barbillas en el maxilar superior.

Habita en aguas templadas y frías, con un óptimo entre 14 y 30°, aunque las formas salvajes pueden resistir temperaturas extremas de forma ocasional. Las variedades de selección son mucho más delicadas y su rango de tolerancia de temperatura es más estrecho.

Viven en aguas con pH neutro y aguas semiblandas, aunque se adaptan con facilidad a condiciones más extremas, especialmente si han sido criadas bajo esas condiciones.

Figura 2. **Muestra de alevín de carpín dorado**



Fuente: planta piloto Arturo Pazos Sosa, ERIS.

1.3.3.3. Tilapia (*Oreochromis niloticus*)

Es el nombre genérico con el que se denomina a un grupo de peces de origen africano que consta de varias especies, algunas con interés económico, pertenecientes al género *Oreochromis*. Habitan mayoritariamente en regiones tropicales, en que se dan las condiciones favorables para su reproducción y crecimiento.

Sus extraordinarias cualidades, como crecimiento acelerado, tolerancia a altas densidades poblacionales, adaptación al cautiverio y a una amplia gama de alimentos, resistencia a enfermedades, carne blanca de calidad y amplia aceptación, han despertado gran interés comercial en la acuicultura mundial.

Son peces de aguas cálidas que viven tanto en agua dulce como salada e incluso pueden acostumbrarse a aguas poco oxigenadas. Se encuentra distribuida como especie exótica por América Central, sur del Caribe, sur de Norteamérica y el sureste asiático. Considerado hace tiempo como un pez de bajo valor comercial, hoy su consumo, precio y perspectivas futuras han aumentado significativamente.

A pesar de ser originarias de climas cálidos, las tilapias toleran las aguas frías, se encuentran en aguas cuya variación térmica va desde los 8° a los 30 °C. Todas las especies del género tienen una tendencia hacia hábitos herbívoros, a diferencia de otros peces de piscicultura que se alimentan de pequeños invertebrados, los adultos son muy voraces, suelen barrer la superficie y el fondo de los estanques en búsqueda de insectos, crustáceos, ocasionalmente podrían llegar a ingerir larvas de anfibios pequeñas y peces pequeños, que captan mediante la filtración del agua que llega a sus bocas y es expulsada a través de sus agallas.

Figura 3. **Muestra de alevín de tilapia**



Fuente: planta piloto Arturo Pazos Sosa, ERIS.

1.3.4. Evaluación de supervivencia

En esta etapa se evaluará la calidad del agua residual caracterizada anteriormente con las características de adaptabilidad de los diferentes tipos de peces utilizados, y sus límites de tolerancia en la calidad del agua, para que puedan desarrollarse de forma satisfactoria.

1.3.4.1. Carpa común

De todas las especies utilizadas por el hombre, la carpa común (*Cyprinus carpio*) tiene la historia de cultivo más larga, y ha sido en general exitoso, además se ha difundido notablemente como método de producción de proteína para consumo humano.

Por otra parte, el éxito de cultivo de carpa se debe en gran medida a la relativa facilidad con la cual se puede hacer que la carpa se reproduzca en cautiverio y también a la resistencia de la especie en todas las etapas de su vida. Las carpas se adaptan tanto a aguas ácidas como alcalinas y toleran fácilmente salinidad de más del 20 %. En Israel, las carpas se cultivan en aguas con un grado de salinidad de más del 30 %, aunque esta producción es baja, el cultivo se lleva a cabo con el fin de desarrollar una especie de carpa que sea resistente a esas condiciones.

La carpa es por naturaleza tolerante a un amplio rango de temperaturas y un cultivo selecto ha reforzado esta ventaja al producir especies adaptadas a una amplia variedad de temperaturas. Esta se cultiva ahora exitosamente desde los trópicos hasta los límites de la parte norte de la zona templada. A diferencia de la mayoría de las especies, la carpa se desarrolla bien en aguas turbias.

A continuación se presentan datos de algunos parámetros de calidad del agua en donde la especie carpa se reproduce de manera correcta.

Tabla II. **Valores normales del agua para la sobrevivencia de la carpa**

Parámetro	Valor	Unidad
Oxígeno disuelto	8,84	mg/l
Temperatura	20	°C
pH	7-8	
Nitratos	45	mg/l

Fuente: elaboración propia.

Se concluye con base en los datos de caracterización del agua provenientes de las lagunas facultativas en la planta Arturo Pazos, que la carpa no tendría ningún problema de manera teórica y en espera de los datos experimentales para sobrevivir en este tipo de agua residual.

1.3.4.2. Carpín dorado

Crece rápidamente con buena alimentación y debe suministrarse espacio adecuado a su tamaño. El carpín dorado revuelve permanentemente el suelo, por lo que deberá filtrarse muy bien el agua. Le gusta el alimento vivo, como larvas de mosquitos, lombrices, tenebrios y los vegetales, aunque también acepta comida desecada y granulada. Jamás se debe omitir de su dieta algas y lechuga, caso contrario las carpas devorarán las plantas decorativas del acuario; hay que hacerle pasar un período de cuarentena y acondicionamiento para evitar contagio de enfermedades y estrés en él, y en el resto de los peces a incluir en el estanque.

Tabla III. **Valores normales del agua para la sobrevivencia del carpín dorado**

Parámetro	Valor	Unidad
Oxígeno disuelto	5,35	mg/l
Temperatura	18-21	°C
pH	7-8	
Nitratos	39	mg/l

Fuente: elaboración propia.

1.3.4.3. Tilapia

Para decidir si el agua califica para un propósito particular menciona que su calidad debe especificarse en función del uso que se le va dar, bajo estas consideraciones, se dice que el agua está contaminada cuando sufre cambios que afectan su uso real o potencial.

Las principales características fisicoquímicas y biológicas que definen la calidad del agua para el cultivo de tilapia, el origen de sus constituyentes, su importancia en la salud, la relación con los principales procesos de tratamiento y los límites de concentración establecidos por las normas de calidad de agua, influirán de manera directa con la correcta adaptabilidad de la especie a su nuevo medio de sobrevivencia, en este caso el agua proveniente de la laguna facultativa de la planta Arturo Pazos.

Las características físicas del agua, llamadas así porque pueden impresionar a los sentidos, tienen directa incidencia sobre la aceptabilidad del agua por la tilapia, por otra parte, la tilapia al encontrarse en un nuevo ambiente, necesitará materia orgánica necesaria para alimentarse y sobrevivir, así también de factores químicos y microbiológicos propios del agua donde se desarrollarán; como se mencionó anteriormente, la correcta caracterización de estos parámetros dirán el éxito o fracaso de la aceptación de la especie a su entorno, y de manera hipotética se espera que esta sobreviva en su mayoría a este nuevo hábitat de supervivencia.

2. METODOLOGÍA

2.1. Delimitación del área de estudio

El estudio se enfoca en el análisis de la efectividad de remoción de los principales parámetros físicos, químicos y biológicos en el agua proveniente del sistema de lagunas de maduración localizadas en la planta de tratamiento Arturo Pazos Sosa, generado por tres diferentes especies de peces; carpa común, carpín dorado y tilapia; implementados en estanques y realizando muestreos continuos de la calidad del agua residual.

2.2. Medición de caudal

Es sumamente importante conocer el caudal de ingreso y egreso en las lagunas para poder entender el comportamiento diario que estas manejan con respecto a la cantidad de agua con las que funcionan y mejoran a la vez. Existen en la actualidad gran cantidad de métodos para conocer el caudal de una corriente, entre estos se pueden mencionar: flotadores, métodos por fenómenos hidráulicos, vertederos, medidores o contadores químicos; sin embargo, el método más utilizado y práctico es el volumétrico. A continuación se muestran los resultados obtenidos al realizar aforo volumétrico en la entrada del tratamiento terciario a analizar.

Se realizaron 10 aforos en el cual, por medio de un cronometro se procedió a llenar un recipiente de 1 galón de volumen, posteriormente se procedió a obtener un tiempo promedio, con este se determinó el caudal de ingreso al tratamiento terciario, como se muestra en los siguientes resultados:

Tabla IV. **Aforos realizados en campo**

Número de aforo	tiempo (seg)	caudal (l/s)
1	33,9	0,11166
2	30,9	0,12251
3	31,1	0,12172
4	32,3	0,11720
5	33,9	0,11166
6	32,3	0,11720
7	35,3	0,10724
8	33,7	0,11233
9	34,3	0,11036
10	35,6	0,10633
promedio	33,33	0,11357

Fuente: elaboración propia.

2.3. Época de monitoreo (radiación solar)

El monitoreo es el seguimiento, vigilancia y control permanente a las actividades previstas en un proyecto investigativo. Se realiza con el fin de comprobar que se alcanzaron las metas propuestas al principio de la investigación. Por medio del monitoreo se hace un registro ordenado de los avances de las actividades y los objetivos planificados. Este registro permite detectar las dificultades en la ejecución y proponer las medidas necesarias para reencauzar el proyecto de investigación.

El monitoreo se realizó durante los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre de 2014, y en enero de 2015. Los parámetros meteorológicos promedio de la estación Insivumeh durante la época de monitoreo fueron los siguientes:

Tabla V. **Parámetros meteorológicos durante época de monitoreo**

PARÁMETRO	VALOR	UNIDADES
TEMPERATURA MEDIA	19,7	°C
TEMPERATURA MÁXIMA	25,5	°C
TEMPERATURA MÍNIMA	15,4	°C
TEMPERATURA MAX. ABSOLUTA	31,4	°C
TEMPERATURA MIN. ABSOLUTA	8,0	°C
LLUVIA	1266,2	mm
DÍAS DE LLUVIA	45	Días lluvia
HUMEDAD RELATIVA MEDIA	78	%
BRILLO SOLAR	201,4	Horas y décimos
RADIACIÓN SOLAR	0,40	Cal/cm ² /min
VELOCIDAD DEL VIENTO	7,5	Km/h
PRESIÓN ATMOSFÉRICA	640,4	mmHg
EVAPORACIÓN TANQUE (INTEMPERIE)	4,0	Mm
NUBOSIDAD	6	Octas

Fuente: elaboración propia.

La radiación solar comprende la totalidad de la ración de la luz directa, difusa o dispersa recibida sobre la superficie horizontal, por día calorías por cm² por día (cal/cm²d). Las estaciones meteorológicas completas disponen de instrumentos para el registro continuo de la radiación solar. La radiación solar recibida depende de la estación del año, de la latitud, de la nubosidad y por la polución atmosférica. La absorción de la energía solar en las lagunas de estabilización y maduración es muy importante, ya que a través de la fotosíntesis de las algas favorece la destrucción de organismos patógenos, reduce el color de la laguna e influye favorablemente en la temperatura del agua. La laguna actúa como un medio natural de desinfección, gracias principalmente, a la exposición a la luz solar durante un periodo relativamente largo y a la posible producción de sustancias antibióticas por las algas.

La radiación visible con longitudes de entre entre 400 y 700 nm es considerada como la energía disponible para fotosíntesis.

2.4. Toma de muestras

Por medio del muestreo se obtiene una parte representativa del material bajo estudio, ya sea un cuerpo de agua, un efluente industrial, agua residual, entre otros; y con esto evaluar las características físicas, químicas y microbiológicas.

Figura 4. **Toma de muestras para análisis**



Fuente: planta piloto Arturo Pazos Sosa, ERIS.

El volumen del material captado se transporta hasta el lugar de almacenamiento (cuarto frío, refrigerador, hielera, etc.), para luego ser transportada al laboratorio para el respectivo análisis, esperando que la misma conserve las características originales. Para obtener mejores resultados se requiere que la muestra conserve las concentraciones relativas de todos los componentes presentes en el material original y que no hayan ocurrido cambios significativos en su composición antes del análisis.

2.4.1. Tipos de muestras

El proceso de captación y obtención de muestras cuenta con diferentes procedimientos para permitir cumplir con las normas de laboratorio, y a la vez evitar en lo más mínimo la alteración de las características del agua que se analizarán, esto se puede realizar de dos maneras:

- Muestras simples o puntuales: representa la composición del cuerpo de agua original para el lugar, tiempo y circunstancias particulares en las que se realizó su captación, esta se recolecta cuando la composición de una fuente es relativamente constante a través de un tiempo prolongado o a lo largo de distancias sustanciales en todas las direcciones, puede decirse que la muestra de agua representa un intervalo de tiempo o un volumen más extenso, en donde la variación de su calidad no es significativa, por lo que un cuerpo de agua puede estar adecuadamente representado por muestras simples, como en el caso del agua potabilizada que se suministra a las poblaciones o aguas superficiales directamente de los nacimientos en la época seca o lluviosa.
- Muestras puntuales: se refieren a la combinación de muestras sencillas o puntuales tomadas en el mismo sitio durante diferentes tiempos, se emplean para observar concentraciones promedio, usadas para calcular las respectivas cargas o la eficiencia de una planta de tratamiento de aguas residuales, también representan un ahorro sustancial en costo y esfuerzo del laboratorio, comparativamente con el análisis por separado de un gran número de muestras y su consecuente cálculo de promedios.

2.4.2. Número de muestras

Por medio de este factor se permite conocer a detalle el volumen de agua que se analizará en el laboratorio, el número de muestras estará dado por la siguiente ecuación:

$$N > \left(\frac{t * S}{U} \right)^2$$

Donde:

- N = número de muestras
- T = prueba t de student para un nivel de confiabilidad dado
- S = desviación estándar global
- U = nivel aceptable de incertidumbre

2.5. Microbiología de los peces

La flora normal de los peces está, principalmente, supeditada al ambiente del agua. El tipo de bacterias encontrado en el agua puede variar; usualmente no pertenece a las bacterias propias del agua. Pueden ser clasificadas en bacterias del aire, suelo, plantas o de desecho. Es, por lo tanto, totalmente difícil el definir la flora bacterial normal de los peces. Los coliformes y coliformes fecales no constituyen habitantes normales del intestino de los peces y tienen una supervivencia corta e inalterable en sus tractos intestinales (Geldreich, E. E y Clark, N. A. 1966).

En el músculo de los peces es posible encontrar bacterias, pero no así salmonella. El orden de penetración hacia los órganos es: riñones, bazo, hígado y finalmente, músculo. La penetración común de los microorganismos a los

peces es a través del tracto digestivo y puede ser también, por medio de cualquier abertura de la piel, es posible encontrar salmonella en el tracto digestivo (Buras 1987).

2.5.1. Calidad de los peces (Buras 1987)

Cuando se desea determinar la calidad de los peces para el consumo, es necesario determinar la concentración bacteriana en el agua de los estanques de cultivo, con relación a la resistencia de los peces para impedir el ingreso de bacterias al músculo. La calidad de los peces es evaluada de acuerdo a una calificación propuesta por Buras (1987), que establece como “muy buenos” a los peces con menos de 10 bacterias por gramo de músculo, son “aceptables” aquellos con 10 a 50 bacterias y son “rechazados” los peces con más de 50 bacterias.

Tabla VI. **Calidad de peces según Buras (1987)**

CALIDAD DE LOS PECES	
Calificación del pez	Bacterias en músculo
muy bueno	0 – 10 bact./g
aceptable	10 – 50 bact./g
rechazable	> 50 bact./g
categorías propuestas por buras (1987)	

Fuente: *Aspectos técnicos de la acuicultura con aguas residuales*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (Cepis) y la Organización Panamericana de la Salud (OPS), 1992. p. 38.

2.5.2. Efectos de salud asociados con el uso de aguas de desecho en peces

El uso de aguas de desecho donde se cuenta con la presencia de peces puede presentar ciertos riesgos para la salud. Desde el punto de vista microbiológico existen dos problemas potenciales: el primero es la posibilidad de que microorganismos patógenos puedan ser transferidos de la superficie externa, y el segundo de las vísceras de los peces a la cocina (WHO, 1973).

La idea presentada anteriormente fue cambiada y confirmada por el experimento realizado en la Universidad Técnica de Haifa (Buras, Netty y Sandbank, Enrico 1981). Estos autores, asimismo, señalaron que la cantidad de desecho debe ser controlada de manera tal, que se pueda abolir la penetración al músculo de los peces, mencionaron que el uso de concentraciones bajas de desechos no tiene efectos psicológicos en los consumidores de peces.

Sin embargo, si la concentración de desecho es muy alta, no existe crecimiento de peces debido a la falta de oxígeno. Cuando no se toma en consideración el umbral de los microorganismos, los peces pueden permanecer contaminados.

2.6. Premuestreo de la calidad del agua

Los peces, como todo ser vivo, necesitan un ambiente con las condiciones adecuadas para existir. Es por ello que realizar un premuestreo es tan importante como la propia investigación, ya que se obtienen los parámetros con los cuales se puede determinar si los peces a utilizar sobreviven a tales condiciones adversas. Cepis/OPS determinó los requisitos mínimos necesarios

de calidad para la utilización de peces en aguas residuales, los cuales se muestran en la figura 5.

Figura 5. **Requerimiento de calidad del agua para utilización de tilapia CEPIS/OPS**

<ul style="list-style-type: none">• Temperatura mínima• OD mínimo• DBO₅ total máximo• Fosforo máximo• Amonio máximo• Nitratos máximo• Nitritos máximo• Coliformes Fecales	<ul style="list-style-type: none">• 17°C• 2 mg/l• 60 mg/l• 5 mg/l• 0.5 mg/l• 40 mg/l• 0.75 mg/l• 100 NMP/100 ml
---	--

Fuente: *Aspectos técnicos de la acuicultura con aguas residuales*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (Cepis) y la Organización Panamericana de la Salud (OPS), 1992. p.40.

Con base en lo anterior se efectuó la evaluación del efluente, tomando en cuenta más parámetros de los requeridos por Cepis/OPS.

A continuación se muestran los resultados obtenidos del análisis físico-químico del agua proveniente de la laguna facultativa en la planta piloto Arturo Pazos.

Tabla VII. **Caracterización de las aguas residuales**

PARÁMETRO	CONCENTRACIÓN
DBO ₅	54 mg/L
DQO	182 mg/L
Fósforo total	4.9 mg/L
Potencial de hidrógeno	8.12
Oxígeno disuelto	3.35 mg/l
Temperatura	22.8 °C
Alcalinidad	238 mg/L
Turbiedad	89.4 NTU
Color real	39
Color aparente	441
Amoniaco	0.52 mg/L
Sólidos sedimentables	0.2 ml/L
Cloruros	60 mg/L
Sólidos suspendidos	20 mg/L
Nitritos	0.044 mg/L
Nitratos	6.3 mg/L
Amonio	0.55 mg/L
Coliformes fecales	90 NMP/100 ml

Fuente: elaboración propia.

2.7. Determinación de los parámetros a analizar en función de los peces

Los parámetros a evaluar en esta investigación se determinaron con base al proyecto de investigación: *“Reúso en acuicultura de las aguas residuales tratadas en las lagunas de estabilización de San Juan, Lima, Perú”* en el año 1991, elaborado por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (Cepis), y la Organización Panamericana de la Salud (OPS), con

colaboración de la Agencia Alemana de Cooperación Técnica (GTZ), el Banco Mundial y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.

Además de lo anterior, Cepis/OPS, también determinó los requerimientos de calidad del agua residual tratada para el cultivo de tilapia en 1992, como se observó en la figura 5, donde indican que la presencia de peces provoca la remoción de DBO₅, nitritos, nitratos, fósforo total y coliformes fecales; sin embargo, se consideran otros parámetros que garantizan la vida de los peces, por ello a continuación se presentan los parámetros a ser evaluados en la investigación.

Tabla VIII. **Parámetros seleccionados para su análisis**

Parámetros
OXÍGENO DISUELTO
DBO ₅
DQO
COLIFORMES FECALES
pH
SÓLIDOS TOTALES
FÓSFORO TOTAL
NITRITOS
NITRATOS

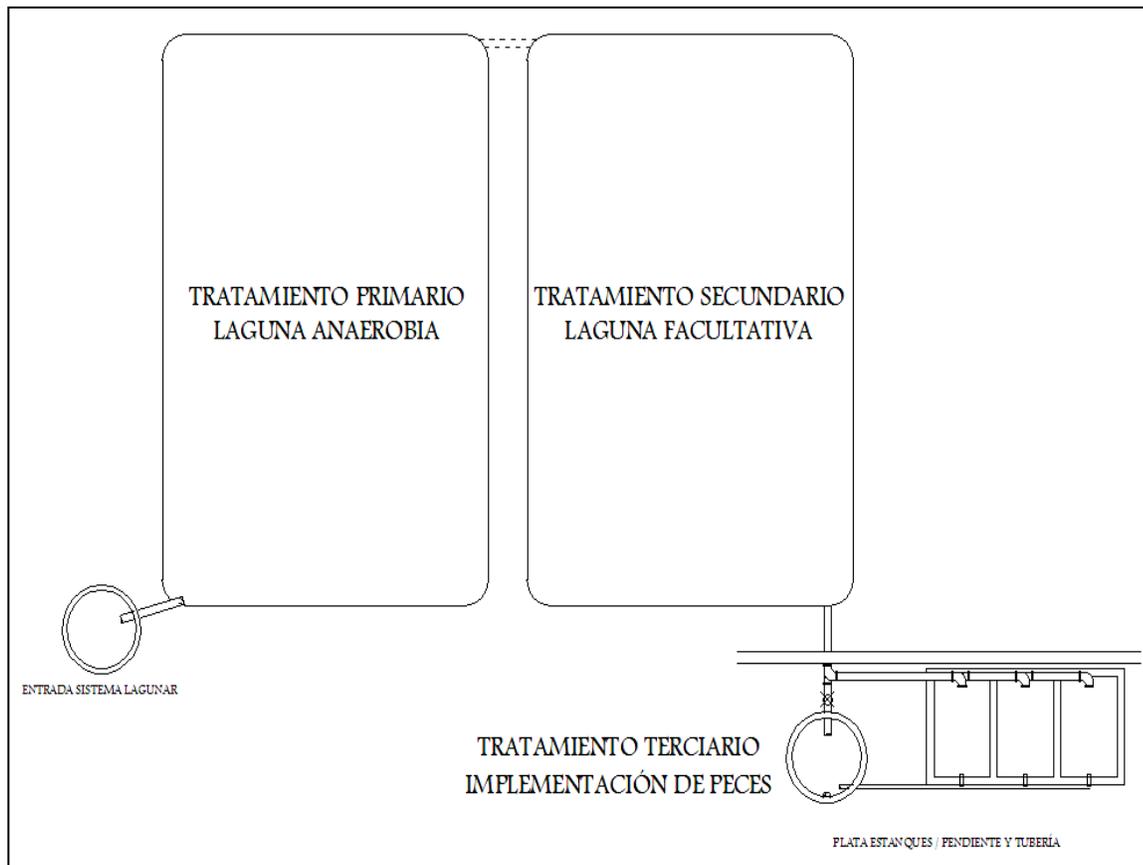
Fuente: elaboración propia.

2.8. Diseño del tratamiento terciario

Un estanque es un depósito cerrado de agua, sin corrientes, de un tamaño tal que puede ser utilizado como hábitat de peces. Como para las tilapias y las carpas, ya que se cultivan fácilmente y se obtienen buenas producciones si se sigue un plan de manejo adecuado. A continuación, en la figura 6 muestra la

metodología constructiva de los estanques utilizados en el siguiente estudio, así como la ubicación de los mismos.

Figura 6. **Esquema general del sistema de tratamiento lagunar e implementación de tratamiento terciario**



Fuente: elaboración propia, empleando programa AutoCAD 2012.

Para asegurar un comportamiento adecuado de los peces hay que introducir en el estanque una cantidad adecuada de ellos (figura 7). Si se hace con un número excesivo se tiene una sobrepoblación en el estanque, lo cual genera competencia de sobrevivencia y afecta la remoción. Por el contrario, al

introducir una cantidad de peces menor que la ideal, se utilizan pobremente los organismos naturales alimenticios, obteniéndose una baja remoción de parámetros.

Figura 7. **La diferencia en densidad afecta a los peces y a la utilización del alimento natural disponible en el estanque.**



Fuente: *Introducción al cultivo de peces en estanques*. International Center For Aquaculture And Aquatic Environments Auburn University. p. 53.

- Dimensionamiento del tratamiento terciario

El Centro de Estudios del Mar y Acuicultura (CEMA) de la Universidad de San Carlos de Guatemala recomendó la utilización de 25 alevines en un metro cuadrado de superficie con profundidad mínima de 50 centímetros.

Siguiendo esta recomendación se determinaron las dimensiones del tratamiento terciario como se muestra a continuación.

Datos:

Área mínima	=	1,00 m ²
Densidad de peces	=	25 alevines/m ²
Profundidad mínima	=	0,50 m
Relación largo/ancho	≈	1,50

$$\frac{\text{Largo}}{\text{Ancho}} = 1,50 \rightarrow \text{largo} = 1,50 \text{ ancho} \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$\text{Largo} * \text{ancho} = \text{área mínima} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Sustituyendo (1) en (2) se tiene,

$$1,50(\text{ancho})^2 = 1,00 \text{ m}^2 \rightarrow \text{ancho} = 0,82 \text{ m} \approx 0,80 \text{ m}$$

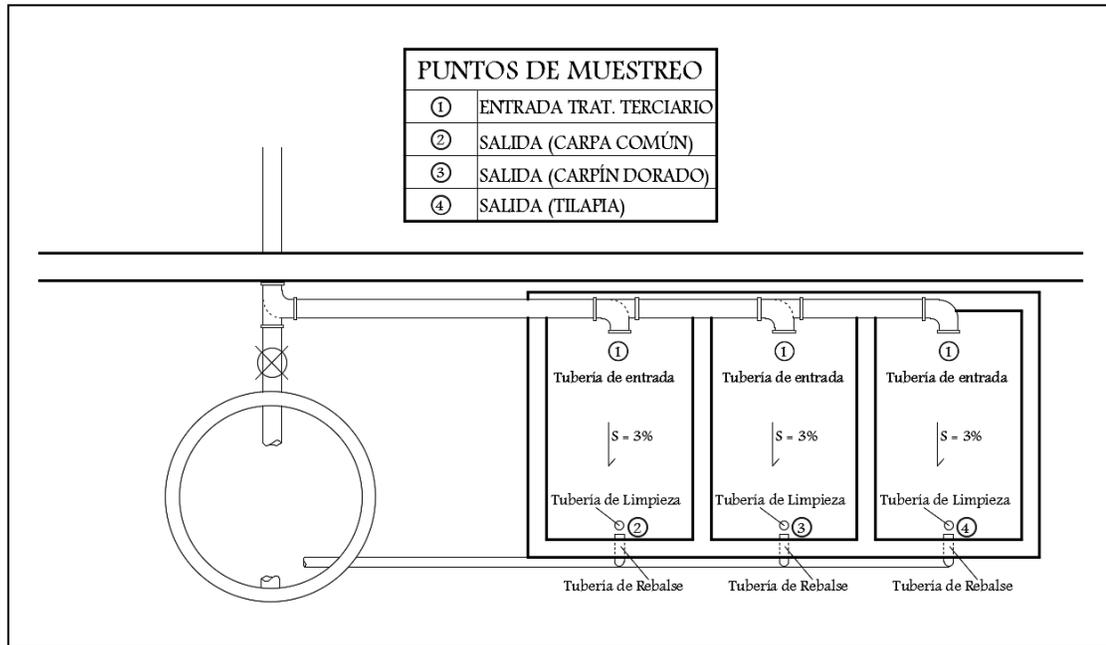
De (2) se obtiene el largo de la unidad,

$$\text{Largo} = \frac{\text{Área mínima}}{\text{Ancho}} = \frac{1,00 \text{ m}^2}{0,80 \text{ m}} = 1,25 \text{ m}$$

Los estanques serán de muros mampostería de 0,10 m de espesor, 1,00 m² de superficie y una capacidad de retención de 0,50 m³. Dentro de cada estanque se colocarán 25 alevines junior (6-12 cm de longitud), los tres estanques se colocarán en paralelo, obteniendo un llenado simétrico y

garantizando la circulación de agua en cada uno de ellos, es decir, de flujo continuo.

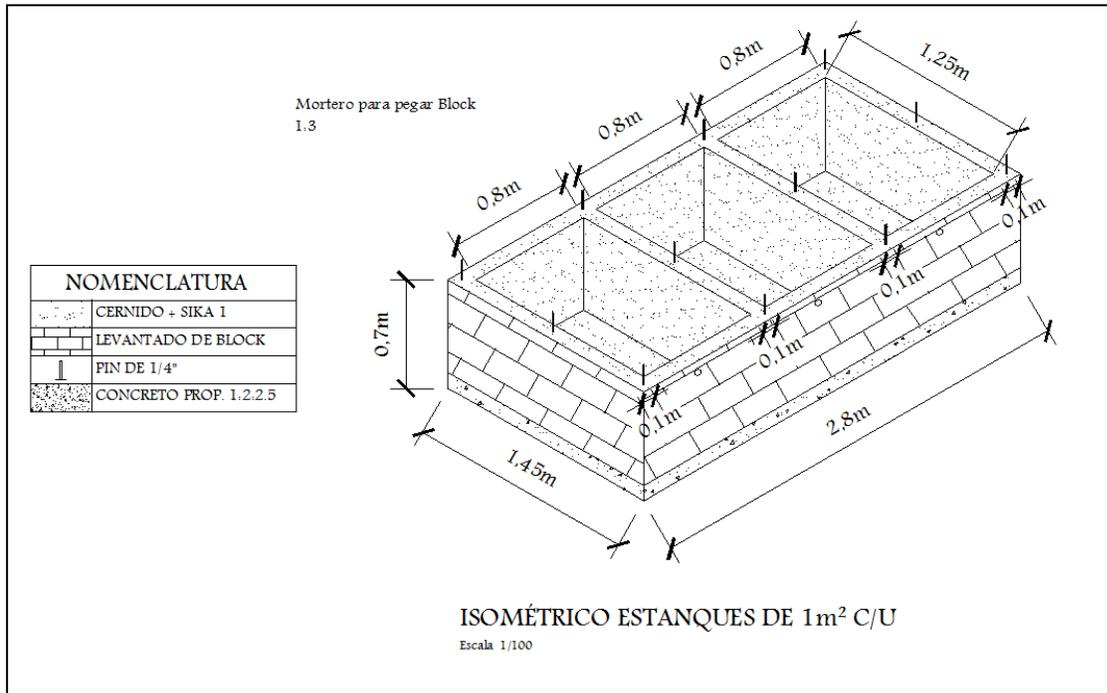
Figura 8. **Detalles del tratamiento terciario**



Fuente: elaboración propia, empleando programa AutoCAD 2012.

Cada pez tiene 20 litros de agua libre disponible dentro de la unidad de tratamiento, con ello se puede relacionar la eficiencia en la remoción de parámetros con el número de peces en un determinado volumen de agua, con un caudal constante y un tiempo de retención definido.

Figura 9. **Estanques de muros de mampostería confinada tipo tabique**



Fuente: elaboración propia, empleando programa AutoCad 2012.

- Tiempo de retención hidráulica del tratamiento terciario

El tiempo de retención hidráulica se calcula con la siguiente ecuación.

$$TRH = \frac{V_F}{Q_{med}}$$

Donde:

TRH = tiempo de retención hidráulica de la unidad de tratamiento, días

V_F = volumen de la unidad de tratamiento, m³

Q_{med} = caudal promedio, m³/día

- Cálculo del tiempo de retención hidráulico (THR)

A continuación se presenta el cálculo del tiempo de retención hidráulico de las unidades de tratamiento terciario utilizadas en el estudio.

Datos:

$$\begin{aligned} Q_{\text{med}} &= 0,11 \text{ L/s} = 9,50 \text{ m}^3/\text{día} \\ VF &= 0,50 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{TRH} = \frac{0,50 \text{ m}^3}{9,50 \text{ m}^3/\text{día}}$$

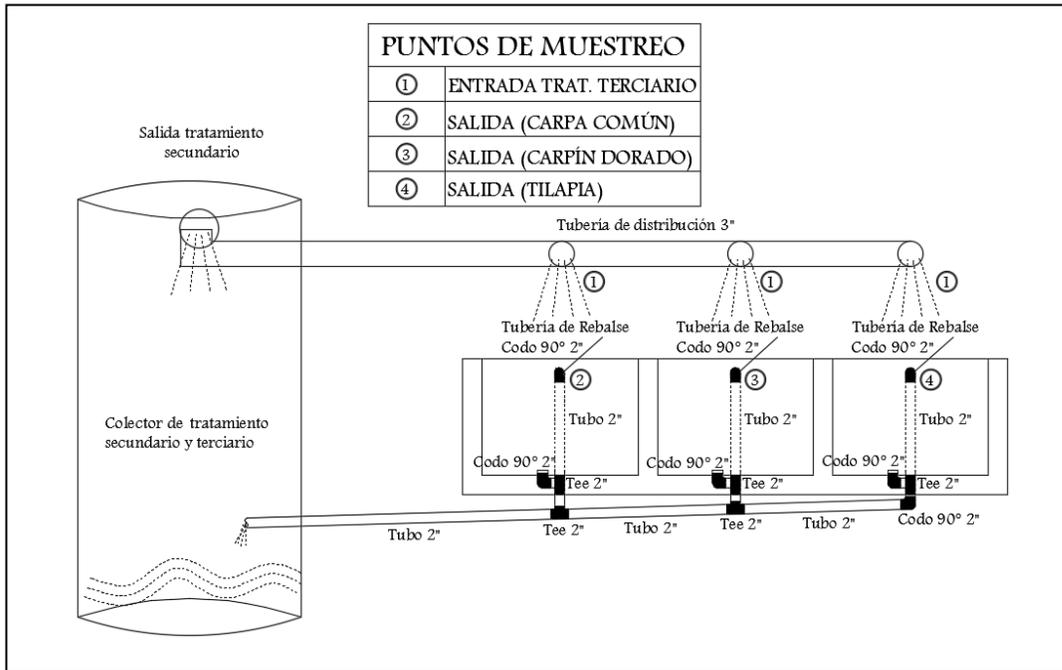
$$\text{TRH} = 0,053 \text{ días} \approx 76 \text{ minutos}$$

2.8.1. Aireación

Una baja concentración de oxígeno disuelto en el agua puede asfixiar los peces. Esta condición es producida por el exceso de comida y material orgánico, que al descomponerse consumen el oxígeno del agua. Si el consumo de oxígeno es elevado, los peces pueden morir asfixiados.

Los estanques deben ser monitoreados cuidadosamente para determinar si la concentración de oxígeno disuelto en el agua es la adecuada para los peces.

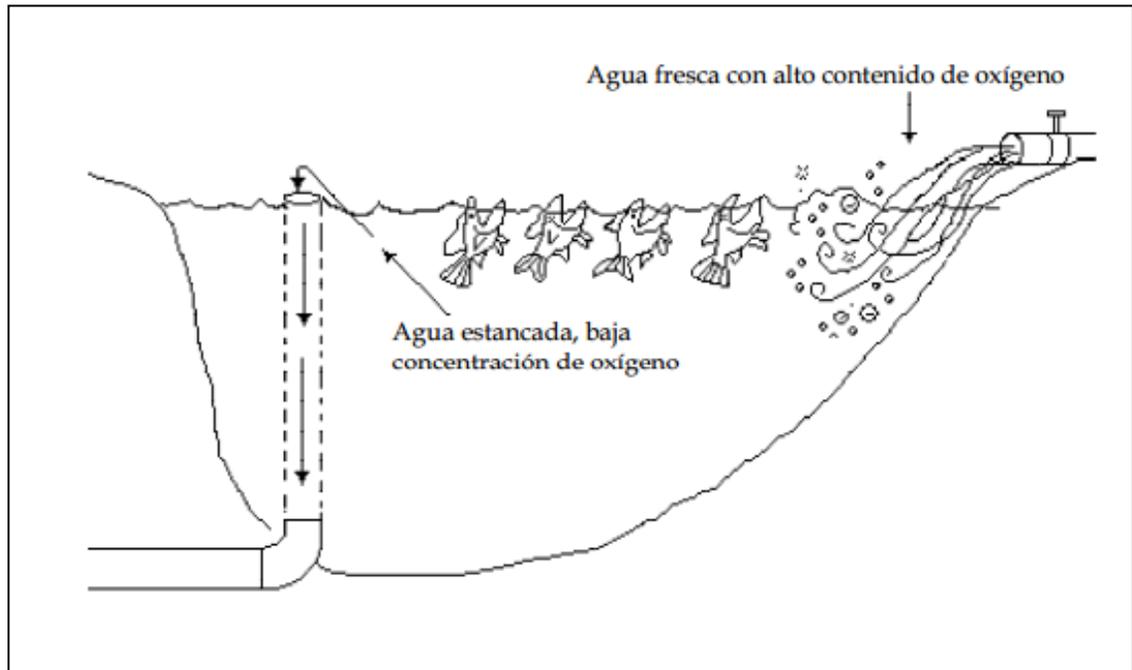
Figura 10. **Instalación de tubería en unidades de tratamiento terciario**



Fuente: elaboración propia, empleando programa AutoCAD 2012.

Con el objetivo de ayudar a los peces con la cantidad de oxígeno disuelto en los estanques, se implementó un sistema de entrada con flujo pistón, para que aportara de manera constante, y en forma de cascada valores aceptables de oxígeno disuelto, por lo general, cuando la concentración de oxígeno disuelto en el agua se agota, los peces suben a la superficie, en donde el agua está en contacto con la atmósfera y en donde los niveles de oxígeno son mayores (figura 11).

Figura 11. **Estanque con baja concentración de oxígeno disuelto en el agua.**



Fuente: *Introducción al cultivo de peces en estanques*. International Center For Aquaculture And Aquatic Environments Auburn University. p. 13.

Para evitar la condición de oxígeno disuelto bajo, el caudal de entrada presenta una caída tipo cascada de 50 cm, en cada uno de los tres estanques, lo cual genera la producción de burbujas y así obtener una mejor condición de oxígeno en los estanques que evite la asfixia o estrés en los peces.

2.9. Monitoreo de la calidad del agua

La frecuencia en la toma de muestras depende del estudio que se esté realizando. Se harán muestras puntuales una vez por quincena durante cuatro

meses hasta alcanzar un número total de 32 muestras, con el fin de evaluar el cambio en la calidad del agua al emplear peces en las aguas residuales tratadas.

El monitoreo quincenal será para determinar la calidad del agua utilizada en la fase experimental y garantizar que el agua mantenga una calidad adecuada para la sobrevivencia de los peces. Con esto se obtendrán los resultados necesarios para obtener conclusiones.

2.10. Resumen de la fase experimental

El uso de peces en las aguas residuales como tratamiento terciario es el principal objetivo de la investigación, por ello es necesario seguir el procedimiento adecuado para llevar a cabo la fase experimental. Se utilizarán estanques pequeños donde se implementó una caída de 50 cm para aumentar el oxígeno disuelto en el agua residual, ya que el valor obtenido durante la caracterización está en el límite permisible.

Se emplearán tres estanques y dentro de cada uno de ellos se colocará una especie de peces, recordando que se trabajará con tilapia, carpa común y carpín dorado. Los peces serán alevines junior y la cantidad en cada estanque es de 25 por especie, esto da un total de 75 peces. Cumpliendo una razón de 20 L de agua residual disponible por pez presente.

Los peces se obtendrán de estanques privados y serán transportados a la planta de tratamiento Arturo Pazos para su fase experimental. Una vez introducidos, se tomarán muestreos una vez por quincena durante cuatro meses, con el fin de obtener resultados.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

3.1. Resultados obtenidos en el tratamiento terciario

Con la intención de obtener resultados fiables y apegados a las condiciones del estudio experimental, se recopilaron 8 muestras en cada punto de interés de estudio, siendo estos la entrada a los 3 estanques y en cada salida respectivamente, los mismos fueron realizados con una frecuencia de muestreo quincenal (haciendo un total de 32 muestras) y los resultados obtenidos se muestran a continuación.

Tabla IX. Resultados de muestra realizada en fecha 12/9/2014

	entrada	Carpa	Carpín	Tilapia
DBO ₅ (mg/L)	35	24,5	33	25
DQO (mg/L)	201	183	191	187
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	91	83	86	85
pH	8,11	7,9	8	8,07
Sólidos totales disueltos (mg/L)	395	368	375	375
Fósforo total (mg/L)	5,1	4,8	5	4,9
Nitritos (mg/L)	0,056	0,053	0,055	0,054
Nitratos (mg/L)	5,4	5,2	5,3	5,1
Oxígeno disuelto mg/L)	3,55	3,1	3	3,2

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Resultados de muestra realizada en fecha 26/9/2014**

	entrada	Carpa	Carpín	Tilapia
DBO ₅ (mg/L)	36	31,6	30	25
DQO (mg/L)	204	201	197	187
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	61	58	55	60
pH	8	8,2	7,8	8,07
Sólidos totales disueltos (mg/L)	401	396,0	400	375
Fósforo total (mg/L)	5,8	5,1	5,6	4,9
Nitritos (mg/L)	0,052	0,049	0,051	0,048
Nitratos (mg/L)	5,9	5,4	5,8	5,2
Oxígeno disuelto mg/L)	4,3	3,8	3,9	3,7

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Resultados de muestra realizada en fecha 10/10/2014**

	entrada	Carpa	Carpín	Tilapia
DBO ₅ (mg/L)	49	47,0	46	45
DQO (mg/L)	229	220	216	211
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	40	36	35	38
pH	8	7,8	8	7
Sólidos totales disueltos (mg/L)	386	375,0	368	377
Fósforo total (mg/L)	6	5,5	5	5
Nitritos (mg/L)	0,051	0,048	0,049	0,05
Nitratos (mg/L)	5,7	5,5	5,3	5,4
Oxígeno disuelto mg/L)	4	3,8	4	4

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Resultados de muestra realizada en fecha 24/10/2014**

	entrada	Carpa	Carpín	Tilapia
DBO ₅ (mg/L)	45	43,2	42	43
DQO (mg/L)	192	184,3	179	182
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	44	45,0	41	45
pH	7,9	7,6	7	8
Sólidos totales disueltos (mg/L)	376	361,0	350	357
Fósforo total (mg/L)	6	6,0	6	6
Nitritos (mg/L)	0,056	0,054	0,053	0,052
Nitratos (mg/L)	6,0	5,9	5,4	5,8
Oxígeno disuelto mg/L)	3,7	3,5	3	3

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Resultados de muestra realizada en fecha 07/11/2014**

	entrada	Carpa	Carpín	Tilapia
DBO ₅ (mg/L)	35	30,4	33	31
DQO (mg/L)	201	196	191	200
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	91	81	86	83
pH	8,11	7,7	8	7,9
Sólidos totales disueltos (mg/L)	395	392	381	394
Fósforo total (mg/L)	6,4	5,7	6	5,8
Nitritos (mg/L)	0,053	0,051	0,051	0,052
Nitratos (mg/L)	6,2	6,0	5,8	5,7
Oxígeno disuelto mg/L)	4,2	3,5	4,0	3,1

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Resultados de muestra realizada en fecha 21/11/2014**

	entrada	Carpa	Carpín	Tilapia
DBO ₅ (mg/L)	36	35,0	33	32
DQO (mg/L)	204	201	202	187
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	61	52	50	60
pH	8	7,9	8,1	8,07
Sólidos totales disueltos (mg/L)	342	312,0	321	319
Fósforo total (mg/L)	5,4	5,1	5,3	4,9
Nitritos (mg/L)	0,057	0,056	0,049	0,053
Nitratos (mg/L)	5,5	5,3	5,2	5,4
Oxígeno disuelto mg/L)	3,9	3,8	3,7	3,6

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Resultados de muestra realizada en fecha 09/1/2015**

	entrada	Carpa	Carpín	Tilapia
DBO ₅ (mg/L)	34	33,0	32	32
DQO (mg/L)	204	196	192	188
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	67	64	63	61
pH	8,1	8,1	8	8
Sólidos totales disueltos (mg/L)	387	358,0	361	380
Fósforo total (mg/L)	6	5,5	5	5
Nitritos (mg/L)	0,049	0,048	0,048	0,047
Nitratos (mg/L)	5,4	5,2	5,3	5,1
Oxígeno disuelto mg/L)	3,7	3,6	3,5	3,5

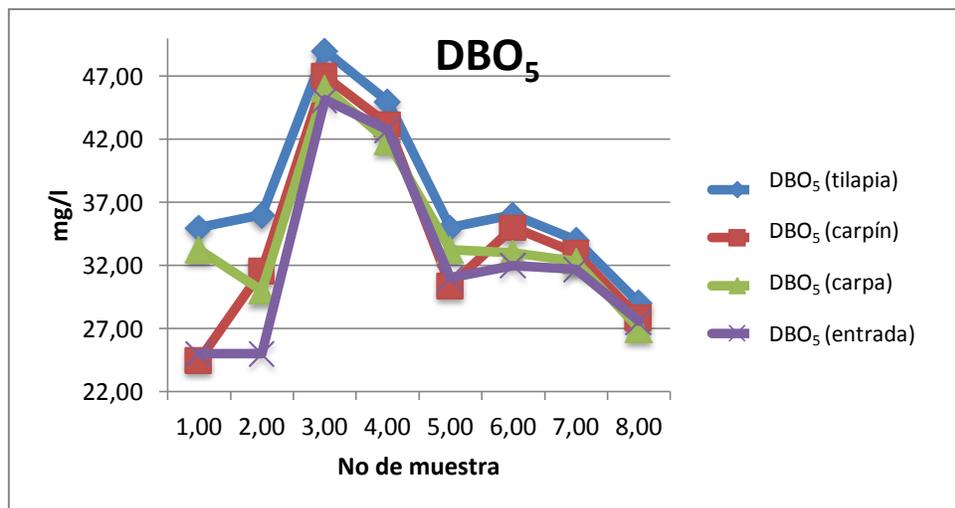
Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Resultados de muestra realizada en fecha 23/01/2015**

	entrada	Carpa	Carpín	Tilapia
DBO ₅ (mg/L)	29	27,8	27	28
DQO (mg/L)	186	184,6	185	183
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	41	40,0	38	40
pH	7,8	7,5	7	7
Sólidos totales disueltos (mg/L)	339	325,4	332	331
Fósforo total (mg/L)	7	6,6	6	7
Nitritos (mg/L)	0,056	0,053	0,054	0,053
Nitratos (mg/L)	5,9	5,3	5,4	5,7
Oxígeno disuelto mg/L)	4,2	4,0	3,7	4,0

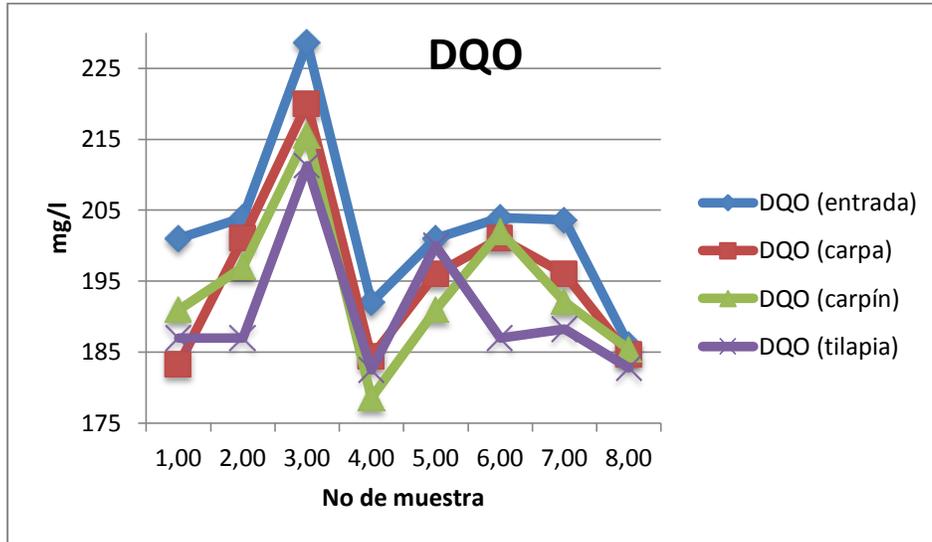
Fuente: elaboración propia.

Figura 12. **Comportamiento de los valores muestreados en DBO₅**



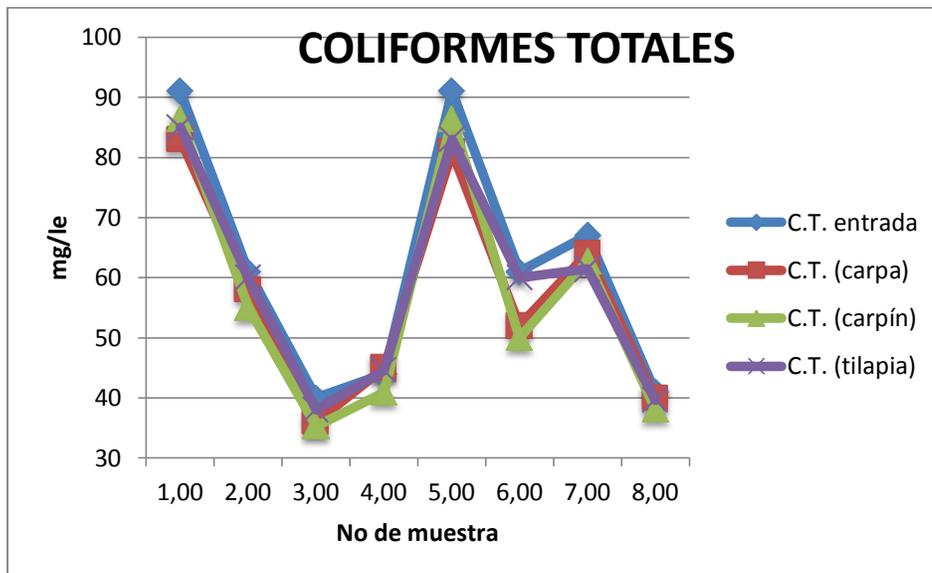
Fuente: elaboración propia.

Figura 13. Comportamiento de los valores muestreados en DQO



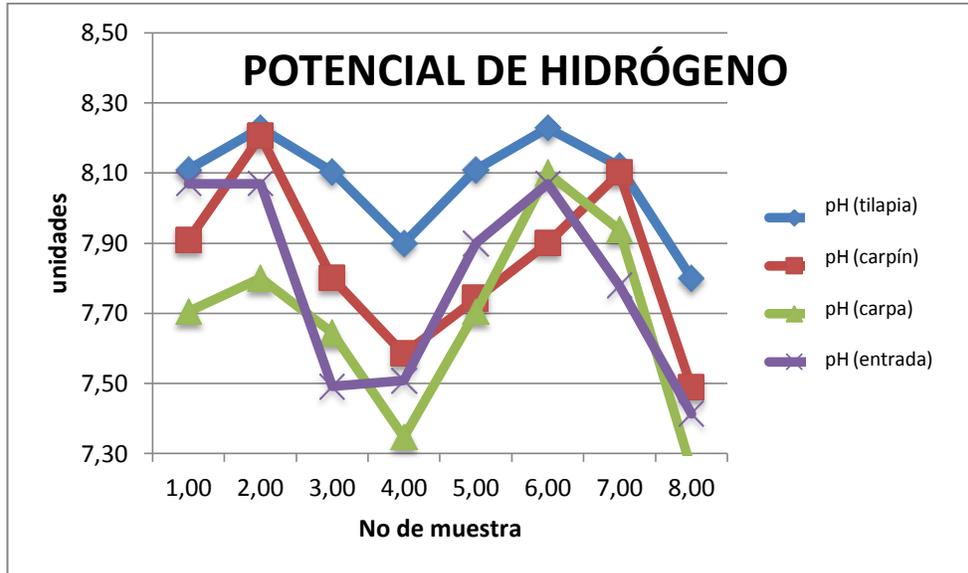
Fuente: elaboración propia.

Figura 14. Comportamiento de los valores muestreados en Coliformes fecales



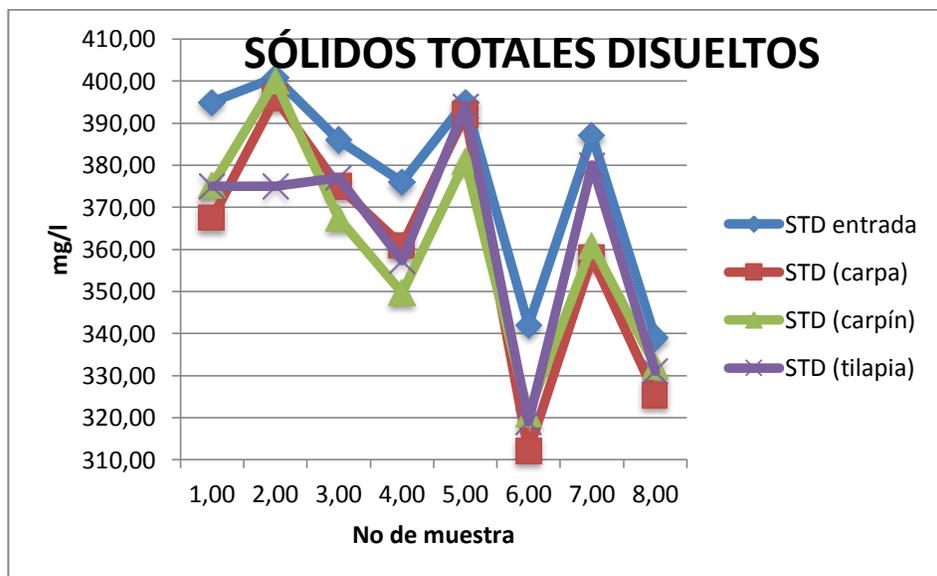
Fuente: elaboración propia.

Figura 15. Comportamiento de los valores muestreados en pH



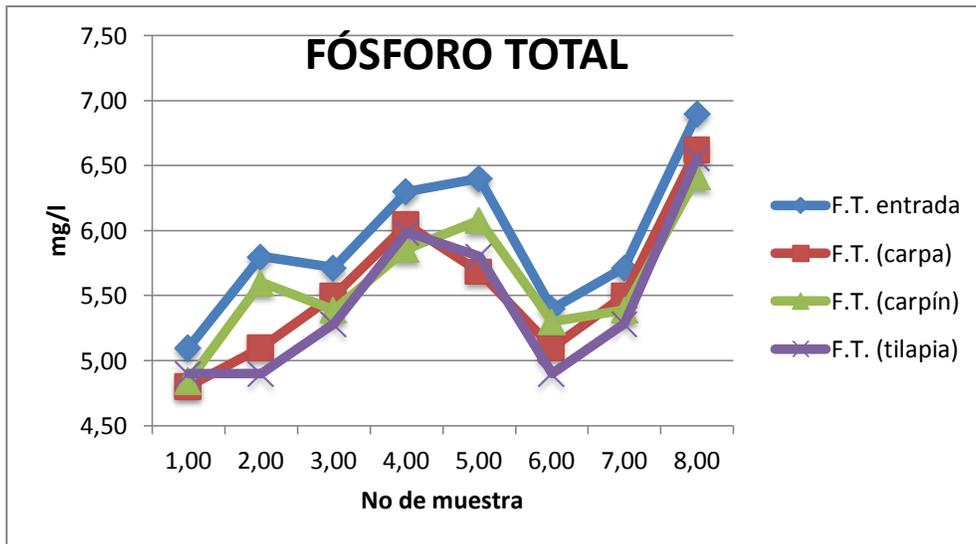
Fuente: elaboración propia.

Figura 16. Comportamiento de los valores muestreados en STD



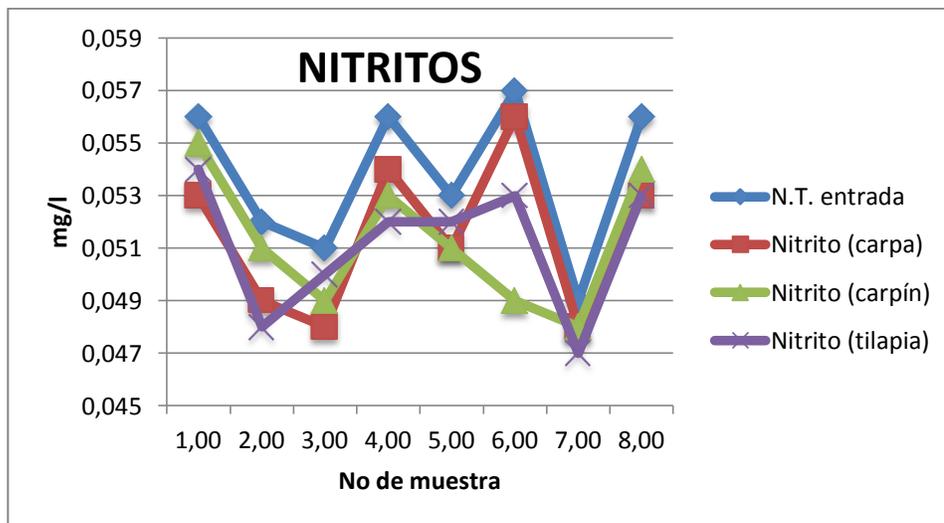
Fuente: elaboración propia.

Figura 17. **Comportamiento de los valores muestreados en fósforo total**



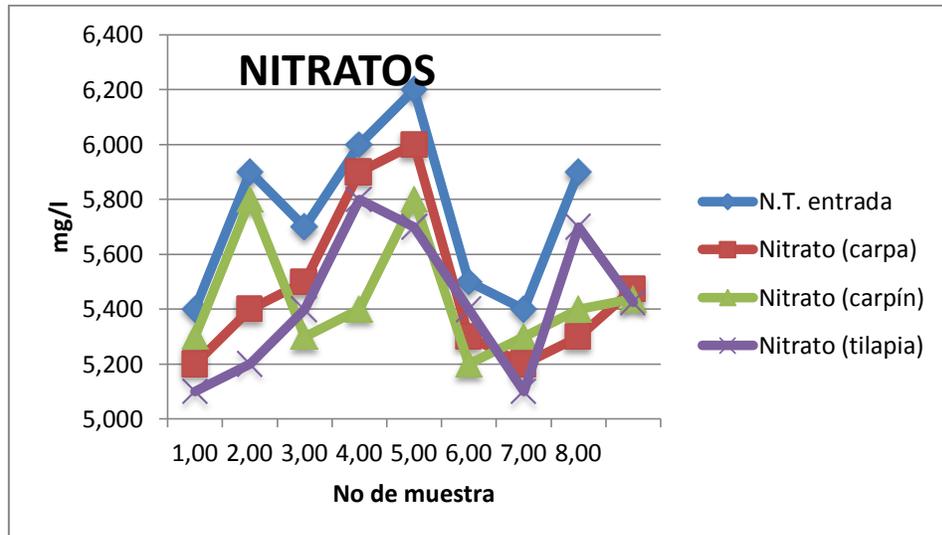
Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Comportamiento de los valores muestreados en nitritos**



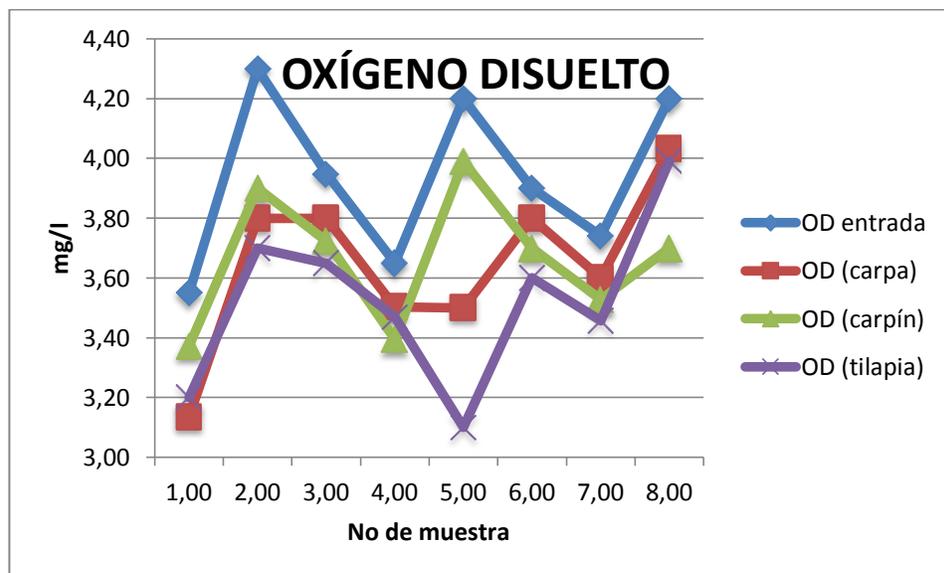
Fuente: elaboración propia.

Figura 19. Comportamiento de los valores muestreados en nitratos



Fuente: elaboración propia.

Figura 20. Comportamiento de los valores muestreados en oxígeno disuelto



Fuente: elaboración propia.

3.2. Tasa de mortalidad de peces

La tasa de mortalidad general es la proporción de peces que fallecen respecto al total de la población (usualmente expresada en tanto por mil, ‰), la tasa de mortalidad particular se refiere a la proporción de peces con una característica particular que mueren respecto al total de peces que tienen esa característica.

3.3. Tasa de letalidad de peces

Es la proporción de peces que mueren por una condición entre los afectados por la misma en un periodo y área determinados. Es un indicador de la gravedad de dicha condición.

Para que se pueda realizar es necesario registrar todos los peces en el área específica de estudio y el número de peces que mueren estando presentes en esa condición.

A continuación se calcularán las tasas de mortalidad y letalidad generales y particulares.

Datos:

Número total de peces = 75

Número de peces (carpa común) = 25

Número de muertes (carpa común) = 3

Número de peces (carpa dorada) = 25

Número de muertes (carpa dorada) = 5

Número de peces (tilapia) = 25

Número de muertes (tilapia) = 2

Tasa de mortalidad general

$$m_G(\text{‰}) = \frac{\text{núm. total de peces muertos}}{\text{núm. total de peces presentes}} \times 1\,000$$

$$m_G(\text{‰}) = \frac{10}{75} \times 1\,000 = 133 \text{ de cada } 1\,000$$

Tasa de letalidad general

$$L(\%) = \frac{\text{núm. total de peces muertos}}{\text{núm. total de peces presentes}} \times 100$$

$$L(\%) = \frac{10}{75} \times 100 = 13 \text{ de cada } 100$$

Tasa de mortalidad particular (carpa común)

$$m_G(\text{‰}) = \frac{\text{núm. de muertes (carpa común)}}{\text{núm. de peces (carpa común)}} \times 1\,000$$

$$m_G(\text{‰}) = \frac{3}{25} \times 1\,000 = 120 \text{ de cada } 1\,000$$

Tasa de letalidad particular (carpa común)

$$L(\%) = \frac{\text{núm. de muertes (carpa común)}}{\text{núm. de peces (carpa común)}} \times 100$$

$$L(\%) = \frac{3}{25} \times 100 = 12 \text{ de cada } 100$$

Tasa de mortalidad particular (carpa dorada)

$$m_G(\text{‰}) = \frac{\text{núm. de muertes (carpa dorada)}}{\text{núm. de peces (carpa dorada)}} \times 1\,000$$

$$m_G(\text{‰}) = \frac{5}{25} \times 1000 = 200 \text{ de cada } 1\,000$$

Tasa de letalidad particular (carpa dorada)

$$L(\%) = \frac{\text{núm. de muertes (carpa dorada)}}{\text{núm. de peces (carpa dorada)}} \times 100$$

$$L(\%) = \frac{5}{25} \times 100 = 20 \text{ de cada } 100$$

Tasa de mortalidad particular (tilapia)

$$m_G(\text{‰}) = \frac{\text{núm. de muertes (tilapia)}}{\text{núm. de peces (tilapia)}} \times 1\,000$$

$$m_G(\text{‰}) = \frac{2}{25} \times 1\,000 = 80 \text{ de cada } 1\,000$$

Tasa de letalidad particular (tilapia)

$$L(\%) = \frac{\text{núm. de muertes (tilapia)}}{\text{núm. de peces (tilapia)}} \times 100$$

$$L(\%) = \frac{2}{25} \times 100 = 8 \text{ de cada } 100$$

Tabla XVII. **Resumen de índice de mortalidad y letalidad**

	ÍNDICE DE MORTALIDAD GENERAL ‰	ÍNDICE DE MORTALIDAD PARTICULAR ‰	ÍNDICE DE LETALIDAD GENERAL %	ÍNDICE DE LETALIDAD PARTICULAR %
CARPA COMÚN	-	120	-	12
CARPA DORADA	-	200	-	20
TILAPIA	-	80	-	8
GENERAL	133	-	13	-

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Porcentajes de remoción en los parámetros analizados en función de cada tipo de estanque**

Parámetro	Carpa	Carpín	Tilapia
DBO ₅	8,87	7,45	12,99
DQO	3,33	4,17	5,83
COLIFORMES FECALES	7,74	7,89	5,99
PH	2,90	4,81	3,56
SÓLIDOS TOTALES	4,43	4,41	3,72
FÓSFORO TOTAL	6,28	5,17	7,86
NITRITOS	4,19	4,65	4,88
NITRATOS	4,78	5,43	5,65
OXÍGENO DISUELTO	9,22	6,92	12,45

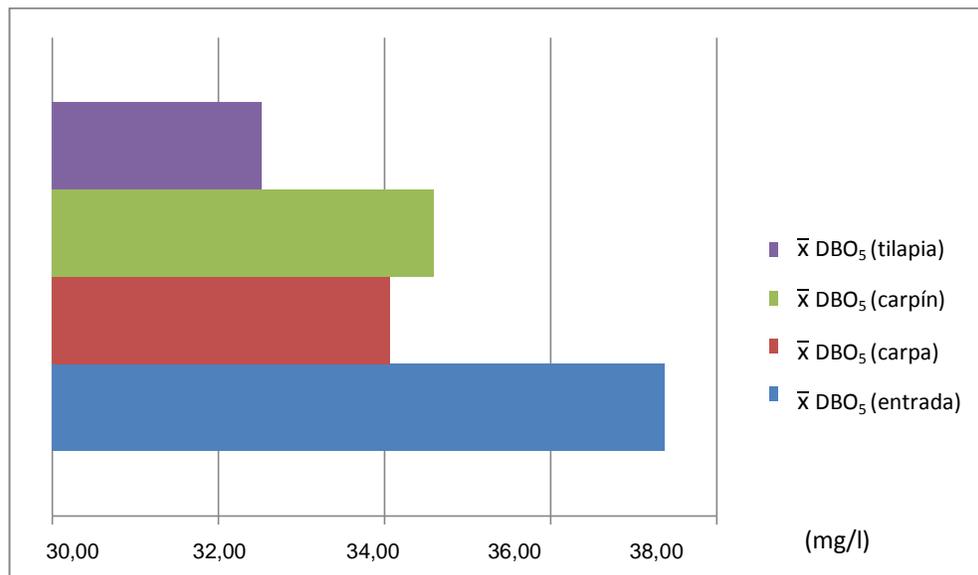
Fuente: elaboración propia.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Análisis general del tratamiento terciario

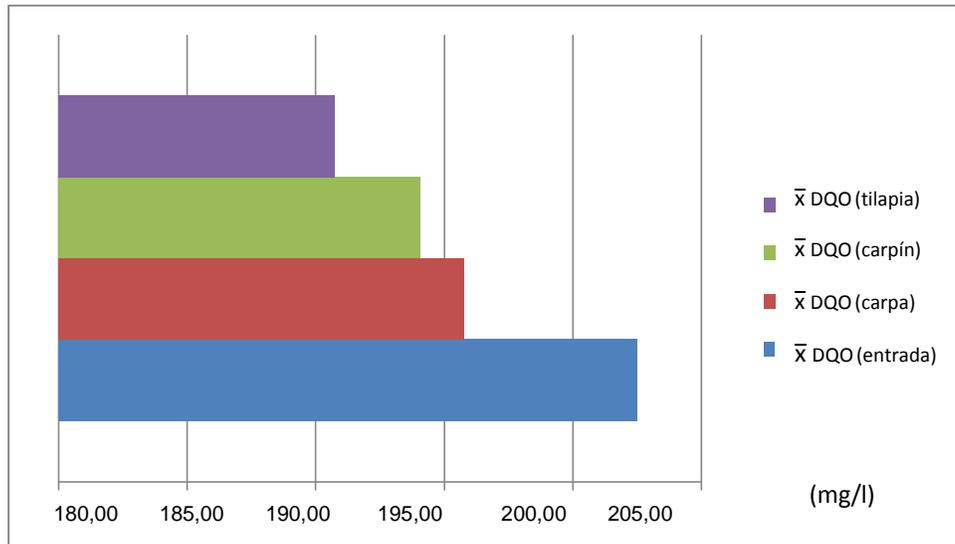
Con la intención de analizar la efectividad de la utilización de peces como tratamiento terciario, se muestran a continuación la comparación de los resultados de los parámetros analizados en la entrada de los estanques implementados, versus el promedio de los resultados obtenidos en las 8 muestras correspondientes a cada uno de los 3 estanques y su respectiva especie de pez.

Figura 21. Comparación parámetro DBO₅



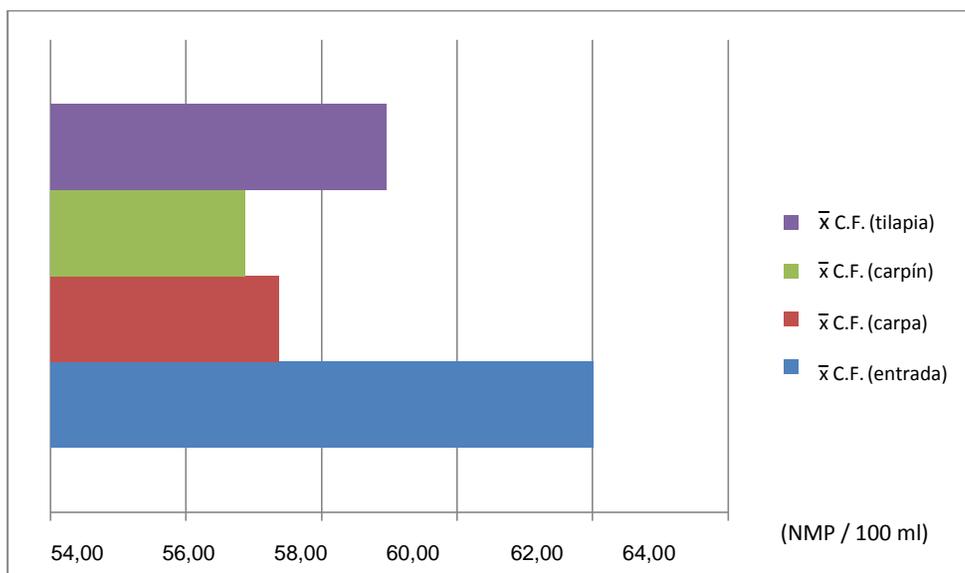
Fuente: elaboración propia.

Figura 22. Comparación parámetro DQO



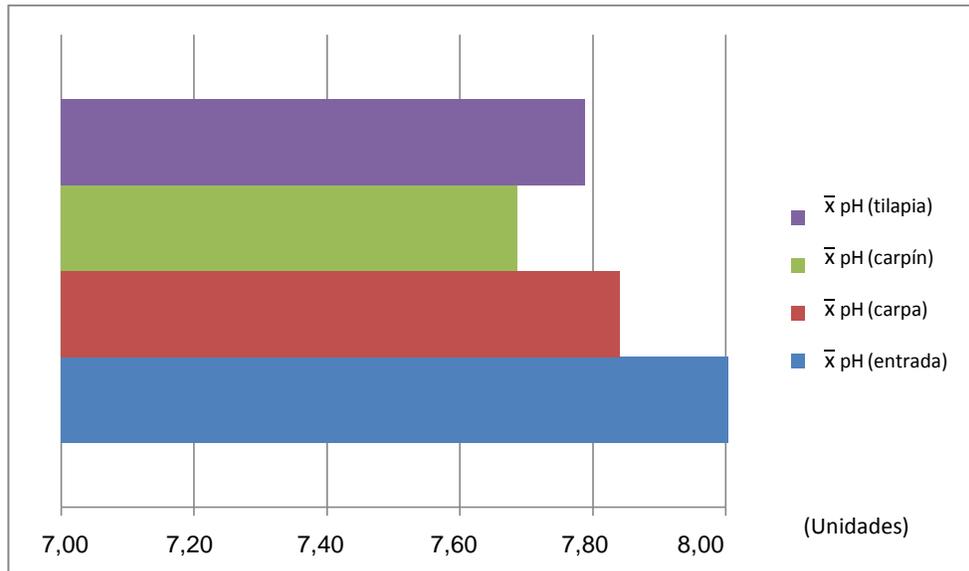
Fuente: elaboración propia.

Figura 23. Comparación parámetro coliformes fecales



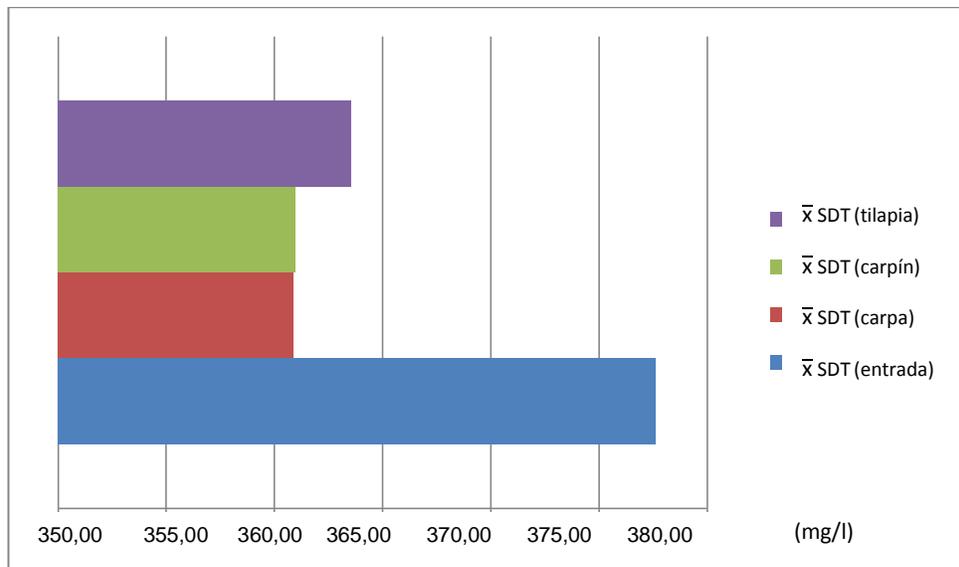
Fuente: elaboración propia.

Figura 24. Comparación parámetro pH



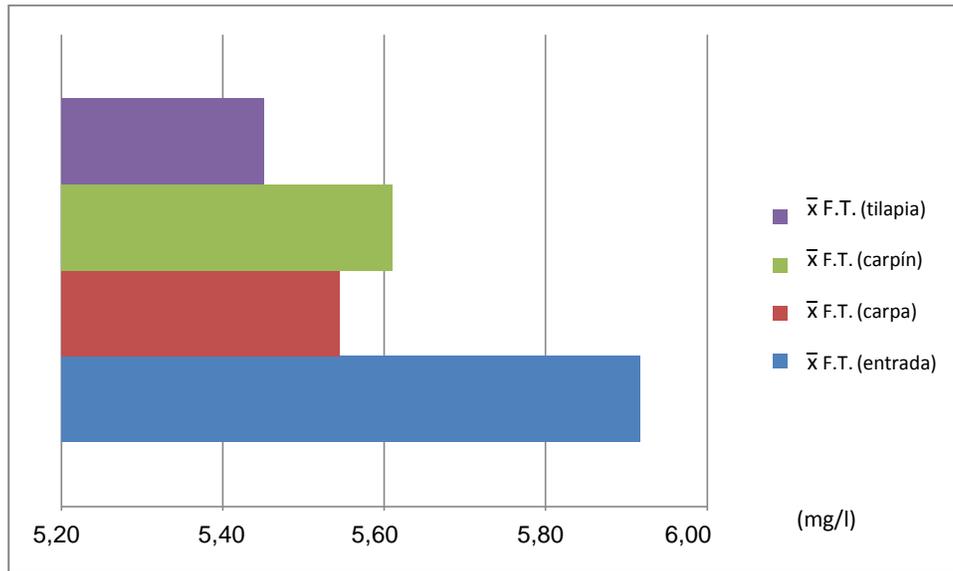
Fuente: elaboración propia.

Figura 25. Comparación parámetro STD



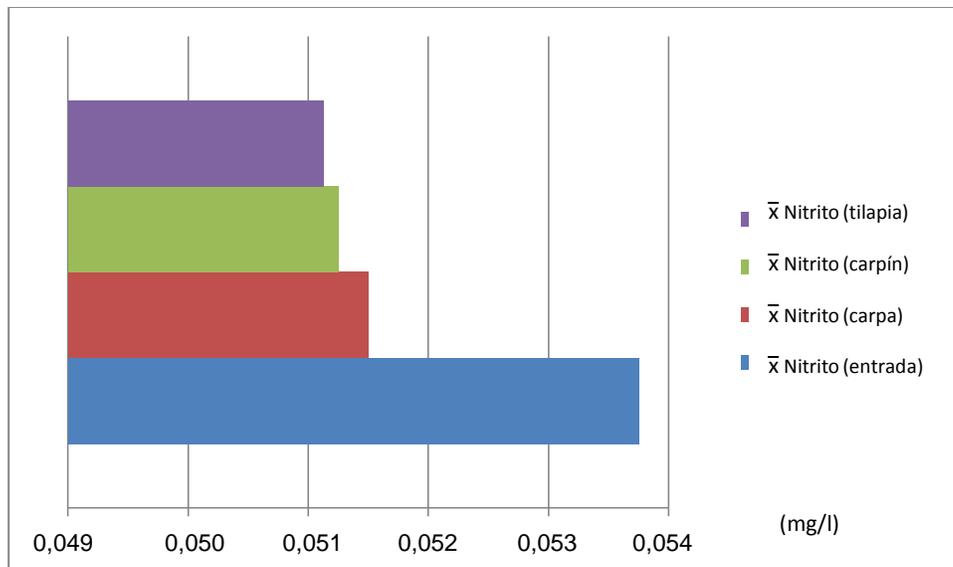
Fuente: elaboración propia.

Figura 26. **Comparación parámetro fósforo total**



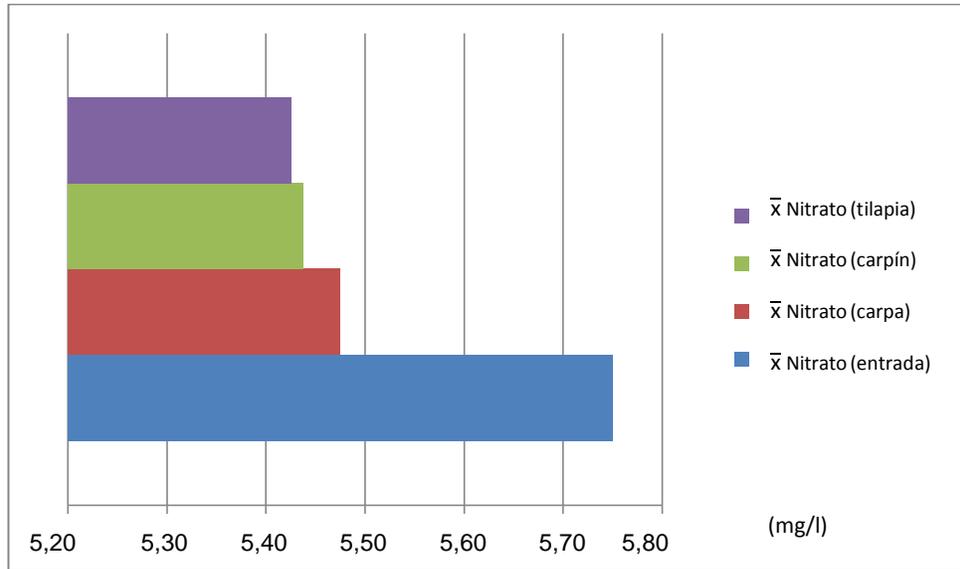
Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Comparación parámetro nitritos**



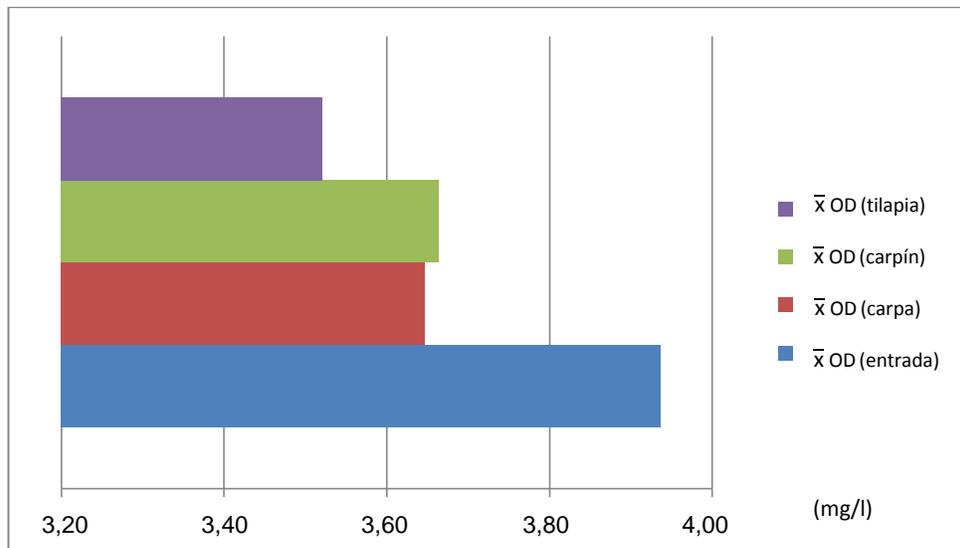
Fuente: elaboración propia.

Figura 28. **Comparación parámetro nitratos**



Fuente: elaboración propia.

Figura 29. **Comparación parámetro oxígeno disuelto**



Fuente: elaboración propia.

4.1.1. Evaluación por especie

Según el estudio realizado se puede observar una tendencia de remoción aportada por las tres especies de peces en los estanques con aguas provenientes de las lagunas facultativas, en donde, considerando que estos se encontraban en condiciones no óptimas de crecimiento, se beneficiaron de los nutrientes que estaban en el agua residual y redujeron, en cierta manera, sus características.

Observando la tabla XXI se logra apreciar que los porcentajes de remoción más altos se produjeron por la tilapia, ya que esta especie tiende a adaptarse a situaciones no óptimas de crecimiento, y a la vez muestran una mejor adaptabilidad a las condiciones presentes en el agua residual, se observa también que estas redujeron la cantidad de oxígeno disuelto debido a que necesitan más cantidades para reproducirse.

Para implementar el uso de peces en plantas de tratamiento de agua residual, especialmente en el proceso posterior a las lagunas facultativas, es necesario conocer que la eficiencia de remoción estará en función de la cantidad de peces que se utilicen, en donde a mayor cantidad de peces existan, será necesario implementar una forma de alimentación para que la especie pueda reproducirse, a continuación se analizan los resultados obtenidos en función de cada tipo de pez.

4.1.1.1. Carpa

En la tabla XIX se observan los porcentajes promedio de remoción de cada uno de los parámetros analizados por la presencia de la carpa común.

Tabla XIX. **Porcentajes de remoción por presencia de la carpa común en la unidad de tratamiento terciario**

Parámetro	Carpa común
DBO ₅	8,87 %
DQO	3,33 %
COLIFORMES FECALES	7,74 %
PH	2,90 %
SÓLIDOS TOTALES	4,43 %
FÓSFORO TOTAL	6,28 %
NITRÓGENO TOTAL	3,73 %
OXÍGENO DISUELTO	9,22 %

Fuente: elaboración propia.

Como se muestra en la tabla XIX, el oxígeno disuelto presenta un porcentaje de remoción con un valor de 9,22 % debido a que los peces necesitan de él para respirar. La DBO₅ presentó un porcentaje de remoción del 8,87 %, sin embargo, no llegó a los niveles esperados. Los coliformes totales presentaron una remoción de 7,74%. El fósforo total sufrió una remoción del 6,28 %, arriba de lo esperado. Los demás parámetros presentaron una remoción abajo del 5 %, sin embargo, eran parte del control de calidad para garantizar la supervivencia de la carpa común. La reducción de los parámetros se debe a la alimentación de los peces, al ser un periodo de retención relativamente corto, las heces de los peces no perjudican la calidad del agua, y como se observa existe mínima mejoría del efluente.

4.1.1.2. Carpín dorado

En la tabla XX se observan los porcentajes promedio de remoción de cada uno de los parámetros analizados por la presencia del carpín dorado.

Tabla XX. **Porcentajes de remoción por presencia del carpín dorado en la unidad de tratamiento terciario**

Parámetro	Carpín dorado
DBO ₅	7,45 %
DQO	4,17 %
COLIFORMES FECALES	7,89 %
PH	4,81 %
SÓLIDOS TOTALES	4,41 %
FÓSFORO TOTAL	5,17 %
NITRÓGENO TOTAL	4,47 %
OXÍGENO DISUELTO	6,92 %

Fuente: elaboración propia.

Como se muestra en la tabla XX, el oxígeno disuelto presenta un porcentaje de remoción con un valor de 6,92 % debido a que los peces necesitan de él para respirar. La DBO₅ presentó un porcentaje de remoción del 7,45 %, sin embargo, no llegó a los niveles esperados. Los coliformes totales presentaron una remoción de 7,89 %, el fósforo total sufrió una remoción del 5,17 %, arriba de lo esperado. Los demás parámetros presentaron una remoción abajo del 5 %, sin embargo, eran parte del control de calidad para garantizar la supervivencia del carpín dorado. La reducción de los parámetros se debe a la alimentación de los peces, al ser un periodo de retención relativamente corto, las heces de los peces no perjudican la calidad del agua, y como se observa existe mínima mejoría del efluente.

4.1.1.3. Tilapia

En la tabla XXI se observan los porcentajes promedio de remoción de cada uno de los parámetros analizados por la presencia de la tilapia.

Tabla XXI. **Porcentajes de remoción por presencia de la tilapia en la unidad de tratamiento terciario**

Parámetro	Tilapia
DBO ₅	12,99 %
DQO	5,83 %
COLIFORMES FECALES	5,99 %
PH	3,56 %
SÓLIDOS TOTALES	3,72 %
FÓSFORO TOTAL	7,86 %
NITRÓGENO TOTAL	4,48 %
OXÍGENO DISUELTO	12,45 %

Fuente: elaboración propia.

Como se muestra en la tabla XXI, el oxígeno disuelto presenta un porcentaje de remoción con un valor de 12,99 % debido a que los peces necesitan de él para respirar. La DBO₅ presentó un porcentaje de remoción del 7,45 %, sin embargo, no llegó a los niveles esperados. Los coliformes totales presentaron una remoción de 5,99 %, el fósforo total sufrió una remoción del 7,86 %, arriba de lo esperado. Los demás parámetros presentaron una remoción abajo del 5 %, sin embargo, eran parte del control de calidad para garantizar la supervivencia de la tilapia. La reducción de los parámetros se debe a la alimentación de los peces, al ser un periodo de retención relativamente corto, las heces de los peces no perjudican la calidad del agua, y como se observa existe mínima mejoría del efluente.

4.2. Interpretación de resultados

En los estudios realizados por Cepis/OPS, la presencia de peces en lagunas de estabilización mejora la calidad del agua del efluente. Para DBO_5 una mejoría promedio del 38 %, para el fósforo total 3 % y para coliformes totales 15 %.

Al comparar esos resultados con los obtenidos se puede comprobar que efectivamente la presencia de peces mejora la calidad del agua. Sin embargo, existe una diferencia en el proceso, ya que Cepis/OPS utilizó peces directamente en la laguna de estabilización.

Como tratamiento terciario presentó un porcentaje de remoción bajo lo cual no hace viable su utilización para tal fin, sin embargo, pueden implementarse como bioindicadores capaces de sobrevivir en estas aguas tratadas.

La reducción del oxígeno disuelto se debe a la presencia de los propios peces, ya que por medio de las branquias obtienen el oxígeno disponible en el agua dentro de la unidad de tratamiento. Oscilando entre 6,92 y 12,45 %.

La demanda bioquímica de oxígeno de cinco días (DBO_5) es la cantidad de OD necesario para que organismos aeróbicos dentro del agua descompongan la materia orgánica presente a una temperatura constante durante un período de cinco días. Entre mayor sea el DBO, más rápidamente se está agotando el oxígeno. La reducción de este parámetro se dio, principalmente, por la presencia de los peces quienes se alimentaron de la materia orgánica, evitando así el consumo de oxígeno para su descomposición. La remoción osciló de 7,45 a 12,99%.

La reducción de coliformes totales se presentó en un porcentaje de 5,99 a 7,89 %. Los peces dentro de su proceso de alimentación consumen parte del grupo coliforme fecal, incluyendo los coliformes fecales, es por ello que si se requieren los peces con fines de cultivo es necesario evaluar su calidad, dependiendo del número de bacterias en los músculos se pueden clasificar como muy buenos, aceptables o rechazables. En esta investigación no se consideró la calidad de los peces para consumo.

El fósforo es un nutriente fundamental para los seres vivos, el fósforo es considerado como un parámetro crítico en la calidad de las aguas debido a su influencia en el proceso de eutrofización. Es indeseable porque ayuda al crecimiento de las plantas y algas. La disminución de este parámetro fue fundamentalmente por la presencia de algas y plantas acuáticas de las cuales los peces se alimentan. Los porcentajes de remoción variaron de 5,17 a 7,86 %.

Los parámetros restantes no se interpretaron debido al bajo porcentaje de remoción, lo que indica que la presencia de los peces no tiene influencia en su reducción.

CONCLUSIONES

1. Se comprobó que la presencia de peces como tratamiento terciario mejora la calidad del agua proveniente de la laguna facultativa, sin embargo, como se logra observar en los resultados, la eficiencia está por debajo del 20 % esperado para la remoción de DBO₅, fósforo total y coliformes fecales.
2. La caracterización de las aguas residuales domésticas en la salida de la laguna facultativa permitió conocer las condiciones en las cuales iban a estar presentes los peces a utilizar, logrando verificar que las condiciones eran, si bien desfavorables, la misma adaptabilidad de los peces ayudarían a que fuera posible su sobrevivencia, ya que se cumplían los límites permisibles a los cuales pueden ser sometidos.
3. La implementación de peces como tratamiento terciario en aguas residuales domésticas puede ser útil para determinar la calidad del efluente, sin embargo, si se desea implementar con el objetivo principal de remover parámetros físicos, químicos y microbiológicos del agua la eficiencia estará muy por debajo de lo esperado y no es recomendable para tal propósito.
4. La eficiencia del tratamiento terciario no cumplió con las expectativas generadas al principio de la investigación, sin embargo, se pudo concluir que la tilapia es el pez que mejor resultados de eficiencia en la remoción proporcionó, debido a su facilidad de adaptación a los ambientes críticos,

esto provocó la reducción de hasta el 10 % de DBO₅, fósforo total y coliformes fecales.

RECOMENDACIONES

1. La implementación de peces se puede llevar a cabo en procesos de tratamiento donde el origen las aguas descargadas sea doméstico, ya que los peces al igual que todo ser vivo soporta ciertas características para sobrevivir.
2. Utilizar peces en los efluentes tratados de las aguas residuales domésticas funciona como bioindicadores y con ello se logra comprobar la calidad del agua, luego de pasar por los sistemas de tratamiento seleccionados.
3. Es posible implementar peces directamente en las lagunas facultativas y aerobias, tomando en cuenta que la calidad del agua debe ser la adecuada para que los peces puedan desarrollarse de una manera segura. Usualmente pueden emplearse como en este caso, luego de un tratamiento secundario, donde la calidad del agua mejora considerablemente.
4. Es posible que la eficiencia del tratamiento mejore en unidades de evaluación de mayor dimensión, ya que las utilizadas para esta investigación se realizaron a una escala mínima debido a lo descrito en las limitaciones al inicio del documento.

BIBLIOGRAFÍA

1. CAMACHO; B. E, LUNA; R.C., MORENO; R. M, *Guía para el cultivo de peces*. México: SE-MARNAP, 2000. 136 p.
2. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente y la Organización Panamericana de la Salud. *Aspectos técnicos de la acuicultura con aguas residuales*. Colombia: Cepis/OPS, 1992. 190 p.
3. ----- . *Requerimientos de calidad del agua residual tratada para el cultivo de tilapia*. CEPIS/OPS. 1992. 58 p.
4. ----- . *Reúso en acuicultura de las aguas residuales tratadas en las lagunas de estabilización de san juan, lima, Perú*, CEPIS/OPS. 1991. 120 p.
5. Dirección de Acuicultura. *Cultivo de carpa común en estanques con agua residual*. México. 2007. 200 p.
6. KIELY, Gerard; *Ingeniería ambiental, fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión*. Madrid: McGraw-Hill; 1999. 280 p.
7. International Center for Aquaculture And Aquatic Environments Auburn University. *Introducción al cultivo de peces en estanques*. Arizona: 1998. 10 p.

8. ITURRIAGA; J.N, *El agua y sus senderos, comisión nacional del agua*. México. 1994. 142 p.
9. Guatemala. *Reglamento de las descargas y reúsos de las aguas residuales y la disposición de lodos*. Acuerdo Gubernativo 236–2006. Guatemala. 2006. 36 p.