



UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS
NATURALES

EL USO DE HUMEDALES COMO UNA MANERA EFECTIVA DE DISMINUIR LOS
EFECTOS AMBIENTALES POR LOS RESIDUOS DE UNA UNIDAD DE
PRODUCCIÓN TRUTÍCOLA CON SISTEMA DE RECIRCULACIÓN: EI ZARCO,
ESTADO DE MÉXICO.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES

PRESENTA:

ARTURO ISMAEL GONZÁLEZ RODRÍGUEZ

El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México Septiembre 2013



UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS
NATURALES

EL USO DE HUMEDALES COMO UNA MANERA EFECTIVA DE DISMINUIR LOS
EFECTOS AMBIENTALES POR LOS RESIDUOS DE UNA UNIDAD DE
PRODUCCIÓN TRUTÍCOLA CON SISTEMA DE RECIRCULACIÓN: EL ZARCO,
ESTADO DE MÉXICO.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES

PRESENTA:

ARTURO ISMAEL GONZÁLEZ RODRÍGUEZ

COMITÉ DE TUTORES:

Dr. Iván Gallego Alarcón. Tutor Académico
Dr. Daury García Pulido. Tutor Adjunto
Dra. Cristina Burrola Aguilar. Tutor Adjunto

El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México Septiembre 2013

DEDICATORIA

A mi familia

Por ayudarme a forjarme como persona, por sus consejos de vida, por su gran apoyo, por enseñarme el mundo de la ciencia.

A mi madre Margarita

Por ser mi amiga y compañera, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor.

A mis abuelos

Por estar siempre en los momentos importantes de mi vida, por ser el ejemplo para salir adelante y por los consejos que han sido de gran ayuda en mi desarrollo científico. Esta tesis es el resultado de lo que me han enseñado en la vida. Es por ello que hoy se las dedico.

A mis hermanos

Por haberme apoyado en los momentos más álgidos de este trabajo, por las risas y buenos momentos que viví con ustedes durante esta etapa de mi vida.

A ti Brenda

Porque este trabajo fue más fácil con tu ayuda, por tus consejos en química, por estar siempre cuando necesite un impulso o simplemente cuando necesite hablar con alguien pero más que nada por tu gran amistad y amor.

A mis tutores y maestros

Por darme la oportunidad de trabajar con ustedes, por apoyarme en la realización de este trabajo, por sus consejos profesionales que me han permitido completar esta muy importante etapa en mi vida.

RESUMEN

El uso de humedales en el tratamiento de aguas residuales acuícolas han sido una solución efectiva y de alta rentabilidad durante los últimos años alrededor del mundo.

En el presente estudio se analizaron dos factores principales sobre humedales, el tiempo de maduración y la capacidad de tratamiento de estos sistemas. Por último se realizó una matriz de Leopold para evaluar los efectos ambientales del Sistema de Recirculación Acuícola en donde los humedales operaron.

Para determinar la maduración de los humedales se aplicaron dos técnicas el muestreo puntual y el balance de masas. Este último resultó ser una herramienta efectiva para determinar cuándo un humedal se encuentra maduro para comenzar a operar como un sistema de tratamiento de aguas residuales. Por el otro lado el muestreo puntual resultó un método menos confiable atrasando la operación de los humedales por la ambigüedad de los datos obtenidos por este método.

La capacidad de tratamiento de los cuatro humedales artificiales con cuatro diferentes combinaciones de vegetación que fueron construidos para el tratamiento de aguas residuales provenientes de un cultivo de 3000 juveniles de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) que fueron monitoreados durante 6 meses para evaluar su capacidad para remover diferentes contaminantes acuícolas bajo condiciones climáticas frías. El más alto desempeño en la remoción de especies nitrogenadas (Nitrógeno Amoniacal Total 30%, NO₂-N: 22% and NO₃-N: 56%) fue llevado a cabo por un humedal con combinación de dos especies de plantas (*Echinochloa crus-galli* y *Hydrocotyle ranunculoides*). La misma situación sucedió en la remoción de Fosfatos Totales (23%), Solidos Suspendidos Totales (60%) y Demanda Química de Oxígeno (20%). Sin embargo cuando estas dos plantas operaron individualmente en diferentes humedales su desempeño varió ampliamente pero fue consistentemente menor comparado con el humedal que presentaba combinación de vegetación. En contraste los desempeños más bajos

de entre los cuatro humedales fueron llevados a cabo por el humedal con cero vegetación donde en varios casos las concentraciones de contaminantes en el agua se incrementaron a la salida del humedal.

La aplicación de una matriz de Leopold al Sistema de Recirculación arrojó como resultados que dicho sistema genera impactos moderados sin embargo estos son locales y temporales, además al contar el Sistema de Recirculación Acuícola con un método para tratar las aguas generadas por este los efectos disminuyen de manera considerable, además que socioeconómicamente el sistema genera efectos positivos.

Palabras clave: Sistema de Recirculación, humedales, efectos ambientales, Trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*).

ABSTRACT

The use of constructed wetlands for the treatment of aquacultural wastewater has been a high profitability and effective solution throughout the world.

In the present research two key constructed wetlands factors were analysed: stand by determination time of the constructed wetlands and Loading Removal Efficiency of these systems. Finally a Leopold matrix was developed in order to evaluate the environmental effects of a Recirculation Aquaculture System.

For the Stand by determination time of the constructed wetlands: two methodologies were applied in order to determinate when the wetlands had reached the stand by moment (punctual analysis and mass balance). The mass balance resulted to be an effective tool for determine the stand by moment of a constructed wetland. On the other hand the punctual analysis was a less trustable method as it could delay the operation of the constructed wetlands because the data ambiguity obtained by this method.

The treatment capacity of the four constructed wetlands with four plant combinations were built for the treatment of aquacultural wastewater from 3000 juvenile trout culture were monitored in a six month operating season during winter to evaluate the removal capacity of different pollutants under cold conditions. The highest nitrogen species removal performance (Total Ammonium Nitrogen: 30%, NO₂-N: 22% and NO₃-N: 56%) was carried out by the wetland with a combination of two plant species: *Echinochloa crus-galli* and *Hydrocotyle ranunculoides*. The same situation was for the Total Phosphate removal which averaged 23%, Total Solid Suspended 60% and Chemical Oxygen Demand (20%). However, when these two plants operated independently their performance varied widely but was consistently lower compared with the plant-combined wetland. In contrast the lowest performance from the four wetlands was showed by a wetland with no

vegetation increasing in several cases the concentrations of pollutants at the wetland's outlet.

The application of the Leopold matrix into the Recirculation Aquaculture System showed that this system generated moderate environmental impacts; however, these environmental effects are temporal and local. Moreover, the Recirculation System had a method for the treatment of the aquacultural wastewater; therefore, the environmental negative effects showed a sharply decreased. Finally the Recirculation system generates positive effects in the local society and economy.

Key words: Recirculation Aquaculture System, Constructed wetlands, Environmental effects, Rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)

AGRADECIMIENTOS

Universidad Autónoma del Estado de México, por ser mi “hogar” durante mi formación de maestría.

Centro de Investigación en Recursos Bióticos, por el apoyo para el uso de sus instalaciones.

Centro de producción acuícola “El Zarco”, por permitirme el uso de sus instalaciones y por el apoyo brindado para la realización de esta tesis.

Dr. Iván Gallego Alarcón, amigo, gracias por haber aceptado dirigir esta aventura, porque trabajar contigo me volvió independiente y me enseñaste que los tutores son una “guía” en esta aventura llamada “ciencia”.

Dra. Cristina Burrola Aguilar, gracias por todos los consejos académicos otorgados durante aquellos exámenes tutorales es ahora cuando más los agradezco.

Dr. Daury García Pulido, gracias por transmitirme sus conocimientos y por los consejos sobre humedales que me permitieron completar este trabajo de tesis.

Así también agradezco la beca otorgada por el **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** para realizar los estudios de maestría en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales.

Este trabajo es parte del proyecto de investigación “***Diseño, fabricación y evaluación de un medio filtrante plástico de tipo fractal para biofiltros utilizados en el cultivo de trucha arcoíris***” con clave 3073/2011 de la Universidad Autónoma del Estado de México, bajo la responsabilidad del Dr. Iván Gallego Alarcón.

Índice de contenido

Índice de contenido	9
Índice de Figuras.....	12
1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	14
2. ANTECEDENTES.....	19
2.1. Acuicultura	19
2.1.1. El desarrollo de la acuicultura actual	19
2.2. Sistema de Recirculación Acuícola (SRA)	19
2.2.1. Ventajas de los Sistemas de Recirculación Acuícola	20
2.2.2. Manejo de residuos.....	21
2.2.2. Componentes del sistema de recirculación acuícola “El Zarco”.....	21
2.3. Calidad de agua	23
2.3.1. Composición del agua	23
2.3.2. Principales factores físico - químicos del agua en la acuicultura.....	25
2.4. Contaminación del agua.....	26
2.4.1. Excretas animales	26
2.4.2. Aguas residuales acuícolas.	27
2.5. Normatividad en el tratamiento y disposición del agua	28
2.6. Tratamiento de agua	28
2.7. Fitorremediación	29
2.7.1. Estrategias de Fitorremediación	29
2.7.2. Fitorremediación acuática.....	30
2.7.3. Sistemas de fitorremediación acuática	31
2.8. Humedales.....	31
2.8.1. Tipos de humedales artificiales.....	31
2.8.2. Ciclos naturales que suceden en los humedales.....	32
2.8.6. Desarrollo de los humedales como medio para tratar aguas residuales	35
2.8.7. Maduración de humedales.....	37
2.9. Efectos ambientales y la acuicultura.....	38
2.9.1. Evaluación de Impacto Ambiental (EIA)	40

3. JUSTIFICACIÓN.....	43
4. HIPÓTESIS.....	44
5. OBJETIVO GENERAL Y PARTICULARES	45
5.1. Objetivo General	45
5.2. Objetivos específicos	45
6. METODOLOGÍA.....	47
6.1. Diagrama de flujo metodológico “Maduración”	47
6.1.1. Metodología 1. Maduración de Humedales	48
Vegetación.....	50
6.2. Diagrama de flujo metodológico para determinar la capacidad de tratamiento de los humedales	54
6.2.1. Metodología 2. Capacidad de tratamiento de los humedales	55
6.3. Diagrama de flujo metodológico 3. Determinación de efectos ambientales SRA. 60	
4.1. Efectos ambientales.....	61
5. RESULTADOS	63
5.1. Resultados de Maduración de los humedales.....	63
5.1.1. Nitrógeno Amoniacal Total (NAT)	63
5.1.2. Nitritos (N-NO ₂).....	64
5.1.3. Nitratos (N-NO ₃)	65
5.2. Resultados de capacidad de tratamiento humedales.....	67
5.3. Resultados efectos ambientales de actividades de construcción y operación del SRA “El Zarco”	95
5.3.1. Preparación del sitio de construcción	95
5.3.2. Suministro de materiales	98
5.3.3. Suministro de agua etapa construcción.....	99
5.3.4. Campamento de trabajadores	100
5.3.5. Construcción del estanque y filtro.....	101
5.3.6. Acabados y pintura de estanque y filtro.....	102
5.3.7. Construcción de Humedales.....	103
5.3.8. Operación de humedales.....	104
5.3.9. Suministro de agua operación de SRA.....	106

5.3.10.	Uso tecnología de alimentación (alimentador automático)	106
5.3.11.	Aguas residuales operación SRA.....	107
5.3.12.	Comercialización de trucha	108
6.	DISCUSIÓN GENERAL.....	110
7.	CONCLUSION GENERAL.....	114
8.	REFERENCIAS	116
	GLOSARIO.....	137

Índice de Figuras

Figura 1. Componentes S.R.A. “El Zarco”	22
Figura 2. Tiempo de maduración típica de biofiltros en base a las concentraciones de N-NO ₃ (Sonnenholzner, 2004)	37
Figura 3. Centro acuícola el Zarco (a) y Sistema de Recirculación Acuícola (b)...	48
Figura 4. Diseño de los humedales a evaluarse.....	49
Figura 5. Distribución de los humedales de acuerdo al flujo del agua.....	50
Figura 6. Distribución de unidades experimentales y formula de flujo másico	52
Figura 7. Ejemplo de hoja de cálculo	53
Figura 8. Alimentador automático.....	56
Figura 9. Distribución de los humedales de acuerdo al flujo del agua.....	56
Figura 10. Comparación del tiempo de maduración entre (a) flujo másico y (b) muestreo puntual para NAT.	63
Figura 11. Comparación del tiempo de maduración entre (a) flujo másico y (b) muestreo puntual para N-NO ₂	64
Figura 12. Comparación del tiempo de maduración entre (a) flujo másico y (b) muestreo puntual para N-NO ₃	66

Índice de Tablas

Tabla 1. Características de la producción de los residuos. (Chen <i>et al.</i> , 1993).....	27
Tabla 2. Límites máximos permisibles de aguas procedentes de actividades de producción acuícola	28
Tabla 3. Principales efectos ambientales de la acuicultura (Rabassó, 2006)	38
Tabla 4. Distribución de la vegetación en las unidades experimentales	51
Tabla 5. Distribución de la vegetación en los 4 humedales.....	57
Tabla 6. Distribución de muestreos de los parámetros físico-químicos.....	58
Tabla 7. Rangos de valor de la magnitud de impactos generados.....	61
Tabla 8. Rangos de valor de importancia de los impactos generados	61
Tabla 9. Balance de masas y muestreo puntual de NAT	63
Tabla 10. Balance de masas y muestreo puntual N-NO ₂	64
Tabla 11. Balance de masas y muestreo puntual N-NO ₃	65
Tabla 13. Matriz del Leopold de interacciones de actividades antropogenicas con los componentes ambientales del SRA “El Zarco”	97
Tabla 12. Datos originales de muestreo.....	122

El uso de humedales como una manera efectiva de disminuir los efectos ambientales por los residuos de una unidad de producción trutícola con sistema de recirculación: El Zarco, Estado de México.

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

Hoy en día la acuicultura es un sector productivo de alimentos ricos en proteínas creciente, vigoroso e importante, siendo la contribución de ésta a la producción total de pesca mundial del 41.22 % en el 2011 (FAO, 2012). En México la política sobre la actividad trutícola está dirigida a su incremento mediante la aplicación de modelos sustentables de producción y de la promoción de buenas prácticas de manejo de dichos cultivos. En el 2011 la producción de trucha alcanzo un valor de producción de 218 millones de pesos y la generación de 4916 ton en las siguientes entidades Estado de México, Puebla, Oaxaca, Michoacán, Hidalgo, Chihuahua y Veracruz en donde se asientan 984 granjas acuícolas de la especie para comercio y 170 para consumo (CONAPESCA, 2011). Siendo el Estado de México el principal productor de esta especie a nivel nacional con una producción en el 2011 de 3105 ton de trucha (SAGARPA, 2011).

La producción exitosa del cultivo de trucha requiere altos niveles de calidad del agua que es tomada de manantiales o afluentes naturales. Los requerimientos para la calidad del agua limita las posibles locaciones de las granjas trutícolas y la capacidad de producción de cada sitio (Sindilariu *et al.*, 2008). En consecuencia sólo se puede mejorar la producción intensificándola en los sitios ya existentes. El volumen de agua requerido para la producción de una tonelada de trucha en un ciclo disminuyo de 86,000 m³ a 26,000 m³ con el uso de alimentos con altos niveles de energía además del uso de sistemas de oxigenación y aeración (Sindilariu *et al.*, 2008).

Aun cuando se han implementado ciertas estrategias para minimizar los residuos procedentes de las descargas de sistemas de cultivo acuícola aún se siguen acumulando residuos de alimento así como excretas de los organismos en los estanques, que comúnmente causa degeneración en la calidad de agua de los estanques que resultan en efectos tóxicos para los peces (Lin *et al.*, 2002).

Las descargas de las granjas acuícolas contienen considerables cargas de residuos sólidos suspendidos, materia orgánica, nitrógeno y fósforo que pueden en algún punto afectar las aguas de manantiales u otras fuentes de este recurso (Lin *et al.*, 2002), todos estos compuestos y residuos tienen el potencial de aumentar la demanda de oxígeno ya sea como Demanda Biológica de Oxígeno o como Demanda Química de Oxígeno (DBO y DQO respectivamente) (Michael, 2003), ahora bien tanto el nitrógeno como el fosforo son considerados como nutrientes limitantes en muchos sistemas acuáticos, por lo que la adición de estos puede representar el crecimiento de plantas o en algunos casos severos cuadros de eutrofización, por lo que la remoción de estos compuestos de las aguas residuales reducen el impacto antropogénico de los cultivos acuícolas en el ambiente cercano (Sibatani, 1996) además el cultivo de organismos acuáticos trata de evitar la degradación de los recursos hídricos maximizándolos (Lymbery *et al.*, 2006).

En este contexto el uso de humedales ha tenido un gran desarrollo y se han investigado ampliamente, e incluso se ha desarrollado el uso de humedales con un segundo propósito como es el valor estético a los procesos de purificación de agua que suelen ser desagradable a los sentidos así como la producción de plantas de ornato a partir del tratamiento de agua (Zurita *et al.*, 2009). Así mismo el uso de humedales en el tratamiento de residuos procedentes de diversas fuentes: aguas municipales, aguas industriales como la industria de la alimentación, la industria vinícola, aguas agropecuarias y aguas de la industria de la producción acuícola (Vymazal, 2009); por lo que el uso de humedales para tratamiento de aguas residuales ha tenido gran éxito debido a la capacidad de

adaptación que presentan estos sistemas además de que su construcción y operación es económica.

En otro término se sabe que la acuicultura está enfrentando retos debidos al crecimiento de la población que resulta en una mayor competencia por el agua, tierra y otros recursos naturales. En algunos casos estos retos están siendo atacados intensificando las operaciones acuícolas. La tendencia a intensificar la acuicultura así como para otras industrias agrícolas tiende a obtener mayores recursos económicos a partir de un recurso ambiental crítico (Piedrahita, 2003).

Además la minimización y el esfuerzo por la reducción de las cargas de residuos procedentes de instalaciones de producción animal se está incrementando por varios segmentos de las comunidades encargadas de regular dicha industria (MacMillan *et al.*, 2003), consecuentemente el desarrollo de la acuicultura requiere el uso mayor de recursos naturales y genera un mayor impacto ambiental (Lin *et al.*, 2003) lo cual conlleva a consecuencias negativas tanto para el manejo de la granja así como para el ambiente. Por lo tanto es necesario clarificar los criterios y umbrales de los factores ambientales de una unidad de producción acuícola que permitan generar una acuicultura sustentable (Yokoyama, 2003).

En este contexto resulta importante determinar cuáles son los efectos ambientales de las descargas de aguas procedentes de granjas acuícolas sobre el ambiente (zona de influencia) ya que en general la acuicultura envuelve diversas actividades que a su vez generan distintos residuos como: compuestos prescritos, (pesticidas y drogas), antifloculantes, anestésicos y desinfectantes, mismos que pueden descargarse por medio de las aguas antes mencionadas que implica un efecto significativo en especial si las granjas tienen una infraestructura o manejo pobre (Burridge *et al.*, 2010).

El impacto de la acuicultura sobre el ambiente depende ampliamente del sistema de cultivo y del tipo de organismo que se encuentre en producción, así como a la intensidad y el tipo de alimento usado (Mazón *et al.*, 2007). Así mismo el desarrollo de la acuicultura requiere más recursos naturales y una mayor área

para llevar a cabo esta actividad y en consecuencia un mayor impacto ambiental (Lin *et al.*, 2003).

La meta del presente estudio es evaluar la viabilidad del uso de humedales artificiales como una herramienta para tratar las descargas de aguas residuales acuícolas de una Unidad de Producción Trutícola (UTP) con sistema de recirculación acuícola y comparar el desempeño de diferentes tipos de plantas en la remoción de los residuos y nutrientes del sistema.

CAPITULO II

ANTECEDENTES

2. ANTECEDENTES

2.1. Acuicultura

2.1.1. El desarrollo de la acuicultura actual

La acuicultura tiene una larga historia sus orígenes datan al menos del 450 a.C. en China. El cultivo de trucha comenzó en Alemania en 1741, pero fue hasta 1880 que el cultivo de trucha llegó a América (FAO, 1988).

La industria de la trucha creció lentamente hasta avanzados los años 40's en los años 50's comenzó a expandirse más rápidamente (Timmons *et al.*, 2010).

Actualmente la acuicultura ha sido el segmento de mayor crecimiento en la agricultura de varios países por más de 15 años y se proyectado que permanezca así en el futuro. Se predice que el cultivo de organismos acuáticos será una de las tres mayores oportunidades económicas en este siglo (Timmons *et al.*, 2010).

Para cubrir la cada vez más elevada demanda de productos de origen acuático se han creado nuevas tecnologías de producción acuícola como son los sistemas de recirculación que comparado con los métodos tradicionales de cultivo consume menos agua (aproximadamente 250 a 1000L por producción de 1 kg de pez) y por lo tanto es operado con menos descargas al ambiente (Shnel, *et al.*, 2002).

2.2. Sistema de Recirculación Acuícola (SRA)

Los métodos convencionales de acuicultura tales como: estanques externos, cultivo en jaulas (net-pen) y estanques de corriente rápida (raceway) a largo plazo no son adecuados debido a temas ambientales significantes además de su ineficiencia de garantizar la calidad de los productos al consumidor.

Contrariamente la producción de peces utilizando Sistema de Recirculación Acuícola es una manera sustentable, expandible y ambientalmente compatible además tiene la habilidad de garantizar tanto el bienestar del producto así como la calidad de los peces producidos a través del año (Timmons *et al.*, 2010).

2.2.1. Ventajas de los Sistemas de Recirculación Acuícola

Los Sistemas de Recirculación Acuícola (SRA) tienen la ventaja de mantener a los organismos en un ambiente controlado lo cual permite controlar la tasa de crecimiento del producto y generar agendas predecibles de cultivo. Por otro lado los SRA conservan la calidad del agua a través de reuso de la misma después de que esta es reacondicionada por el uso de trenes de tratamiento.

Por otro lado los SRA maximizan la producción por unidad de área así como por trabajador de cualquier sistema acuícola. Los SRA son ambientalmente sostenibles ya que utilizan de un 90 hasta un 99 % menos agua que los sistemas convencionales así como menos del 1% de la tierra disponible comparado con los sistemas tradicionales.

En los SRA el agua circula a través del sistema y sólo un pequeño porcentaje del agua es descargada diariamente (10%). La temperatura, salinidad, pH, alcalinidad, composición química y oxígeno, todos son monitoreados y continuamente controlados. Los desechos sólidos son filtrados, el oxígeno es adicionado para mantener los niveles óptimos, el agua a la salida del sistema es pasada a través de un biofiltro para la conversión biológica de amonio a nitrato.

El diseño y operación de un SRA requiere un sólido entendimiento de muchas unidades-proceso que se muestran a continuación, sin embargo esta investigación sólo se concentrará en el manejo de los residuos

- Balance de masas
- Unidades de cultivo
- Captura de sólidos
- Nitrificación
- Transferencia de gases
- Mecánica de fluidos
- **Manejo de residuos**
- Alimentación y nutrición

- Bioseguridad
- Sistemas de Monitoreo

(Timmons *et al.*, 2010).

2.2.2. Manejo de residuos

Timmons *et al.* (2010) mencionan que debido al contenido y características de los residuos procedentes de la acuicultura el manejo de estos genera problemas únicos de almacenaje y disposición final. Son dos los principales residuos: sólidos suspendidos y el fosforo descargado en el efluente.

Existen diversos métodos para tratar dichos residuos: filtros mecánicos, micropantallas y filtros de arena, mismos que producen una separación de residuos sólidos lo cual conlleva a reducir la cantidad de los mismos y mejorar la calidad en la descarga (Timmons *et al.*, 2010).

2.2.2. Componentes del sistema de recirculación acuícola “El Zarco”

El sistema de recirculación acuícola “El Zarco” presenta algunos componentes que lo hacen único en su clase el primero es el sedimentador de alta tasa que permite disminuir la velocidad del agua que entra al tubo de nivel del estanque para aumentar tasa de precipitación de sólidos suspendidos totales de la columna de agua para que sean removidos a través de la purga del sistema.

La purga presenta un sistema de 4 humedales independientes que tienen la capacidad de remover sólidos suspendidos del agua así como de llevar a cabo reacciones químicas para convertir ciertas especies nitrogenadas en compuestos menos reactivos para con el ambiente.

Componentes:

❖ Estanque:

- 1) Sedimentador del alta tasa

2) Jets

❖ **Tubería:**

- 1) Tubería de salida
- 2) Humedales
- 3) Tubería de recirculación
- 4) Tubería de retrolavado

❖ **Filtro:**

- 1) Percolador
- 2) Filtro de arena
- 3) Bombas



Figura 1. Componentes S.R.A. "El Zarco"

Descripción: 1.Estanque 2.Jets 3.Sedimentador de alta tasa 4.Humedales 5.Estructura de filtración 6.Poliducto (empaques) 7.Filtro de arena 8. Bombas.

2.3. Calidad de agua

En la acuicultura el manejo y calidad del agua juega un rol muy importante debido a que los acuicultores deben mantener las condiciones ambientales del estanque de peces de manera adecuada para el crecimiento de estos. Además el agua contaminada de los estanques es intercambiada frecuentemente con agua proveniente de ríos que se cambia diariamente o al menos una vez a la semana. Las descargas de agua contaminada procedentes de la acuicultura causan eutroficación y otros efectos nocivos en el agua que reciben los tributarios naturales.

2.3.1. Composición del agua

2.3.1.1. Aguas Superficiales

Las aguas superficiales son extremadamente variadas en su composición química, las grandes diferencias en la composición del agua serán obvias entre regiones con diferente geología y clima.

Principales Iones en el agua

Los principales iones en el agua son *bicarbonato*, *cloratos*, *sulfatos*, *calcio*, *magnesio*, *sodio*, *potasio*, *nitratos* (Boyd, 1990).

Gases Disueltos

En general todos los gases presentes en la atmosfera se disuelven en las aguas superficiales. En condiciones estándar las concentraciones de gases comunes son: Oxígeno 9.07 mg/L, Nitrógeno 14.88 mg/L, Argón 0.56 mg/L y dióxido de carbono 0.54 mg/L (Boyd, 1990).

Sustancias orgánicas

Las aguas naturales contienen una gran variedad de compuestos orgánicos solubles, como azúcares, ácidos grasos, taninos, vitaminas, aminoácidos, proteínas y urea (Boyd, 1990).

Material suspendido

La materia suspendida en el agua tiene diversos orígenes, el primera fuente es el material particulado suspendido proveniente de la acción de la erosión sobre los suelos, material particulado vegetal que tiene su origen en la hierba que crecen en las laderas de los cuerpos de agua, cuando este material se descompone puede generar grandes cantidades de materia suspendida. El plancton también es considerado como material suspendido, las partículas suspendidas producen turbiedad del agua (Boyd, 1990).

2.3.1.2. Aguas Subterráneas

Muchos de los constituyentes de las aguas superficiales son encontrados en las aguas subterráneas, sin embargo algunas veces las aguas subterráneas difieren considerablemente en su calidad respecto a las aguas superficiales aún en la misma región debido a que el agua se infiltra a través de los suelos y rocas, por lo que acumula dióxido de carbono y pierde oxígeno disuelto. Esto resulta debido a la actividad biológica en las capas superiores del suelo. Además una vez que el agua se infiltra a las profundidades esta permanece por un largo periodo de tiempo en contacto con minerales y cambia su composición como resultado de reacciones químicas.

Por lo tanto la composición de las aguas subterráneas es aún más variable que la composición de las aguas superficiales y dependerá de la región, tipo de suelo y tiempo de retención del agua (Boyd, 1990).

En el centro de producción acuícola el Zarco gran parte del agua utilizada en la producción de trucha proviene de manantiales por lo tanto existe una relación directa con las aguas subterráneas y las propiedades físico-químicas de estas con la producción acuícola y su subsecuente tratamiento para que recuperen calidad después de su uso.

2.3.2. Principales factores físico - químicos del agua en la acuicultura

2.3.2.1. Nitrógeno

El nitrógeno es requerido por todos los organismos vivos debido a que es un importante componente de las proteínas y otras sustancias bioquímicas. El nitrógeno es tomado por las plantas primariamente en forma de nitrato ($N-NO_3$). Los animales satisfacen sus necesidades de nitrógeno a través de la ingesta de la vegetación. Los residuos de nitrógeno son excretados por los animales en diversas formas: amonio, creatinina, creatina, urea y ácido úrico (Stickney, 2000). En los estanques acuícolas el ciclo del nitrógeno es regulado primariamente por la actividad biológica local (Boyd, 1990).

2.3.2.2. Fósforo

El fósforo es un nutriente metabólico clave y el suministro de este elemento suele regular la productividad de las aguas naturales, de hecho la mayoría de las aguas naturales responden a la adicción de fósforo con una mayor producción de plantas. La experiencia muestra que la adicción de fertilizantes fosfatados incrementa la producción primaria en estanques acuícolas (Boyd, 1990).

2.3.2.3. Oxígeno Disuelto

El nivel de oxígeno disuelto (OD) disponible para los animales en los sistemas acuícolas es tal vez el más crítico entre las variables de la calidad del agua y es rutinariamente controlado. Si no se mantiene un nivel suficiente de oxígeno disuelto, los animales se estresan y tal vez no coman bien, además la susceptibilidad de enfermedades se incrementa dramáticamente y en el peor de los casos el organismo puede morir. Sólo unos pocos organismos en acuicultura pueden tolerar bajos niveles de oxígeno por ejemplo tilapia (*Oreochromis* sp.) (Stickney, 2000).

2.3.2.4. pH

El pH de ambientes acuáticos indica el grado de acidez o alcalinidad del agua. Esta información es importante en acuicultura porque el plancton, peces y otra vida acuática pueden sobrevivir o crecer sólo en un rango pequeño de acidez o alcalinidad. El pH es importante en las mediciones de alcalinidad y dióxido de carbono y afecta diversos factores como la toxicidad amoniacal así como la relación de carbonatos y dióxido de carbono (Stickney, 2000).

2.3.2.5. Temperatura

La temperatura es uno de los factores de calidad del agua más críticos en acuicultura. Los animales bajo condiciones de producción son poiquilotermos normalmente así que su metabolismo está muy ligado a la temperatura del agua. Cada especie tiene su temperatura óptima (intervalo de temperatura) a la cual su crecimiento es máximo y la especie sobrevivirá. Los organismos acuáticos tienden a caer dentro de tres categorías: organismos de aguas cálidas, organismos de aguas frescas y organismos de aguas frías (Stickney, 2000).

2.4. Contaminación del agua

2.4.1. Excretas animales

Una fuente importante de contaminación del agua son las excretas animales, que contienen grandes cantidades de sustancias nitrogenadas susceptibles de convertirse en nitratos. El problema se agudiza cuando la explotación es intensiva, como ocurre en los grandes cebaderos ganaderos o avícolas.

La producción acuícola al igual que la pecuaria tiene la capacidad de producir excesos de especies nitrogenadas (50% - 95%), fosfatos (85%), materia orgánica y sólidos suspendidos (80%-88%). Las concentraciones liberadas al medio dependerán de la tecnificación del sistema, siendo los sistemas abiertos los que liberan mayores concentraciones al medio (Rabassó-Krohnert, 2004).

2.4.2. Aguas residuales acuícolas.

Aguas provenientes de actividades de acuícolas

Son aquellas que provienen de áreas destinadas a la producción, reproducción y desarrollo de cualquier especie de flora y fauna acuática (NOM-089-ECOL-1994).

En general se considera que el agua descargada procedente tanto de los sistemas productores acuícolas con tecnología de recirculación como de los sistemas tradicionales abiertos contiene dos tipos de residuos: los particulados y la fracción soluble (Tabla1) (Sindilaru *et al.*, 2007; Schulz *et al.*, 2003). La parte particulada en general es aportada por excrementos y alimento no consumido que representa del 7 al 32% del total de nitrógeno, del 30 al 84% del fósforo total y el 27% del carbono total contenido en el agua residuo de la unidad de producción el resto de los residuos se encuentra en la parte disuelta de los residuos (Schulz *et al.*, 2003).

Se considera que en ciertos cultivos del 75 % del nitrógeno, fósforo y carbono ingresado al sistema por medio del alimento se pierde como alimento no capturado y otros productos de excreción y sólo un 25% de estos nutrientes se recuperará al cosechar los peces, tanto el nitrógeno como el fósforo son los principales nutrientes que contaminan el agua. Se ha considerado que si se aumenta la concentración del nitrógeno existe un crecimiento de microalgas, mientras que el fósforo tiene efectos adversos en la biodiversidad de la región donde es vertido. (Buschmann & Fortt, 2005).

Tabla 1. Características de la producción de los residuos. (Chen *et al.*, 1993).

Residuos de acuicultura					
Parámetros	Rango	Media	Desvest	Rango	Típico
ST (%)	1.4-2.6	1.8	0.35	2.0-8.0	5.0
DQO(mgL ⁻¹)	1590-3870	2760	210	2000-30x10 ³	6000
TAN(mgL ⁻¹)	6.8-25.6	18.3	6.1	100-800	400
pH	6-7.2	6.7	0.4	5.0-8.0	6.0
Alcalinidad	284-415	334	71	500-1500	600
DBO(mgL ⁻¹)	3250-7670	5510	1210	-----	-----
ST (%)	0.6-2.6	1.3	0.7	0.4-1.2	0.7

2.5. Normatividad en el tratamiento y disposición del agua

El proyecto de Norma Oficial Mexicana NOM-089-ECOL-1994 establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de las actividades de producción acuícola de agua dulce de la siguiente manera:

Tabla 2. Límites máximos permisibles de aguas procedentes de actividades de producción acuícola

Límites máximos permisibles (Aguas dulces)		
Parámetros	Promedio diario	Instantáneo
pH (unidades de pH)	6-9	6-9
DQO(mgL ⁻¹)	30	50
SST(mgL ⁻¹)	35	60
Fósforo total (mgL ⁻¹)	0.2	0.5
Nitrógeno total (mgL ⁻¹)	2.0	4.0

Según la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 que define “Salud Ambiental, Agua para uso y Consumo Humano-Límites Permisibles de Calidad y Tratamientos a que se debe someter el agua para su potabilización”.

Específica que para el tratamiento de agua para que esta recupere sus características físicas y organolépticas (color, olor, sabor y turbiedad) se debe someter a alguno de estos métodos: Coagulación, Floculación, precipitación, filtración. Por lo tanto el uso de métodos naturales para recuperar las propiedades organolépticas del agua es un método viable para el tratamiento de esta.

2.6. Tratamiento de agua

Existen diversas opciones para remoción de los nitratos y otros compuestos contaminantes del agua, mediante el tratamiento de esta, las cuales incluyen: nitrificación – desnitrificación biológica, empleo de estanques con algas,

intercambio iónico, osmosis inversa, electrodiálisis, destilación y reducción química (Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud, 1994).

El sistema de tratamiento de aguas residuales dependerá de las necesidades del tratamiento de estas así como el costo-beneficio que el sistema de tratamiento pueda generar para una actividad dada.

2.7. Fitorremediación

2.7.1. Estrategias de Fitorremediación

Dependiendo del papel que tiene la planta durante la remediación será la estrategia que esta siga para el tratamiento de los residuos siendo los siguientes procesos los más comunes:

- *Fitodegradación o fitotransformación:* Se basa en el uso de plantas para degradar o transformar en sustancias menos tóxicas diversos tipos de contaminantes orgánicos: hidrocarburos aromáticos polinucleares, hidrocarburos totales de petróleo, plaguicidas, compuestos clorados y surfactantes (detergentes). A través de reacciones enzimáticas que llevan a cabo plantas y organismos en la rizósfera
- *Fitoestimulación:* En este caso los exudados de las raíces de las plantas estimulan el crecimiento de microorganismos capaces de degradar contaminantes orgánicos.
- *Fitovolatilización.* En este caso los contaminantes son absorbidos, metabolizados transportados desde la raíz de la planta a sus partes superiores y liberados a la atmósfera en formas volátiles menos tóxicas o relativamente menos peligrosas.

- *Fitoestabilización*. Este tipo de estrategia utiliza plantas que desarrollan un denso sistema de raíz, para reducir la biodisponibilidad de metales y otros contaminantes en el ambiente por medio de mecanismos de secuestro
- *Fitoextracción o fitoacumulación*. En esta estrategia se explota la capacidad de algunas plantas para acumular contaminantes en sus raíces, tallos o follaje las cuales pueden ser fácilmente acumulables.
- *Rizofiltración*. Se basa exclusivamente en hacer crecer, en cultivos hidropónicos, raíces de plantas terrestres con alta tasa de crecimiento y área superficial para absorber, concentrar y precipitar metales pesados de aguas residuales contaminadas.

Como puede apreciarse las estrategias de Fitorremediación hacen referencia a los mecanismos predominantes realizados por las plantas, pero también, en otros casos indican el papel que tienen las comunidades microbianas durante el proceso de remediación (Núñez *et al.*, 2004).

2.7.2. Fitorremediación acuática

Tradicionalmente las plantas vasculares acuáticas han sido consideradas como una plaga en sistemas enriquecidos con nutrientes. Su rápida proliferación puede dificultar la navegación y amenazar el balance de la biota en los ecosistemas acuáticos. Sin embargo en la actualidad se considera que estas plantas pueden ser manejadas adecuadamente y volverse útiles, debido a su capacidad para remover y acumular diversos contaminantes. Además su biomasa puede ser aprovechada como fuente de energía, forraje y fibra. La fitorremediación acuática tiene la ventaja de que se pueden remover, *in situ*, diferentes tipos de metales que se hallen con bajas concentraciones en grandes volúmenes de agua (Núñez *et al.*, 2004).

2.7.3. Sistemas de fitorremediación acuática

Humedales artificiales

Es un complejo de sustratos, vegetación emergente, subemergente o libre flotadora que simulan humedales.

Sistema de tratamiento integral

Son los sistemas que utilizan una combinación de vegetación emergente o subemergente con plantas libres flotadoras.

Estos sistemas en conjunto han demostrados ser eficientes en la remoción de fosfatos, nitratos, fenoles, pesticidas, metales pesados, fluoruros, bacterias e incluso virus de aguas residuales municipales, agrícolas e industriales (Núñez *et al.*, 2004).

2.8. Humedales

2.8.1. Tipos de humedales artificiales.

Existen diversos complejos artificiales que son definidos por la Convención de Ramsar como humedales artificiales:

1. Estanques de acuicultura (por ej. estanques de peces y camarónicas)
2. Estanques artificiales; incluye estanques de granjas, estanques pequeños (generalmente de menos de 8ha).
3. Tierras de regadío; incluye canales de regadío y arrozales.
4. Tierras agrícolas inundadas estacionalmente; incluye praderas y pasturas inundadas utilizadas de manera intensiva.
5. Zonas de explotación de sal; salinas artificiales, salineras, etc.
6. Áreas de almacenamiento de agua; reservorios, diques, represas hidroeléctricas, estanques artificiales (generalmente de más de 8 ha).
7. Excavaciones; canteras de arena y grava, piletas de residuos mineros.

8. Áreas de tratamiento de aguas servidas; "sewage farms", piletas de sedimentación, piletas de oxidación.
9. Canales de transportación y de drenaje, zanjas.

(RAMSAR, 1996).

2.8.2. Ciclos naturales que suceden en los humedales

En general son 3 los procesos bioquímicos que ocurren en los humedales de los cuales dependen para su desarrollo por lo tanto se hará una breve mención de estos en su paso por los suelos que es la forma en que los humedales entran en contacto con estos ciclos.

2.8.3. Ciclo del Carbono.

La producción de dióxido de carbono (CO₂) como parte del este ciclo, sucede debido a dos procesos: la ruptura u oxidación de la materia orgánica por medio de los microorganismos en el suelo y la respiración de las células de las raíces de las plantas. La tasa de CO₂ resulta importante ya que indica la tasa de descomposición de la materia orgánica y por lo tanto la cantidad de carbono que pierde el sustrato (Lessard *et al.*, 2008).

El carbono, un elemento esencial para el crecimiento de las plantas, se obtiene de la atmósfera por medio de la fotosíntesis. Sin embargo, cuando las plantas mueren, sus tejidos ricos en carbono vuelven al suelo y son descompuestos por los organismos vivos. La materia orgánica del suelo es por tanto la suma de los residuos orgánicos (animales y plantas) en diferentes grados de descomposición. La materia orgánica mejora la calidad del suelo, ayuda a prevenir la escorrentía, incrementa su humedad y contribuye a moderar las fluctuaciones diarias de temperatura en las capas superiores del suelo (Lessard *et al.*, 2008).

2.8.4. Ciclo del Nitrógeno

El ciclo del nitrógeno al igual que los demás ciclos biogeoquímicos tiene una trayectoria definida pero quizá aún más complicada que los demás dado que tiene que seguir una serie de procesos físicos, químicos y biológicos. El nitrógeno es el elemento más abundante de la atmósfera. Sin embargo dada su estabilidad es muy difícil que reaccione con otros elementos y por lo tanto tiene un bajo aprovechamiento.

El agua tiene dos tributarios de nitrógeno la primera es por parte de la lluvia en donde el aporte es de 5 a 15 Kg/N/ha/año que es un valor pequeño comparado con los aportes que realizan los fertilizantes químicos. El segundo tributario de nitrógeno y es mediante la eliminación de compuestos nitrogenados que realizan los organismos. Esta eliminación se hace en forma de amoníaco (algunos peces y organismos acuáticos), en forma de urea (mamíferos) o en forma de ácido úrico (aves y organismos de zonas secas), dichos compuestos serán más tarde transformados por las bacterias nitrificantes. Si los compuestos nitrogenados no son transformados estos acaban formando iones amonio que resultan muy tóxicos en especial para los organismos acuáticos (CICEANA, 2011).

El mayor reservorio de nitrógeno se encuentra en el suelo (sustrato) es una parte integrante del ciclo global del Nitrógeno. El nitrógeno del suelo se deriva originalmente del nitrógeno atmosférico (N_2). Los microorganismos del suelo sean de vida libre o asociados simbióticamente con las plantas, fijan el N_2 formando nitrógeno orgánico (NH_2), por lo tanto estas moléculas pasan a formar parte de la materia orgánica del suelo.

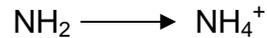
Una característica principal del ciclo del nitrógeno es su transformación continua desde la fase orgánica (N insoluble) a la fase inorgánica o mineral (N soluble) a través de los procesos de mineralización realizados por la biomasa microbiana. Ambos procesos ocurren simultáneamente en el suelo.

La descomposición de la materia orgánica convierte parte del N orgánico en N mineral de ahí el término mineralización esta denominación se aplica a los iones

amonio (NH_4^+), nitritos (NO_2^-) y nitratos (NO_3^-). El nitrógeno principalmente en las formas de amonio y nitrato es absorbido por las plantas o asimilado por los microorganismos y convertido a nitrógeno orgánico (Zagal *et al.*, 2003).

Conversiones del nitrógeno en distintos compuestos

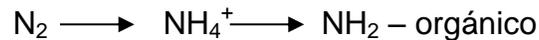
Mineralización: transformación microbiana de N orgánico a N inorgánico



Nitrificación: es la oxidación de N amoniacal a nitritos y nitratos por microorganismos.



Fijación de Nitrógeno: es la conversión de N_2 en la atmosfera del suelo a NH_4^+ por grupos especializados de microorganismos. El NH_4^+ es asimilado como N orgánico.



Desnitrificación: es la pérdida de gases nitrógeno y óxido nitroso desde el suelo bajo condiciones anaerobias.



(Zagal *et al.*, 2003).

2.8.5. Ciclo del Fósforo

El ciclo del fósforo en los suelos es un sistema dinámico y complejo que involucra la acumulación de este elemento en la biomasa microbiana, materia orgánica y formas inorgánicas. El fósforo en el suelo puede ser particionado en compartimentos que varían en su disponibilidad para las plantas y microorganismos. Una fracción pequeña se encuentra en forma soluble el cual se encuentra en equilibrio con la fracción lábil (fosforo orgánico fácilmente minerabilizable). La mayor parte está en forma insoluble o fijadas, principalmente

como minerales primarios fosfatados, humus, fosfatos insolubles de Ca, Fe y Al. (Picone *et al.*, 2002).

En la parte del ciclo del fósforo correspondiente a los suelos, el fósforo orgánico representa una fracción importante oscilando en 15 y 80% del fósforo total dependiendo del suelo

El fósforo orgánico está compuesto a su vez por varias fracciones, desde las más lábiles hasta las más resistentes a la mineralización. No obstante el componente orgánico central del ciclo de P es la biomasa microbiana, la cual es una fracción lábil controlada por factores ambientales y por aquellos relacionados con el manejo de los suelos (Picone *et al.*, 2002).

2.8.6. Desarrollo de los humedales como medio para tratar aguas residuales

La remoción de nutrientes de las aguas residuales han tenido como desarrollo el uso de humedales artificiales para el tratamiento de estas aguas, además este método ha ido en aumento (Konnerup *et al.*, 2011; Zachritz *et al.*, 2008; Sindilariu *et al.*, 2008; Gottschall *et al.*, 2007; Lybbery *et al.*, 2006; Schulz *et al.*, 2003; Michael 2003; Lin *et al.*, 2002). Los humedales han sido utilizados para tratar aguas acidas procedentes de minas, aguas residuales municipales, aguas industriales y aguas procedentes de sistemas agrícolas. Las investigaciones han demostrado que los sistemas de tratamiento a base de humedales pueden remover cantidades significativas de sólidos suspendidos, materia orgánica, compuestos nitrogenados, compuestos fosfatados, elementos traza y microorganismos contenidos en estas aguas (Ying-Feng *et al.*, 2002).

Por otro lado el uso de humedales para tratar aguas residuales pueden ser una opción viable en muchos casos debido a su relativo bajo costo de construcción y operación (Gottschall *et al.*, 2007) además existen varios tipos de estos (flujo horizontal, flujo vertical, inundados, etc.) mismos que presentan diferentes niveles de eficiencia en la tasa de remoción de residuos y nutrientes (Konnerup *et al.*, 2011; Zurita *et al.*, 2009).

Los humedales de flujo sub-superficie (que se han seleccionado para el desarrollo de esta investigación) consisten básicamente en una base de arena o grava en donde se siembran plantas emergentes. El agua fluye tanto vertical como horizontalmente a través de la base de material pétreo donde los contaminantes son descompuestos como resultado principalmente por la actividad microbiana. Las plantas tienen diversos roles en los humedales artificiales el principal es la absorción de nutrientes, aunque recientemente se le ha dado énfasis al uso de plantas de ornato en las zonas tropicales (Konnerup *et al.*, 2011).

Sin embargo el uso de plantas tipo ornato debe estar bien fundamentado y se deben seleccionar las mejores ya sea por su tasa de remoción de nutrientes, valor estético o su eficacia con determinado cultivo acuícola.

Todas las interacciones de los componentes físicos, químicos y biológicos mencionados anteriormente en los humedales hacen posible que estos desempeñen varias funciones vitales (RAMSAR, 2006) por ejemplo:

- Almacenamiento de agua
- Recarga de acuíferos
- Descarga de acuíferos
- Depuración de aguas
- Retenciones de nutrientes, sedimentos y contaminantes

Algunos beneficios de los humedales son:

- Abastecimiento de agua (cantidad y calidad)
- Las capturas de peces están vinculadas a las zonas de humedales
- Agricultura (retención de nutrientes en las llanuras)
- Posibilidades de recreación y turismo

La meta del presente estudio es evaluar la viabilidad del uso de humedales artificiales como una herramienta para tratar las descargas de agua residuales acuícolas de un sistema de recirculación acuícola para la producción de trucha y

comparar el desempeño de diferentes tipos de plantas en la remoción de los residuos de dicho sistema.

2.8.7. Maduración de humedales

Los sistemas intensivos de acuicultura con reúso y recirculación del agua requieren de mecanismos físicos y biológicos para la remoción de los productos metabólicos originados por el ecosistema. Uno de los principales componentes del sistema de tratamiento lo constituyen los filtros biológicos. La principal función de estos biofiltros es la de remover el nitrógeno amoniacal vía nitrificación por acción de bacterias nitrificantes. El producto final de la nitrificación es el nitrato (NO_3), el cual no es considerado tóxico para organismos acuáticos de cultivo. Los biofiltros por lo general necesitan ser activados mediante la adición de bacterias nitrificantes y amonio. El tiempo de maduración del biofiltro es variable dependiendo de varios factores, entre estos: tipo de sustrato para adherencia de bacterias, concentración de amonio, presencia de bacterias nitrificantes, tasas de crecimiento de las bacterias, niveles de oxígeno, pH, entre otros. El proceso de nitrificación puede ser descrito mediante una curva sigmoidea, caracterizada por una fase de iniciación, una fase de máxima tasa de nitrificación y una fase de final (Figura 2).

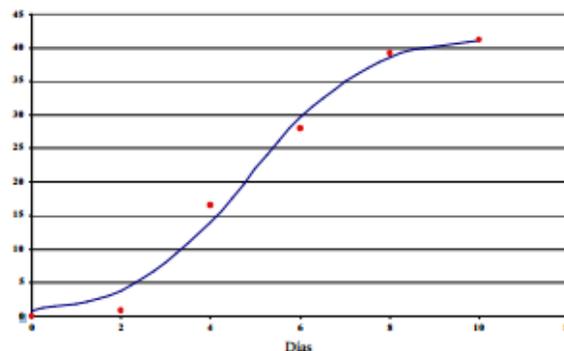


Figura 2. Tiempo de maduración típica de biofiltros en base a las concentraciones de N-NO₃ (Sonnenholzner, 2004)

2.9. Efectos ambientales y la acuicultura

El cultivo de peces tiene el potencial de causar tanto en el continente como en la costa impactos en el ambiente cercano dependiendo de la intensidad y la escala del sistema de producción.

Dichos impactos incluyen distorsión del ecosistema local, efectos a corto y largo plazo, eutrofización, contaminación por cenobióticos, transmisión de parásitos y patógenos etc.

Dichos efectos ambientales deben ser minimizados tanto para conservar la producción así como para preservar el ambiente para otros usuarios.

Por lo tanto es necesario evaluar la capacidad ambiental de la zona para la acuicultura (Black, 2000).

Tabla 3. Principales efectos ambientales de la acuicultura (Rabassó, 2006)

Aspecto	Posibles efectos
Alimentación y heces	<ul style="list-style-type: none">• Aumento del nivel de nutrientes• Fenómenos de 'blooms' de fitoplancton• Disminución o desaparición de comunidades de plantas perennes por otras de crecimiento rápido• Reducción de la diversidad en la flora y la fauna asociada• Desarrollo de masas (blooms) de poca vida que pueden convertirse en 'molestias' para la pesca, la navegación o playas de esparcimiento.• Cambio en la distribución vertical de las algas bentónicas pudiendo provocar reducción en la entrada de luz en la

Aspecto	Posibles efectos
	<p>columna de agua.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Incremento del número de organismos bentónicos filtradores y detritívoros • Aumento del consumo de oxígeno heterotrófico llegando al agotamiento del oxígeno y al desarrollo del sistemas anóxicos con la producción de sulfato de hidrógeno • Mortalidades en plantas y animales principalmente bentónicos • Disminución de la diversidad del zooplancton y de las especies de peces.
Fuga de especies cultivadas	<ul style="list-style-type: none"> • Introducción de especies exóticas • Amenaza para las especies nativas porque compite por el alimento y por los lugares para vivir • Portadores de enfermedades • Pueden dañar la solidez genética, ya que los genes que son aceptables para sobrevivir en la granja diluyen los genes que han sido desarrollados para vivir en condiciones naturales.
Efecto atractivo sobre las especies salvajes	<ul style="list-style-type: none"> • Concentración en los alrededores de las jaulas de las especies salvajes que se encuentran en la zona.
	<ul style="list-style-type: none"> • Se emplean pesticidas y otros químicos para combatir los brotes de enfermedades que afectan a las poblaciones salvajes

Aspecto	Posibles efectos
Químicos y antibióticos	<ul style="list-style-type: none"> • El uso de antibióticos puede afectar a especies salvajes. Se acumula en el fondo. Puede favorecer las condiciones anaeróbicas • Crea bacterias resistentes

Existen diversos métodos para determinar los posibles efectos de una actividad humana sobre el ambiente una en este caso sobresale la Evaluación de Impacto Ambiental

2.9.1. Evaluación de Impacto Ambiental (EIA)

El objetivo de la evaluación del impacto ambiental es la sustentabilidad, pero para que un proyecto sea sustentable debe considerar además de la factibilidad económica y el beneficio social, el aprovechamiento razonable de los recursos naturales (SEMARNAT, 2011).

La EIA se basa en diversas herramientas para definir los efectos ambientales de cierta actividad humana, una de estas herramientas es la Matriz de Leopold.

2.9.1.1. Matriz de Leopold

La matriz de Leopold es un método cuantitativo de evaluación de impacto ambiental creado en 1971. Se utiliza para identificar el impacto inicial de un proyecto en un entorno natural.

El sistema consiste en una matriz con columnas representando varias actividades que ejerce un proyecto (ejemplo.: desbroce, extracción de tierras, incremento del tráfico, ruido, polvo etc.), y en las filas se representan varios factores ambientales que son considerados (aire, agua, geología etc.). Las intersecciones entre ambas se numeran con dos valores, uno indica la magnitud (-3 a +3) y el segundo la

importancia (1 a 3) del impacto de la actividad respecto a cada factor ambiental. Las medidas de magnitud e importancia tienden a estar relacionadas, pero no necesariamente están directamente correlacionadas. La magnitud puede ser medida en términos de cantidad: Área afectada de suelo, Volumen de agua contaminada etc. (Leopold, 1971).

CAPITULO III

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

3. JUSTIFICACIÓN

La producción de organismos acuáticos depende de diversos factores siendo uno de los más importantes el agua de la cual depende dicha producción por lo que el uso adecuado de esta permite un mejor desarrollo de esta industria y a su vez aumenta la seguridad de suministro de agua.

Las descargas de agua contaminada procedentes de la acuicultura causan eutrofización y otros efectos nocivos que reciben los cuerpos de agua. Por lo tanto el desarrollo de tecnología que mejoren la relación entre el ambiente y la producción de organismos acuáticos es necesaria para evitar la degradación del mismo cercano a este tipo de desarrollos (zona de influencia ambiental) para que estos modifiquen en lo menos posible el ecosistema circundante y puedan seguir gozando de los servicios ambientales que los recursos naturales le ofrece a este tipo de producción.

En este contexto resulta importante el desarrollo de tecnologías ambientales adecuadas como es el uso de humedales para la remoción de residuos procedentes de unidades de producción trutícola (UPT) mismos que sean ambiental y económicamente sustentables.

Los humedales han sido utilizados como un medio para tratar aguas residuales que resulta económico tanto en su construcción como en su operación y que han generado buenos resultados en el tratamiento de estas aguas.

Por otro lado los humedales se han operado utilizando diferentes plantas para la remoción de residuos contenidos en el agua, por lo que resulta importante determinar qué tipo de vegetación es la mejor para remover residuos de una Unidad de Producción Trutícola (UPT) y como el uso de estos sistemas de tratamiento de aguas modifica los efectos ambientales que la UPT genera.

4. HIPÓTESIS

El uso de la plantas *Echinochloa crus-galli* + *Hydrocotyle ranunculoides* en un mismo humedal de flujo sub-superficie es más eficiente en la remoción de nutrientes y residuos de agua proveniente de un sistema de recirculación trutícola que el uso de una sola especie de planta en dicho sistema.

5. OBJETIVO GENERAL Y PARTICULARES

5.1. Objetivo General

Evaluar la viabilidad del uso de humedales artificiales como una herramienta para tratar las descargas de aguas residuales acuícolas de una Unidad de Producción Trutícola (UPT) inserta en un SRA comparando, también, el desempeño de diferentes tipos de plantas en la remoción de los residuos del sistema.

5.2. Objetivos específicos

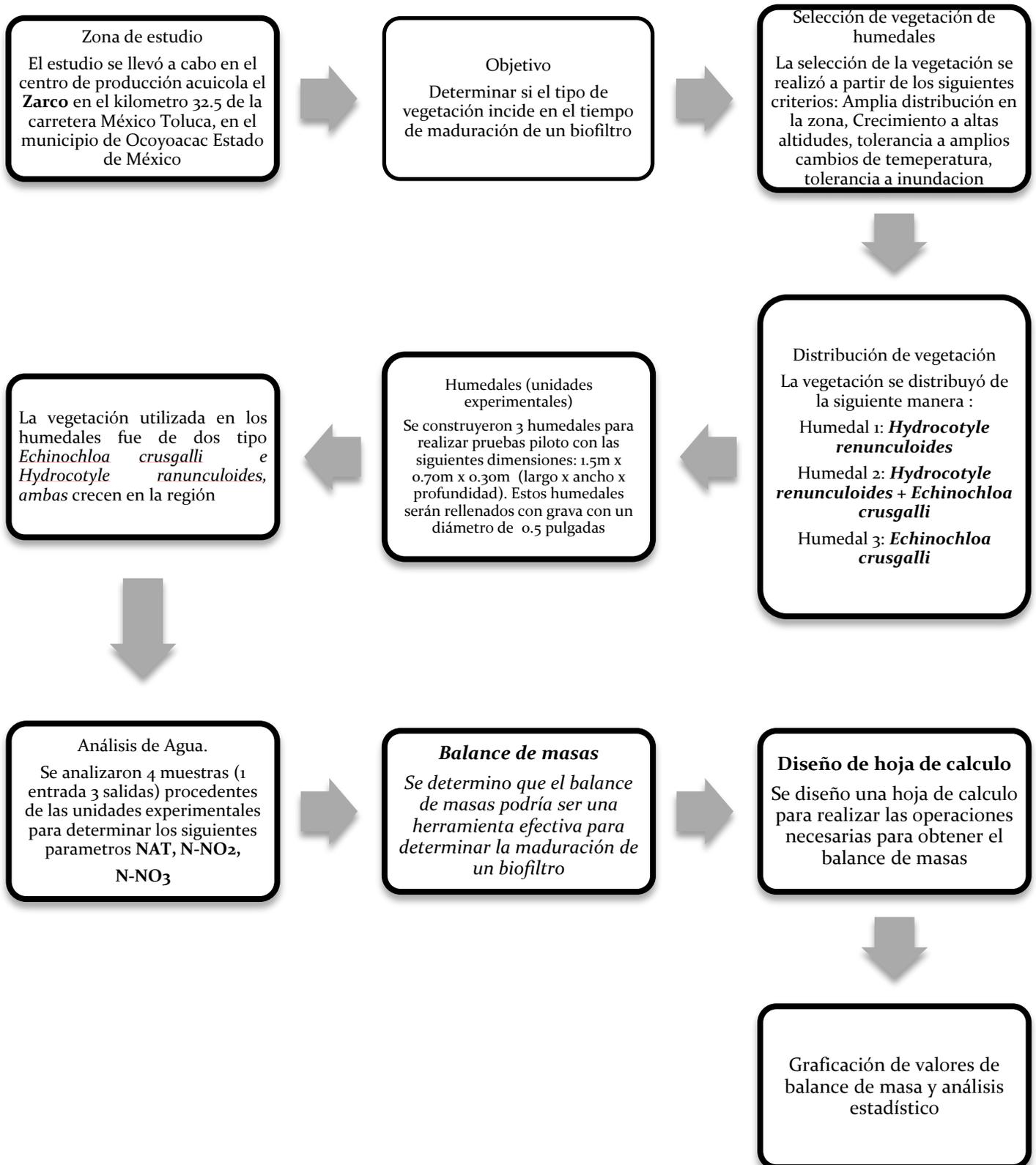
- *Determinar si el tipo de vegetación modifica el tiempo de maduración de un humedal.*
- *Evaluar el uso de 2 diferentes especies de plantas para remediar los residuos acuáticos procedentes de un cultivo de trucha en un sistema de recirculación*
- *Determinar los efectos ambientales de un sistema de recirculación en las etapas de construcción y operación mediante una Matriz de Leopold*

CAPITULO IV

METODOLOGÍA

6. METODOLOGÍA

6.1. Diagrama de flujo metodológico “Maduración”



6.1.1. Metodología 1. Maduración de Humedales

6.1.1.1. Zona de estudio

El estudio se llevó en el Centro Piscícola “El Zarco” que se ubica en el kilómetro 32.5 de la Carretera libre México - Toluca, en el Municipio de Ocoyoacac, Estado de México, dentro del Parque Nacional Miguel Hidalgo y Costilla, también denominado “La Marquesa”; se sitúa sobre la parte central del eje Neovolcánico Transversal entre las Coordenadas Geográficas 19° 17' 04" de latitud Norte, 99° 21' 00" de longitud Este a una altitud de 2,900 - 3,100 metros sobre el nivel del mar.

Este trabajo se ejecutó en el nuevo Sistema de Recirculación Acuícola que fue construido en el centro antes mencionado (*figura 3*).



a



b

Figura 3. Centro acuícola el Zarco (a) y Sistema de Recirculación Acuícola (b)

6.1.1.2. Construcción de humedales

Se construyeron 4 humedales para el tratamiento de aguas residuales acuícolas con las siguientes dimensiones: 1.5m x 0.70m x 30cm (largo x ancho x profundidad) que en conjunto suman un área de 4.5 m², área suficiente para remover los residuos para el SRA utilizado (figura 4).

Los humedales fueron colocados todos de manera horizontal con un sistema de irrigación que permitió un flujo homogéneo en cada una de las unidades experimentales (figura 5).

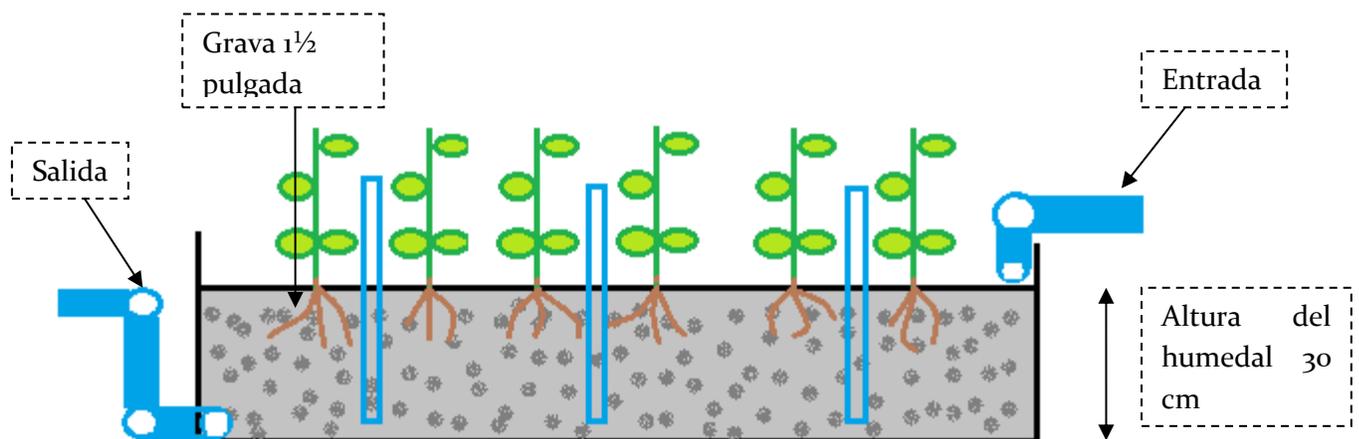


Figura 4. Diseño de los humedales a evaluarse.

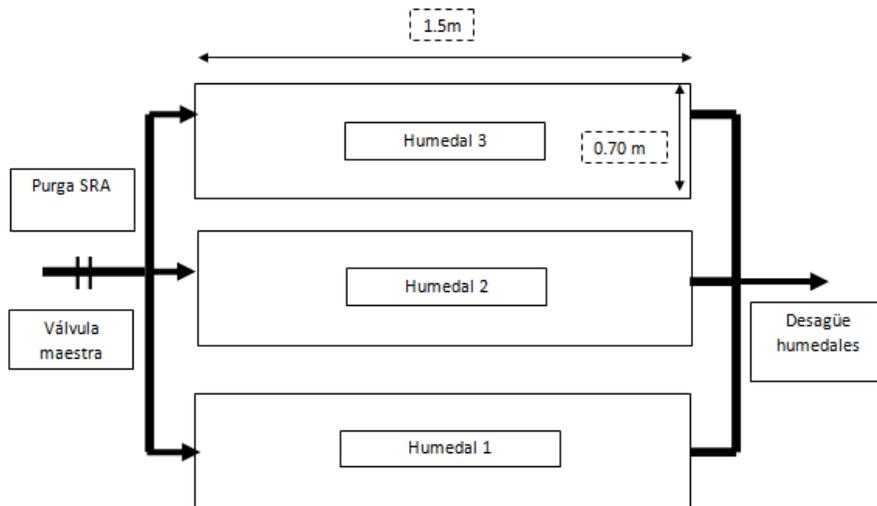


Figura 5. Distribución de los humedales de acuerdo al flujo del agua.

Sustrato

El uso de tipo de sustrato para estos humedales fue de grava 1½” pulgadas ya que es un sustrato confiable debido a que su porosidad es relativamente baja lo que garantiza que los poros no se saturen con el tiempo (Konnerup *et al.*, 2011; Zurita *et al.*, 2009).

Vegetación

La vegetación cultivada en los humedales es de dos tipos (Tabla 4), la primera fue *Hydrocotyle ranunculoides* y la segunda *Echonocholea crus-galli* ambas crecen en la región y son tolerantes a las condiciones climáticas inherentes de la región.

Tabla 4. Distribución de la vegetación en las unidades experimentales

<u>Humedal 1</u>	<u>Humedal 2</u>	<u>Humedal 3</u>
<i><u>Echonochoa crusgalli</u></i>	<i><u>Echonochoa crusgalli & Hydrocotyle ranunculoides</u></i>	<i><u>Hydrocotyle ranunculoides</u></i>

6.1.1.3. Flujo de agua

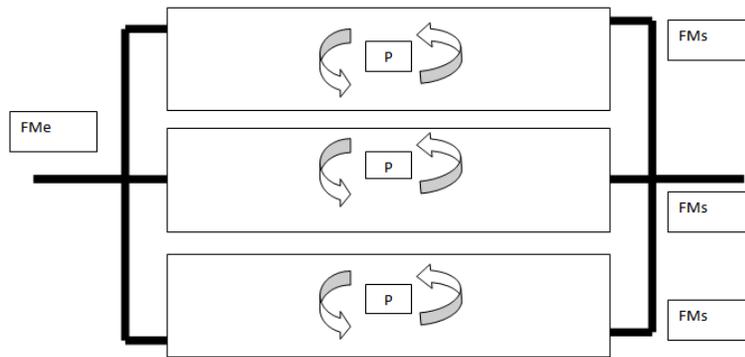
Los humedales recibieron un flujo continuo para su maduración de 0.066 L/s de agua con un tiempo de retención de 79 minutos (0.312 m³/d). El agua utilizada para la maduración provenía de las descargas de un estanque de las cercanías.

6.1.1.4. Análisis de agua

analizaron 4 muestras que corresponden a una entrada de agua (ya que todos los humedales recibían agua desde la misma fuente) y tres salidas de la misma (correspondiente a los desagües de cada humedal). Los análisis realizados a la muestras de agua fueron para NAT, N-NO₂, N-NO₃, debido a que estas especies químicas están involucradas en la nitrificación y por ende en la maduración de un biofiltro.

6.1.1.5. Balance de masas

Se utilizó el balance de masas para determinar la maduración de los humedales debido a que es un método que considera el flujo másico en lugar de concentraciones puntuales en el muestreo. En la *figura 6* se observa el modelo matemático utilizado para el balance de masas y los puntos de muestreo (FMe, FMs).



$$FM = (Q_e * C_{e_n}) + (Q_{s_n} * C_{s_n})$$

Donde:

FM= Flujo másico

Q_e = caudal de entrada

C_e = concentración de entrada del caudal

Q_{s_n} = caudal de salida de humedal

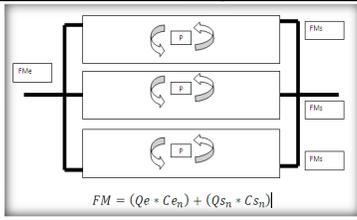
C_{s_n} = concentración de salida del caudal después de humedales

Figura 6. Distribución de unidades experimentales y formula de flujo másico

6.1.1.6. Diseño de hoja de cálculo para el balance de masas

Se diseñó una hoja de cálculo (Figura 7) que permitió de manera automatizada convertir los valores puntuales de los muestreos en porcentaje de remoción y g/d removidos considerando las entradas y salidas cada sistema independiente para de esta forma poder construir los gráficos de balance de masas.

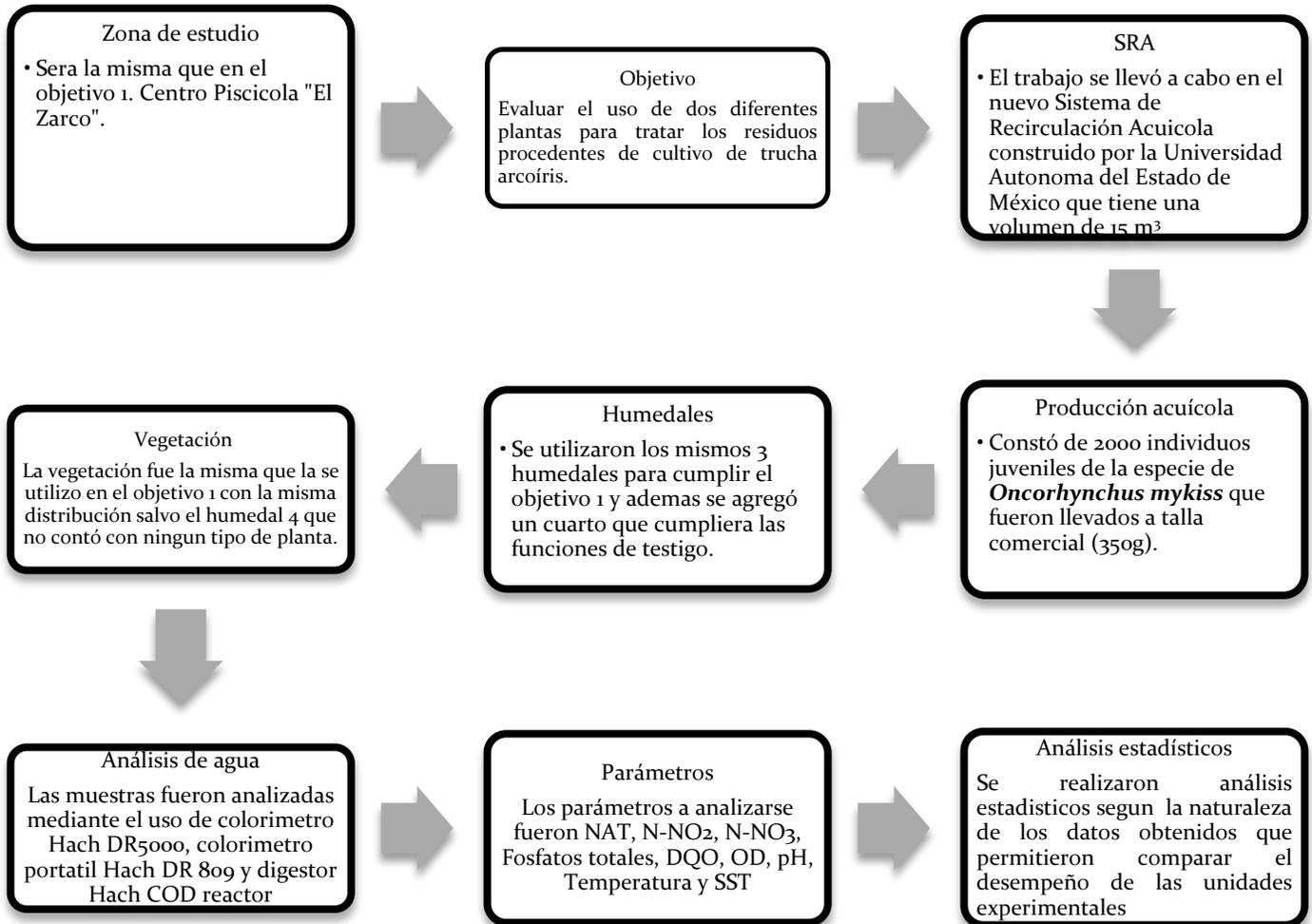
Punto de muestreo	Caudal (L/d)	Balance masa NAT		Entrada (+1) y salida (-1)			Balance (g como N-NAT)			
		Concentración (mg/L N-NO3)	FM (g como N-NO3)	Entrada	Salida	Diferencia	Entrada	Salida	Diferencia	
E	5760	0.075	0.432	1	1	1	0.432	0.432	0.432	
S1	5760	0.074	0.42624	-1			-0.42624			
S2	5760	0.048	0.27648		-1			-0.27648		
S3	5760	0.076	0.43776			-1			-0.43776	
							Entrada (g/d)	0.432	0.432	0.432
							Salida (g/d)	0.42624	0.27648	0.43776
							Diferencia g/d	0.00576	0.15552	-0.00576
							Diferencia %	98.6666667	64	101.333333



$FM = (Q_e \cdot C_{e_n}) + (Q_{s_n} \cdot C_{s_n})$

Figura 7. Ejemplo de hoja de cálculo

6.2. Diagrama de flujo metodológico para determinar la capacidad de tratamiento de los humedales



6.2.1. Metodología 2. Capacidad de tratamiento de los humedales

6.2.1.1. Zona de estudio

La zona de estudio fue a la misma descrita en el objetivo 1 en el mismo sistema de recirculación (figura 3).

6.2.1.2. Producción acuícola

Se utilizó un sistema de recirculación acuícola con una monoproducción de la especie *Oncorhynchus mykiss* (trucha arcoíris) con una siembra inicial aproximadamente de 3300 crías de dicha especie que fueron cultivadas hasta alcanzar 60g de peso.

6.2.1.3. Alimentación

La alimentación fue controlada estrictamente mediante el uso de cadenas de custodia así como el uso de alimentadores automáticos (Sweeney Modelo SF-36) con capacidad de administrar dosis exactas (figura 8), ya que es una forma de optimizar el desarrollo de los peces y al mismo tiempo controlar la cantidad de nutrientes que entran al sistema ya que en algún punto estos serán eliminados del SRA en forma de residuos que tuvieron como destino final los humedales.



Figura 8. Alimentador automático

6.2.1.4. Humedales

Se utilizaron los mismos tres humedales para completar el objetivo 1, pero en este caso se agregó un cuarto humedal que sólo contenía grava (sustrato) sin vegetación alguna como se muestra en la *figura 4* y que cumplió la función de testigo.

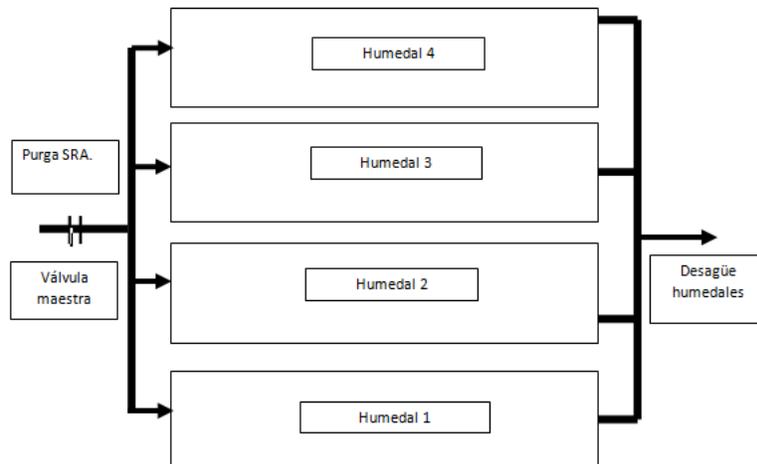


Figura 9. Distribución de los humedales de acuerdo al flujo del agua.

6.2.1.5. Vegetación

La vegetación sembrada en los humedales fue la misma a la que se tuvo en el objetivo 1 con la siguiente distribución.

Tabla 5. Distribución de la vegetación en los 4 humedales

Humedal 1	Humedal 2	Humedal 3	Humedal 4
<u><i>Echonochoa crusgalli</i></u>	<u><i>Echonochoa crusgalli</i></u> & <u><i>Hydrocotyle ranunculoides</i></u>	<u><i>Hydrocotyle ranunculoides</i></u>	Sin vegetación (testigo)

Por otro lado la vegetación se controló rigurosamente permitiendo en los humedales 1 y 3 que la vegetación saturara dicho sistema mientras que el humedal 2 se controló que la cantidad de tallos tanto de *Hydrocotyle ranunculoides* como de *Echonochoa crusgalli* fuera homogénea para ambas plantas.

6.2.1.6. Flujo de agua

Los humedales recibieron un solo tipo de flujo proveniente de la purga del SRA, a cada humedal le fue vertido 26 L/d de agua residual con un tiempo de retención de 9 horas en promedio.

6.2.1.7. Análisis del agua

Una vez que se les permitió madurar a los humedales, se tomaron muestras una vez por semana de cada uno de los humedales (Tabla 6) tanto en la entrada de dichos sistemas (muestra 1) como a su salida (muestra 2). Los parámetros medidos fueron: pH, temperatura y oxígeno disuelto mediante el uso de un

Oxímetro HACH modelo HQ40D, el DQO y PO₄ fueron determinados mediante el equipo HACH/COD REACTOR, la lectura se realizó mediante un Colorímetro HACH modelo DR-5000. Los compuestos NAT, N-NO₂, N-NO₃, FT y SST fueron determinados por medio de un Espectrofotómetro HACH modelo DR-890. Los análisis de agua se realizaron según la metodología propuesta por Apha, 1999.

Tabla 6. Distribución de muestreos de los parámetros físico-químicos

ANÁLISIS				
Parámetro		Ubicación		Día
		In situ	UAEMEX	
Oxígeno Disuelto	IS	X		Cada 3 ^{er} día
pH	IS	X		Cada 3 ^{er} día
Temperatura	IS	X		Cada 3 ^{er} día
NAT	IS	X		Miércoles
N-NO ₂	IS	X		Miércoles
N-NO ₃	IS	X		Miércoles
SST	IS	X		Miércoles
DQO	CB		X	Miércoles
PO ₄	CB		X	Miércoles
COT	CA		X	Miércoles

6.2.1.8. Análisis de datos

Las diferencias en la calidad entre el agua de la purga del SRA y el desagüe de los humedales se determinó usando un análisis ANDEVA *t-student* así como un análisis Tukey post hoc para identificar diferencias entre grupos.

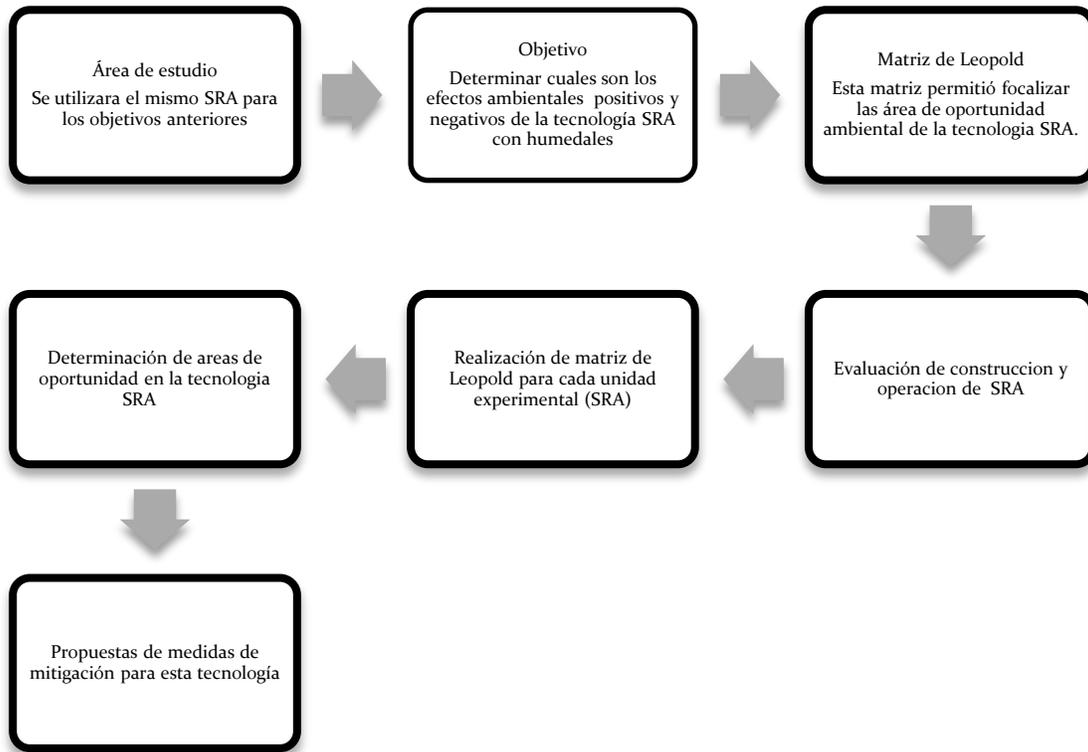
Además para evaluar el desempeño de los humedales se utilizó la tasa volumétrica de remoción (LRE por sus siglas en ingles) de compuestos del agua por la fórmula propuesta por Díaz *et al.* (2012) y Gottschall *et al.* (2007) para cada parámetro

$$LRE\% = \frac{(C_e \times F_e) - (C_s \times F_s)}{(C_e \times F_e)} \times 100$$

Donde C_e y C_s son las concentraciones de los contaminantes (mgL⁻¹) a la entrada (purga) y salida de cada humedal. F_e y F_s representa el flujo promedio

de entrada y salida respectivamente. La tasa volumétrica de conversión (LRE) propuesta por los anteriores autores tiene valor máximo de 100% sin embargo no tiene un límite inferior. Por lo tanto, valores negativos grandes pueden ser obtenidos cuando la concentración de entrada es pequeña comparada con la de salida (Díaz *et al.*, 2012). La LRE fue usada sólo para observar el desempeño de cada humedal en términos de eficiencia durante el tiempo de muestreo pero no se realizó análisis estadístico a estos datos

6.3. Diagrama de flujo metodológico 3. Determinación de efectos ambientales SRA.



4.1. Efectos ambientales.

Los efectos ambientales fueron identificados mediante el uso de una matriz de Leopold en donde se evaluaron dos etapas de un SRA (construcción y operación). La matriz de Leopold al ser una herramienta descriptiva sólo mostró en que área(s) o cuales parámetros ambientales o actividades relacionadas con la construcción y operación del sistema de recirculación tuvieron algún impacto sobre los sistemas naturales.

Para la construcción de la matriz de Leopold se utilizó la metodología propuesta por Leopold *et al.* (1971) con los siguientes valores para determinar la magnitud e importancia de cada impacto:

Tabla 7. Rangos de valor de la magnitud de impactos generados

Rangos de valor de la magnitud de los impactos generados		
Impacto débil		1
Impacto moderado		2
Impacto alto		3
Impacto positivo	(+)	
Impacto negativo	(-)	

Tabla 8. Rangos de valor de importancia de los impactos generados

Rangos de valor de la importancia de los impactos generados	
Importancia alta	3
Importancia media	2
Importancia baja	1

CAPITULO V

RESULTADOS

5. RESULTADOS

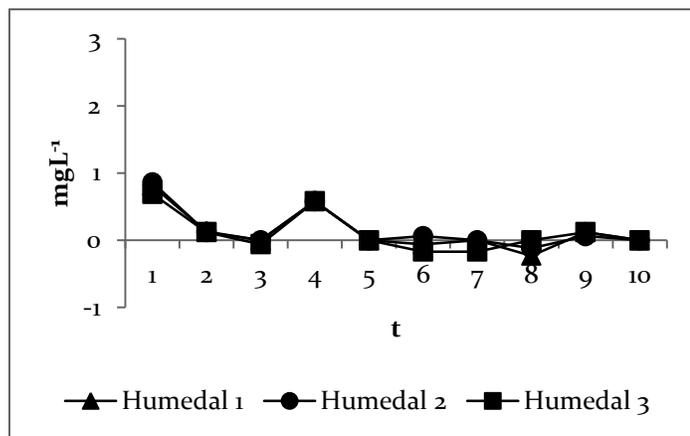
5.1. Resultados de Maduración de los humedales

La maduración de los humedales se evaluó mediante un balance de masas así como el muestreo puntual de los siguientes compuestos: NAT, N-NO₂, N-NO₃.

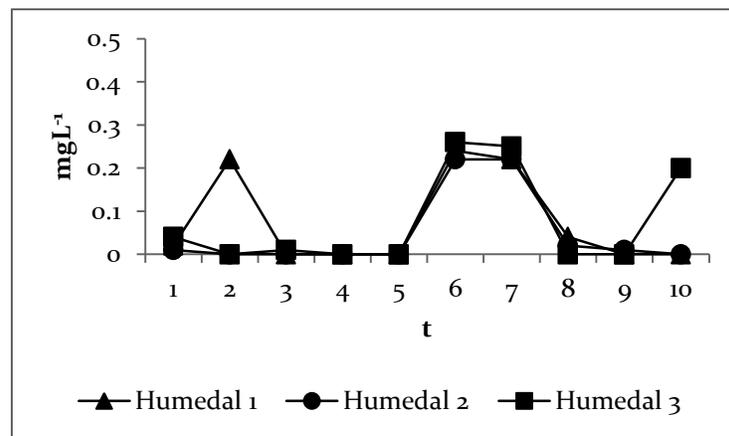
5.1.1. Nitrógeno Amoniacal Total (NAT)

Tabla 9. Balance de masas y muestreo puntual de NAT

No. Muestreo	NAT balance de masas			NAT muestreo puntual (mg/L ⁻¹)		
	Humedal 1	Humedal 2	Humedal 3	Humedal 1	Humedal 2	Humedal 3
1	0.81	0.86	0.69	0.02	0.01	0.04
2	0.13	0.12	0.12	0.22	0.00	0.00
3	0.00	0.00	-0.06	0.00	0.00	0.01
4	0.58	0.58	0.58	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	-0.06	0.06	-0.17	0.24	0.22	0.26
7	0.00	0.00	-0.17	0.22	0.22	0.25
8	-0.23	-0.12	0.00	0.04	0.02	0.00
9	0.12	0.06	0.12	0.00	0.01	0.00
10	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.20



a



b

Figura 10. Comparación del tiempo de maduración entre (a) flujo másico y (b) muestreo puntual para NAT.

En la comparación para determinar la maduración de los humedales es posible observar que mediante el método de balance de masas (Figura 10a) las

concentraciones de NAT decrecen del análisis 1 al análisis 2 0.8 g/d mientras que del análisis 5 en adelante las concentraciones de NAT a la salida de los 3 humedales permanecieron en valores cercanos a 0 g/d en promedio.

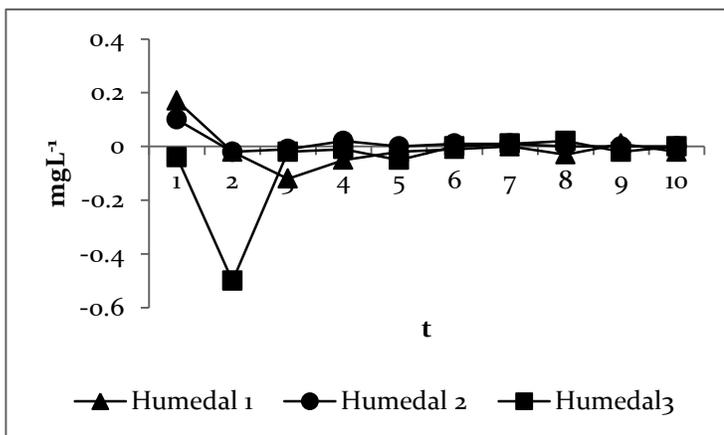
En el muestreo puntual (Figura 10b) las concentraciones durante el periodo de muestreo fluctuaron en los 3 humedales entre 0 mgL⁻¹ a 0.25 mgL⁻¹ entre el muestreo 1 al muestreo 8 y sólo en el muestreo 9 en adelante es posible observar una tendencia asintótica hacia valores cercanos a 0 mgL⁻¹.

5.1.2. Nitritos (N-NO₂)

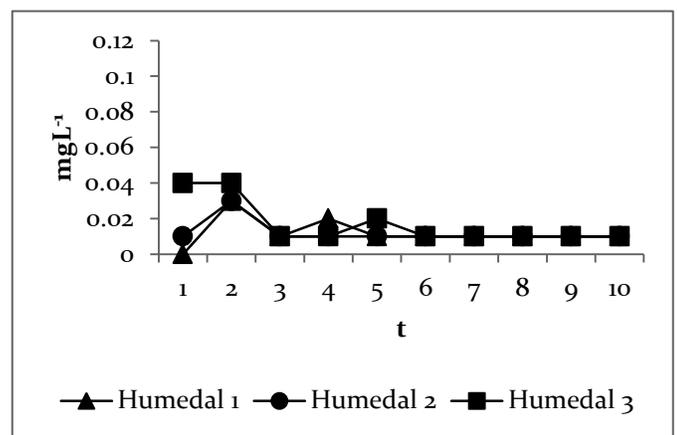
Tabla 10. Balance de masas y muestreo puntual N-NO₂

No. Muestreo	N-NO ₂ balance de masas		
	Humedal 1	Humedal 2	Humedal3
1	0.17	0.1	-0.04
2	-0.02	-0.02	-0.5
3	-0.12	-0.01	-0.02
4	-0.05	0.02	-0.01
5	-0.02	0	-0.05
6	-0.01	0.01	0
7	0	0.01	0.01
8	-0.03	0	0.02
9	0.01	0	-0.02
10	-0.02	0	0

N-NO ₂ muestreo puntual (mg/L)		
Humedal 1	Humedal 2	Humedal 3
0	0.01	0.04
0.03	0.03	0.04
0.01	0.01	0.01
0.02	0.01	0.01
0.01	0.01	0.02
0.01	0.01	0.01
0.01	0.01	0.01
0.01	0.01	0.01
0.01	0.01	0.01
0.01	0.01	0.01
0.01	0.01	0.01



a



b

Figura 11. Comparación del tiempo de maduración entre (a) flujo másico y (b) muestreo puntual para N-NO₂

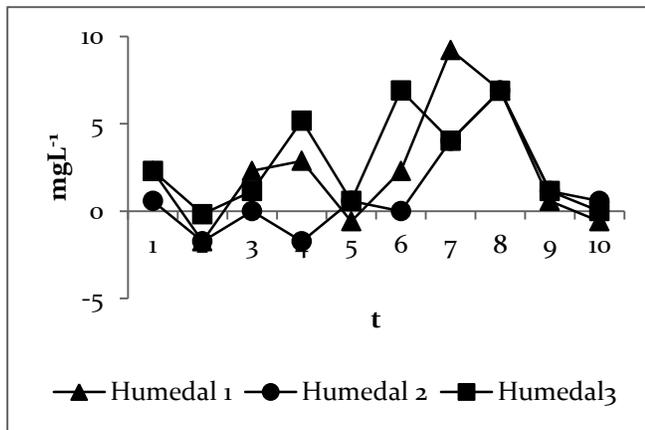
En el método por balance de masas (Figura 11a) se observa que las concentraciones de N-NO₂ permanecieron con un comportamiento asintótico cercano a 0 g/d lo cual puede estar asociado a adecuadas tasas de nitrificación de las especies nitrogenadas en los humedales.

En el método para determinar la madurez de los humedales mediante muestreo puntual (Figura 11b) es posible observar que al inicio de operación de estos sistemas existen fluctuaciones en las concentraciones (0.0 mgL⁻¹ a 0.035 mgL⁻¹) de N-NO₂ pero a partir del muestreo 3 la tendencia en los cuatros humedales fue a 0 mgL⁻¹ y permanecieron en ese rango durante el resto de periodo experimental.

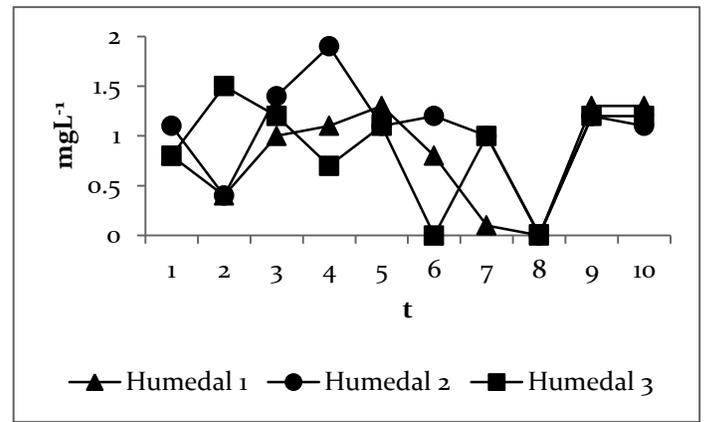
5.1.3. Nitratos (N-NO₃)

Tabla 11. Balance de masas y muestreo puntual N-NO₃

N-NO ₃ balance de masas			N-NO ₃ muestreo puntual (mg/L)		
Humedal 1	Humedal 2	Humedal3	Humedal 1	Humedal 2	Humedal 3
2.30	0.58	2.30	0.80	1.10	0.80
-1.73	-1.73	-0.17	0.40	0.40	1.50
2.30	0.00	1.15	1.00	1.40	1.20
2.88	-1.73	5.18	1.10	1.90	0.70
-0.58	0.58	0.58	1.30	1.10	1.10
2.30	0.00	6.91	0.80	1.20	0.00
9.22	4.03	4.03	0.10	1.00	1.00
6.91	6.91	6.88	0.00	0.00	0.01
0.58	1.15	1.15	1.30	1.20	1.20
-0.58	0.58	0.00	1.30	1.10	1.20



a



b

Figura 12. Comparación del tiempo de maduración entre (a) flujo másico y (b) muestreo puntual para N-NO₃

En la figura 12a correspondiente al balance de masas se observa que existe una tendencia de incremento en las concentraciones en los tres humedales llegando a un máximo en el humedal 1 (CW1) de 9 g/d sin embargo es posible observar que en los muestreos 9 y 10 existe una caída en estas concentraciones a valores de 0 g/d esto pudo estar asociado a que la especie N-NO₃ utilizada por la vegetación para su desarrollo.

En el muestreo puntual (Figura 12b) las concentraciones de N-NO₃ mostraron gran variación así como entre humedales aunque la concentraciones mostraron una tendencia hacia la baja en los 3 humedales que como en el balance de masas este comportamiento pudo asociarse a que la vegetación utiliza los nitratos para diversas actividades metabólicas.

5.2. Resultados de capacidad de tratamiento humedales

Dr. Iván Gallego Alarcón
Profesor - Investigador
Laboratorio de Acuicultura
Centro de Investigación en Recursos Bióticos
Universidad Autónoma del Estado de México
Tel/Fax: 52 (722) 296 5553. Email alternativo:
acuicultura@live.com

De: ees.ecoleng.0.2335ba.a2dd6b11@eesmail.elsevier.com
[ees.ecoleng.0.2335ba.a2dd6b11@eesmail.elsevier.com] En nombre
de William J. Mitsch (Editor-in-Chief Ecological Engineering)
[ecoeng@fgcu.edu]

Enviado el: martes, 13 de agosto de 2013 06:19 p.m.
Para: Ivan Gallego Alarcon; igatoluca@hotmail.com
Asunto: Submission Confirmation

Dear Dr. Ivan Gallego-Alarcon,

Your submission entitled "The use of constructed wetlands for the treatment of aquaculture wastewater in the Mexican highlands" has been received by Ecological Engineering

You may check on the progress of your paper by logging on to the Elsevier Editorial System as an author. The URL is <http://ees.elsevier.com/ecoleng/>.

Your username is: iga@uaemex.mx
If you need to retrieve password details, please go to: http://ees.elsevier.com/ECOLENG/automail_query.asp

Your manuscript will be given a reference number once an Editor has been assigned.

Thank you for submitting your work to this journal.

Kind regards,

Elsevier Editorial System

Ecological Engineering

For further assistance, please visit our customer support site at <http://help.elsevier.com/app/answers/list/p/7923>. Here you can search for solutions on a range of topics, find answers to frequently asked questions and learn more about EES via interactive tutorials. You will also find our 24/7 support contact details should you need any further assistance from one of our customer support representatives.

Dear Dr. Arturo González-Rodríguez,

You have been listed as a Co-Author of the following submission:

Journal: Ecological Engineering

Title: The use of constructed wetlands for the treatment of aquaculture wastewater in the Mexican highlands

Corresponding Author: Ivan Gallego-Alarcon

Co-Authors: Arturo González-Rodríguez, Hidrobiologist; Daury García-Pulido, Dr.; Cristina Burrola-Aguilar, Dr.

We would like to invite you to link your ORCID to this submission. If the submission is accepted, then your ORCID will be transferred to ScienceDirect and CrossRef and will be updated on your ORCID account.

To go to a dedicated page in EES where you can link an existing ORCID, or sign-up for an ORCID, please click the following link: <http://ees.elsevier.com/ecoleng/1.asp?i=29767&l=57BD6M2D>

Please note: If you did not co-author this submission, please do not follow the above link but instead contact the Corresponding Author of this submission at iga@uaemex.mx; igatoluca@hotmail.com.

What is ORCID?

"ORCID is an open, non-profit, community-based effort to create and maintain a registry of unique researcher identifiers and a transparent method of linking research activities and outputs to these identifiers."

<http://www.ORCID.org>

More information on ORCID can be found on the ORCID website, <http://www.ORCID.org>, or on our ORCID help page: http://help.elsevier.com/app/answers/detail/a_id/2210/p/7923

Thank you,

Ecological Engineering

The use of constructed wetlands for the treatment of aquaculture wastewater in the Mexican highlands

Arturo González-Rodríguez ^a

E-mail: arturoecosfera@hotmail.com

Iván Gallego-Alarcón ^{a*} (Corresponding author)

E-mail: iga@uaemex.mx

Daury García-Pulido ^b

E-mail: dgarciap@uaemex.mx

Cristina Burrola-Aguilar ^a

E-mail: cba@uaemex.mx

^a Centro de Investigación en Recursos Bióticos, Facultad de Ciencias, *Universidad Autónoma del Estado de México*. Instituto Literario 100, Col. Centro. Toluca, Estado de México. México. C.P. 50000. Tel/Fax: +52 (722) 296 55 53.

^b Centro Interamericano de Recursos del Agua, Facultad de Ingeniería. *Universidad Autónoma del Estado de México*. Instituto Literario 100, Col. Centro. Toluca, Estado de México. México. C.P. 50000. Tel/Fax: +52 (722) 296 55 51.

Corresponding author:

Dr. Iván Gallego Alarcón

Centro de Investigación en Recursos Bióticos

Universidad Autónoma del Estado de México,

Instituto Literario 100, Col. Centro,

C.P. 50000. Toluca, Estado de México, México.

Tel/Fax: +52 (722) 296 55 53

E-mail: iga@uaemex.mx

Abstract

Constructed wetlands have been used widely for treating aquacultural wastewater. However, the study of constructed wetlands in cold climates has been limited. Four constructed wetlands for the treatment of aquacultural wastewater from 3000 juvenile trout culture were monitored in a six-month operating season during winter to evaluate the removal capacity of different pollutants under cold conditions. The highest nitrogen species removal performance (Total Ammonium Nitrogen: 30%, NO₂-N: 22% and NO₃-N: 56%) was carried out by the wetland with a combination of two plant species: *Echinochloa crus-galli* and *Hydrocotyle ranunculoides*. The same situation was for the Total Phosphate removal which averaged 23%, Total Solid Suspended 60% and Chemical Oxygen Demand 10%-50%. However, when these two plants operated independently their performance varied widely but was consistently lower compared with the plant-combined wetland. In contrast the lowest performance from the four wetlands was showed by a wetland with no vegetation increasing in several cases the concentrations of pollutants at the wetland's outlet.

Keywords: Efficiency removal rates; Trout production unit; Constructed wetlands; *Echinochloa crus-galli*; *Hydrocotyle ranunculoides*; *Recirculating aquaculture system*.

1. Introduction

Aquaculture is an industry that is in constant development throughout the world (Sindilariu *et al.*, 2007). Nowadays aquaculture is a growing, vigorous and important food-sector, which is rich producing proteins, aquaculture represents the 36.8 percent of the total world fishing industry (FAO, 2010).

In Mexico policies about rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) production is focused to increase through the application of sustainable production and promotion models of good management techniques for fish growth. In 2010 the trout from aquaculture in Mexico reached 4,916 tons distributed in the State of México, Puebla, Oaxaca, Michoacán, Hidalgo, Chihuahua y Veracruz in which are located 984 trout farms for trade purposes and 170 for consumption (CONAPESCA, 2011). In this context the State of Mexico became the main trout producer in Mexico with a yield of 3,105 tons on 2010 (SAGARPA, 2011).

The need to increase aquacultural production is driving the industry toward more intensive practices. Some of the factors that influence this trend are: limitations in quality and quantity of water, availability and cost of land, limitations on water discharges and environmental impacts. Recirculating technologies help minimize these issues. A recirculating aquaculture facility reduces water demands and discharges by reconditioning of water (Gutierrez-Wing & Malone, 2006). In Mexico and in the world rainbow trout are produced in both Recirculating Aquaculture Systems (RAS) (close system) and open systems in ponds, tanks or raceways, with a flow through of water from nearby rivers or brooks. Any RAS or open aquaculture implies that effluents are discharged to the environment with enhanced nutrient and solid concentrations. Such aquaculture effluents may have serious consequences for the environment when discharged untreated (Konnerup *et al.*, 2011; Schulz *et al.*, 2003; Camargo *et al.*, 1992).

The use of Constructed wetlands (Cw) for the aquaculture wastewater treatment is a feasible option mainly because the good-ratio that these systems offer; moreover, this technology is widely used around the world (Dan *et al.*, 2011; Vymazal 2009; Zurita *et al.*, 2009). Constructed wetlands are ecologically

beneficial and a demonstrated alternative of reducing suspended solids, biochemical oxygen demand (BOD), nitrogen, phosphorus and heavy metals from wastewater of many sources (Tilley *et al.*, 2002). Constructed wetlands are relatively simple to build and operate which is a prerequisite in many developing countries. In Mexico there have been reported some successful studies in the use of constructed wetlands treating different types of wastewater (Mexicano *et al.*, 2013; Zurita *et al.*, 2009; Belmont *et al.*, 2004; Whitney *et al.*, 2003). Certainly Cw's acts as biofilters through a combination of physical, chemical and biological factors and are capable of removing a wide variety of contaminants (Díaz *et al.*, 2012).

Subsurface flow (SSF) wetland systems use a bed of soil, gravel or rock as a substrate for a wide variety of rooted, emergent wetland plants. Wastewater flows horizontally through the bed media contacting a mixture of aerobic, anaerobic and facultative microbes living in association with the substrate and plant roots (Zachritz *et al.*, 2008). It is assumed that areas planted with emergent macrophytes positively affect the water restoration capacity of the wetland (Lin *et al.*, 2002). This is caused by the development of microbial community at the root surface creating microenvironments. This community influence nitrogen removals in Cw's since in this community are involve nitrifying and denitrifying microorganisms, which are responsible for nitrogen transformations resulting in nitrogen removal (García-Lledo *et al.*, 2011).

Since the trout farming requires specific environmental conditions for its development (SEDAGRO, 2006) in Mexico this kind of culture takes place on the Mexican highland. Therefore, the environmental condition is a major issue for the effectiveness of constructed wetlands in cold climates, especially for surface flow wetlands. Nitrogen removal, as it was said before it depends on microbial activity, has been shown to be temperature sensitive, while phosphorus removal is indirectly affected by temperature (Gottschall *et al.*, 2007). The aim of this study was to evaluate the performance of SSF constructed wetlands in the treatment of aquacultural wastewater under cold weather plus high altitude and the feasibility of using this technology.

2. Material and methods

2.1. Study site and fish production

This study was carried out in the trout production center “El Zarco” in Ocoyoacac, State of Mexico 19°17'45” N, 99°21'17” W. Mexico at an altitude of 3100 meters above the sea level, where the climate is classified as partially cold C(E) and wet with rainfall in summer (ACw). The production trout center “El Zarco” is the main producer of rainbow trout fingerling in Mexico. This center is located at an altitude of 3100 masl as the climate conditions are optimal for trout farming activities. Normally for fish production this center takes the water from local springs after it's used is disposed without any treatment into near natural and one artificial waterbodies. This studied was carried out in a new Recirculation Aquaculture System (RAS) with a volume of 27 m³ in which 3000 of juvenile rainbow trout were stocked for fish production purposes. This study last from October 2012 to March 2013 in which the juvenile trout grew from 3g to 41g in average.

2.2. Design of constructed wetlands and water flow

The design of the constructed wetlands was done using the methodology proposed by Arias (2004) considering these points:

The total area that a wetland should have per human wastewater production:

Minimums area for a Cw: 2m² per person.

Human wastewater production in average: 150Ld⁻¹

Design Calculus:

Wetland Inlet flow (in terms of human wastewater production (hwp))

$$Q_{hwp} = 26.6 \text{ Ld}^{-1}$$

$$Q_{hwp} = \frac{26.6 \text{ Ld}^{-1}}{150 \text{ Ld}^{-1}} = 0.1773_{hwp}$$

Therefore:

$$Area = \frac{(0.1773hwp) (2m^2)}{1hwp} = 0.3546m^2$$

Using the former calculus, four constructed wetlands subsurface flow were built with the next dimensions each: 1.5 m long x 0.70 m wide x 0.40 m deep with 30 cm of gravel as substrate for each Cw system. The area of each wetland was of 1.05 m², which represents 60% more area than the suggested by the calculus as these systems would be operating in tough weather conditions. The four Cw's were connected to a recirculation aquaculture system discharge and using a master valve in order to each wetland could receive the same amount of wastewater (Fig. 1). The water flows that each Cw system received was 26 Lday⁻¹.

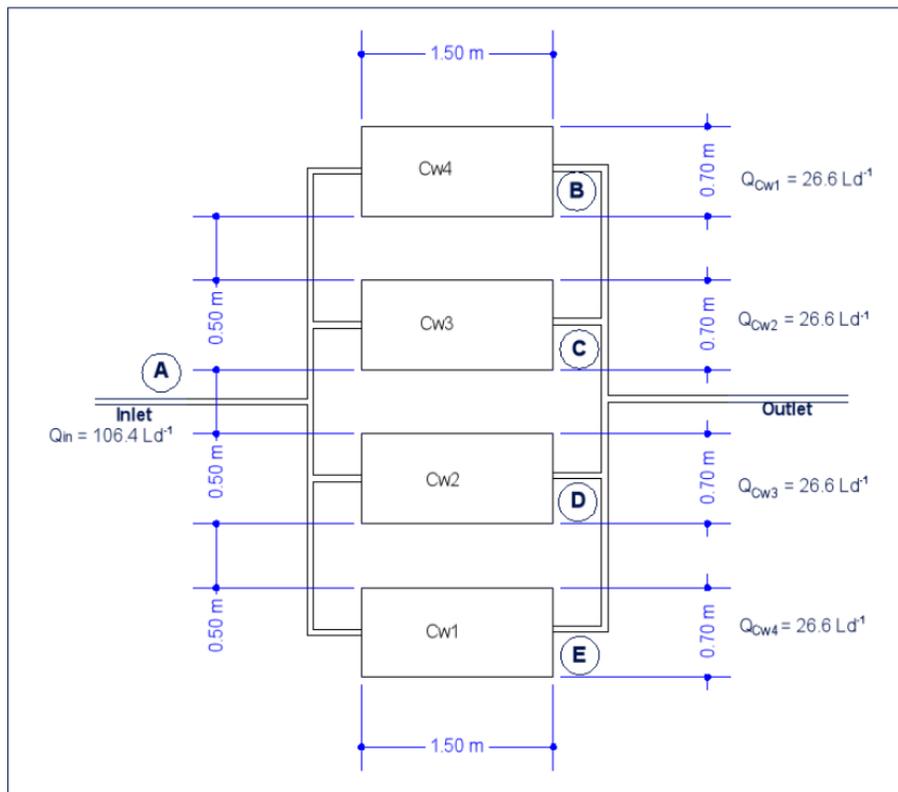


Figure 1: Connection to the RAS, Constructed wetland distribution and caudal in each wetland system.

*Letters represent sampling points.

Table 1: Inlet water quality

Parameter	Average value
Temperature	10°C
Dissolved oxygen (DO)	3.7 mgL ⁻¹
ph	6.78
TAN	1.92 mgL ⁻¹
NO ₂ -N	0.31 mgL ⁻¹
NO ₃ -N	1.94 mgL ⁻¹
TP	1.9 mgL ⁻¹
COD	112.44 mgL ⁻¹
TSS	275.36 mgL ⁻¹
TOC	71.27 mgL ⁻¹
Alkalinity (CaCO ₂)	26.42 mgL ⁻¹

2.3. Vegetation

The vegetation on each wetland was selected on the 2011-2012 winter by the following characteristics: a) the plant should grow at high altitude; b) it should grow naturally in the area; c) tolerance to drastic temperature changes; d) flooding tolerance. The two plant selected were: *Hydrocotyle ranunculoides* and *Echinochloa crus-galli*. The reason of this selection was based firstly in the former criteria and secondly in the fact that *Hydrocotyle* sp. has been studied widely in Cw's and it could be an excellent reference while *Echinochloa* sp hasn't been study widely in Cw systems. The plant distribution on the four wetlands was done randomly (table 1); in the Cw1 the *Echinochloa crus-galli* was planted, in the Cw2 a mixture of *Echonochloa crus-galli* and *Hydrocotyle ranunculoides* were planted, in Cw3 *Hydrocotyle ranunculoides* was planted; finally in Cw4 was not planted with any vegetation (blank).

Table 2: Vegetation distribution

Constructed Wetland 1	Constructed Wetland 2	Constructed Wetland 3	Constructed Wetland 4
<i>Echinochloa crus-galli</i>	<i>Echinochloa crus-galli</i> and <i>Hydrocotyle ranunculoides</i>	<i>Hydrocotyle ranunculoides</i>	No vegetation (blank)

2.4. Water sampling collection and water analysis

Water samples were collected weekly throughout October 2012 – March 2013 (n= 21-25 per site). One liter high-density polyethylene bottles were used for sampling, submerging them 10 cm in the water column, the outlet water sample were collected 10-15 seconds after the master valve was opened (in order to discharge the wastewater remaining in the PVC tube) this water sample was taken once as every Cw received the same water; the Cw samples were taken in each Cw outlet. These samples were analyzed for Total Ammonium Nitrogen (TAN), Nitrite-N (NO₂-N), Nitrate-N (NO₃-N), Total Suspended Solids (TSS), Chemical Oxygen Demand (COD), Total Phosphate (TP) and Total Organic Carbon (TOC) at the Autonomous University of the State of México's water laboratory, according to analytical protocols outlined in Standard Methods (1998). Dissolved oxygen (DO), pH and temperature were measured in the field three times per week (n=88-90) using a Hach (model HD-40) equipment.

2.5. Data analysis

Differences in water quality parameters between input and output for each wetland were determined using a paired-samples *t*-test ANOVA plus a post hoc Tukey's test in punctual sampling.

Afterwards CW's performance was assessed using the metric load removal efficiency (LRE) (Díaz *et al.*, 2012; Gottschall *et al.*, 2007). LRE for each parameter and sampling date was calculated as:

$$LRE\% = \frac{(C_{in} \times F_{in}) - (C_{out} \times F_{out})}{(C_{in} \times F_{in})} \times 100 \quad (1)$$

Where C_{in} and C_{out} are the input and output pollutant concentration (mgL⁻¹), and F_{in} and F_{out} are the inlet and outlet average daily flow volumes (Lday⁻¹), respectively. Seasonal LRE (%) was the average of all individual LRE (%) values. LRE (%) have a maximum positive value of 100% but no lower limit. Therefore large negative values can result when input load is small relative to output load (Díaz *et al.*, 2012).

The LRE (%) was used only to see the performance of each CW in terms of efficiency during the time of research but no analysis was done with this data.

3. Results and discussion

Seasonal average concentrations of select chemical and physical water quality characteristics from input and output location of the four constructed wetland are shown in Table 2.

Table 3. Physical and Chemical water quality characteristics of every wetland influent and effluent over October 2012- March 2013; mean \pm standard deviation; n= 20-25 per location.

Parameter / Wetland	CW1		CW 2		CW3		CW4	
	INLET	OUTLET	INLET	OUTLET	INLET	OUTLET	INLET	OUTLET
pH	5.95 \pm 2.91	4.83 \pm 2.99	5.95 \pm 2.91	4.67 \pm 3.01	5.95 \pm 2.91	5.33 \pm 2.76	5.95 \pm 2.91	4.92 \pm 2.30
DO (mg L ⁻¹)	4.48 \pm 2.90	2.71 \pm 2.43*	4.48 \pm 2.90	3.13 \pm 2.46*	4.48 \pm 2.90	3.41 \pm 2.48*	4.48 \pm 2.90	2.72 \pm 1.37*
TAN (mg L ⁻¹)	1.92 \pm 1.05	1.87 \pm 0.87	1.92 \pm 1.05	1.04 \pm 0.87*	1.92 \pm 1.05	1.28 \pm 1.17*	1.92 \pm 1.05	2.07 \pm 1.15
NO ₂ -N (mg L ⁻¹)	0.307 \pm 0.41	0.23 \pm 0.39	0.307 \pm 0.41	0.19 \pm 0.56	0.307 \pm 0.41	0.107 \pm 0.09	0.307 \pm 0.41	0.12 \pm 0.14
NO ₃ -N (mg L ⁻¹)	2.03 \pm 0.98	1.78 \pm 1.04	2.03 \pm 0.98	1.57 \pm 0.71*	2.03 \pm 0.98	1.88 \pm 0.66	2.03 \pm 0.98	1.38 \pm 0.47*
TP (mg L ⁻¹)	7.28 \pm 4.98	7.19 \pm 4.42	7.28 \pm 4.98	4.6 \pm 4.54*	7.28 \pm 4.98	6.45 \pm 4.16*	7.28 \pm 4.98	7.53 \pm 4.84
COD (mg L ⁻¹)	112.4 \pm 76.39	92.04 \pm 69.48*	112.4 \pm 76.39	66.68 \pm 43.73*	112.4 \pm 76.39*	77.8 \pm 62.1*	112.4 \pm 76.39	118 \pm 67.78*
TSS (mg L ⁻¹)	251.1 \pm 334.4	276.41 \pm 327.8	251.1 \pm 334.4	58.64 \pm 84.24*	251.1 \pm 334.4	301.37 \pm 297.3	251.1 \pm 334.4	97.26 \pm 110.43*
TOC (mg L ⁻¹)	71.26 \pm 109.39	49.31 \pm 49.16	71.26 \pm 109.39	26.42 \pm 39.26*	71.26 \pm 109.39	34.85 \pm 42.74*	71.26 \pm 109.39	47.09 \pm 47.4

* Asterisk along-side output wetland values indicate significant differences (p<0.05) with respect to its input.

3.1. Temperature

Water temperature average during the sampling season varied from 5°C to 15 °C in most of the cases. However, Cw4 showed the lowest registered temperatures near 5°C in several cases and one near 0°C (Fig. 2); it could be associated to the lack of vegetation in this wetland as the water had not protection from the environmental temperature regimen of the area.

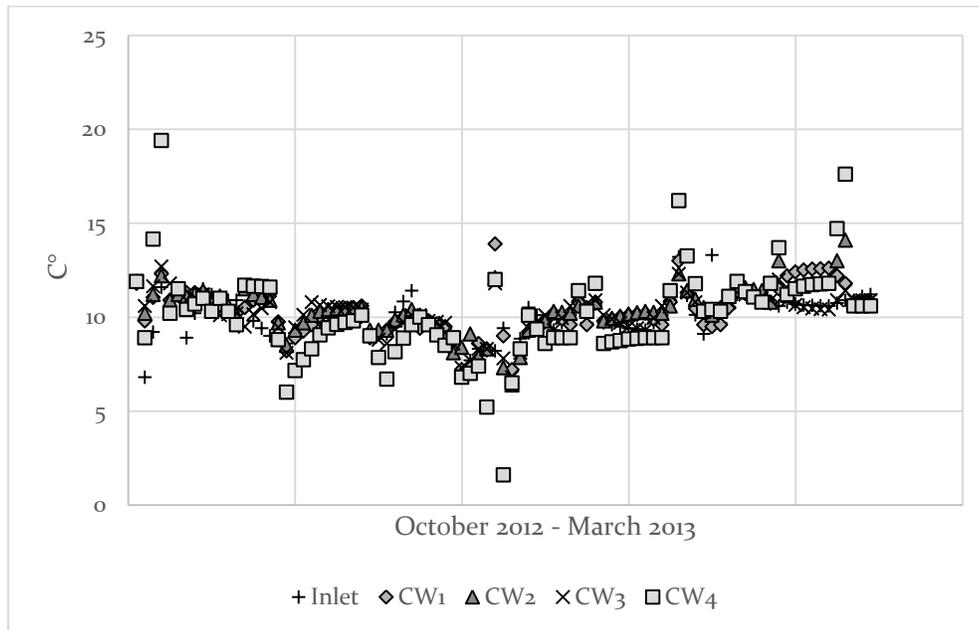


Figure 2. Temporal temperature (C°) variation (October 2012-March 2013) from inlet and output on each constructed wetland (n= 80-90 per location).

3.2. pH and dissolved oxygen

Average pH of the wetland inputs ranged 5.95 and pH slightly increased due the wetland treatment but the average pH can be considered constant from 6 to 8 in the mayor sampling season time (Fig. 2). Mean DO concentrations were $>5 \text{ mgL}^{-1}$ at input and in the outputs the concentration was lower ($>3 \text{ mgL}^{-1}$) showing on each CW significant differences due to wetland treatment. In any case inlet concentrations did not reach anaerobic conditions ($\text{DO} < 1 \text{ mgL}^{-1}$) (Díaz *et al.*, 212), the same situation was for the outlet concentrations of Cw1, Cw2 and Cw3 since

the minimum observed value was 2.71 mgL⁻¹. However, it should be noted that DO concentrations were only measured within 10 – 15 cm depth at the inlet and outlet sites (Fig. 4).

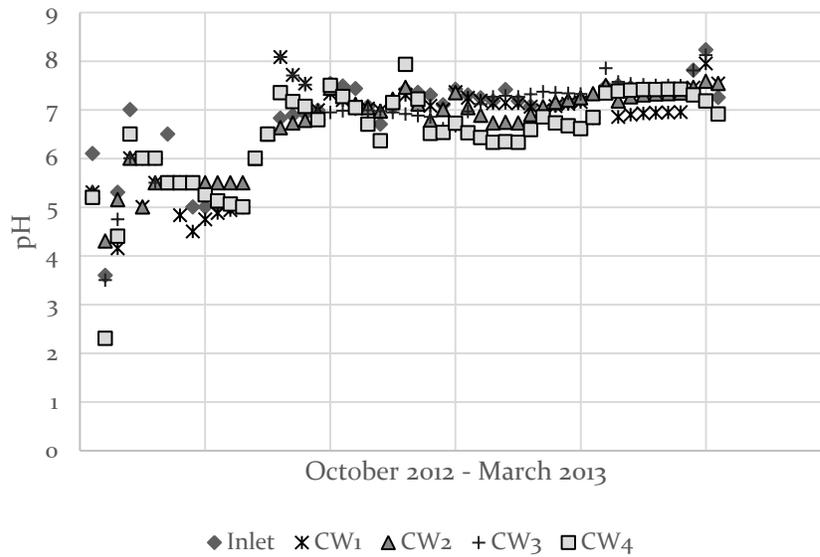


Figure 3: Temporal pH variation (October 2012- March 2013) from inlet and outlet on each constructed wetland (n= 50 per location).

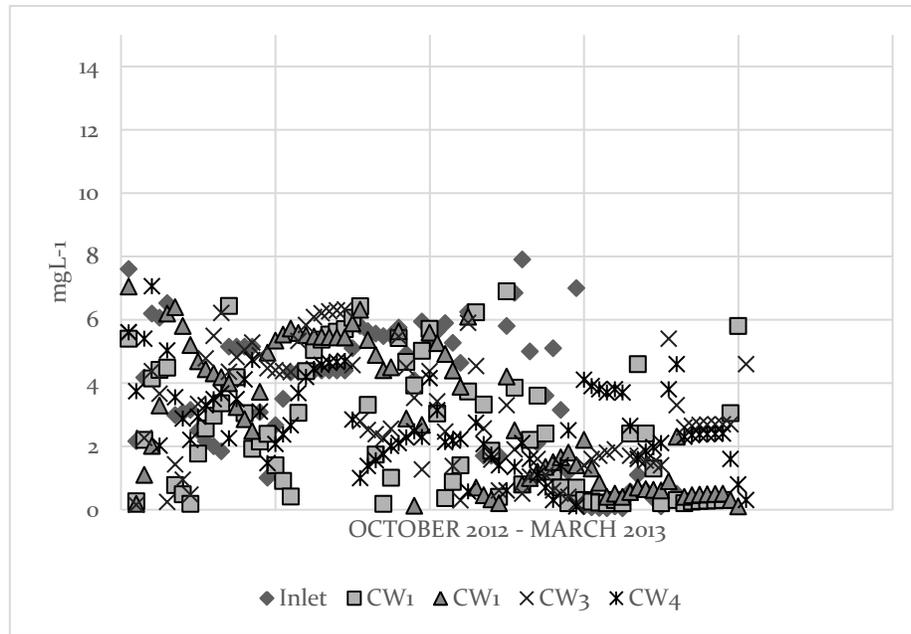


Figure 4: Temporal dissolved oxygen variation (October 2012-March 2013) from inlet and output on each constructed wetland (n= 80-85 per location).

3.3. Nitrogen

The constructed wetlands differed widely in their capacity to remove nitrogen species (Fig. 5). Total Ammonium Nitrogen (TAN) in Cw1 presented a negative load removal efficiency LRE (%) near to -45% but in the punctual analysis (Table 2) this wetland showed a positive performance (1.92 mgL^{-1} vs. 1.87 mgL^{-1}) which could be considered extremely poor; Cw4 showed the worst performance among the wetlands in LRE (%) values near to -100%; in the punctual sampling analysis (Table 2) this wetland had the same negative development respect to the inlet in average (1.92 mgL^{-1} vs. 2.07 mgL^{-1}). In contrast Cw2 decreased the TAN concentrations after treatment (1.92 mgL^{-1} vs. 1.04 mgL^{-1}), in terms of LRE (%) this wetland had the best performance <30%, and in any other Cw with exception of Cw3 the concentrations were negative at outlet respect to the inlet concentrations. Cw3 had similar development decreasing TAN concentrations in water after treatment (4.48 mgL^{-1} vs. 3.41 mgL^{-1}); in Table 3 is possible to identify two groups of Cw's; those that have *Hydrocotyle ranunculoides* plants in their constitution (Cw2 ; Cw3) and those wetlands that presented negative values in performance

(Cw1 ; Cw4). However, Sindilaru *et al.* (2008) reported a TAN LRE (%) of 87% vs. compared with Cw2 (30%) and Cw3 (22%) that were the only wetlands that successfully eliminated TAN treating aquacultural wastewater. Zachritz, *et al.* (2008) reported a TAN concentration of 0.05 mgL⁻¹ vs. 1.04 mgL⁻¹; 1.28 mgL⁻¹ that Cw2 and Cw3 respectively presented in average at the outlet.

Averages NO₂-N concentrations inflow waters ranged from 4.00 mgL⁻¹ to 0.40 mgL⁻¹ with average of 0.307 mgL⁻¹ compared with the mean values of 0.23 mgL⁻¹; 0.19 mgL⁻¹; 0.12 mgL⁻¹ .107 mgL⁻¹ that Cw1, Cw2, Cw3 and Cw4 averaged at the outlet, showing no differences with the inflow waters (Table 2). Moreover, in terms of LRE (%) the worst performances were by Cw3 (-22%), Cw1 (-100%) that represent a poor efficiency with exception of Cw2 that showed a 22% of removal efficiency (Fig. 5). Cw1 showed a sharply increase in the concentration of NO₂-N at the outlet with mean LRE (%) of -100%. Martinez-Cruz *et al.* (2006) using a similar constructed wetland but in Mexican tropical environments reported values <89% for NO₂-N removal. It means Cw1, Cw3, and Cw4 could not oxidize this nitrogen specie fast enough to NO₃-N.

NO₃-N inlet concentrations did not exceed 2.03 mgL⁻¹ in average (Table 2). The highest differences between inlet and outlet were found in Cw4 with a NO₃-N concentration in the outlet of 1.38 mgL⁻¹ and Cw2 1.57 mgL⁻¹ and in terms of LRE (%) the only wetland that showed a positive performance was the Cw4 <11% (Fig. 5). Cw1 (-15%) and Cw3 (-24%) had negative removal efficiencies (Fig. 5); however, in the punctual sample analysis this two wetlands did removed NO₃-N but it was lower compared with the other Cw's (Table 2). Nevertheless, mean removal values did not represented significant differences between each wetland (Table 3). Ye & Li (2009) evaluating a constructed wetland reported a NO₃-N removal efficiency rate of 83% in a similar type of Cw. In the case of Cw4 the only wetland that removed NO₃-N this could be associated to denitrification processes in which NO₃-N could be transformed in other nitrogen compounds in anaerobically conditions which was the case for this Cw in several times during this study (Fig. 4).

According to Gottschall *et al.* (2007) cold climates generate uncertainty in the effectiveness of Cw's especially in the surface and subsurface flow designs. In this study was expected that temperature would play a main role in the nitrogen species removal especially because the bacteria and the plants that are responsible for nitrogen removal are less efficient in low temperatures (Akratos & Tsihrintzis, 2007).

Despite low temperatures and sometimes frozen conditions (Fig. 1) in where the constructed wetlands were operating; Cw2 and Cw3 were successful in the removal of nitrogen compounds, this can be associated to the adaptation into cold climates of the plants and bacteria that colonized the substrate. In this case the Cw2 had the lowest nitrogen compounds concentrations at the outlet, this might be associated to the fact that *H. ranunculoides* grows forming floating mats and also has an effective vegetative propagation (Hussner & Lösch, 2007) covering most of the wetland surface and also the presence of *E. crus-galli* in this Cw decreased the wastewater speed through the wetland; therefore, the water retention time in the Cw was higher and this could be beneficial to nitrification process of the nitrogen species, the only wetland that did not have any vegetation was the Cw4 and also was the wetland with the highest nitrogen compounds (TAN and NO₂-N) concentration at the outlet mainly because the wastewater had a free flow in the wetland.

Another mayor issue was the alkalinity as the water used for the trout production had CaCO₂ concentrations that average 26.42 mgL⁻¹ and the outlet wetlands concentration were even lower Cw1 (13.89 mgL⁻¹) Cw2 (17.37 mgL⁻¹) Cw3 (10.98 mgL⁻¹) and Cw4 (15.10 mgL⁻¹) this concentrations also affected the removal efficiency of nitrogen species in the four Cw's as low alkalinity concentrations affect the nitrification process (Coyne, 2000). We recommend adding Calcium carbonate to the culture tank or to the wetland in order to develop a better nitrification process in the constructed wetland system.

Table 4. Pollutant removal differences at the four combinations of vegetation (Table 1) and results of one-way ANOVA statistic (<i>F</i> -ratio).					
Parameter/ CW	CW1	CW2	CW3	CW4	F-Ratio
TAN mgL ⁻¹	1.874 ^B	1.047 ^A	1.286 ^A	2.072 ^B	5.48*
NO ₂ -N mgL ⁻¹	0.236 ^A	0.194 ^A	0.107 ^A	0.778 ^B	5.03*
NO ₃ -N	1.782	1.578	1.887	1.717	0.62
Phosphate-P mg L ⁻¹	4.625 ^A	6.457 ^A	7.196 ^A	28.14 ^B	4.3*
COD mgL ⁻¹	92.04 ^A	66.68 ^A	77.8 ^A	118.12 ^B	3.24*
TOC mgL ⁻¹	49.31	27.63	34.85	47.09	1.04
TSS mgL ⁻¹	276.417 ^B	56.61 ^A	301.379 ^B	72.856 ^A	8.33**

Different letters indicate differences based on a Tukey HSD test.
 *p<0.05
 **p<0.001

3.4. Total Phosphate (TP)

Inlet TP concentrations were higher (7.28 mgL⁻¹) than reported in previous studies treating wastewater from fishponds by wetlands. Konnerup *et al.* (2011); Zarich *et al.* (2008) and Sindilariu *et al.* (2008) reported an inlet concentration of wastewater proceeding from a fish culture of \bar{x} = 1.73 mgL⁻¹, 3.26 mgL⁻¹ and 31.31 µgL⁻¹ respectively. Despite the higher concentration at the inlet the Cw2 and Cw3 were able to decrease the concentration at the outlet (4.6 mgL⁻¹ and 6.45 mgL⁻¹ in each case) showing significant differences respect to the inlet concentration (Table 2). In the one-way ANOVA (Table 3) Cw1, Cw2 and Cw3 were considered similar while Cw4 was not, as this wetland was the only that added more phosphate to the water at the outlet (7.53 mgL⁻¹). In the analysis of LRE% the only wetland that had a positive performance was Cw2 (<23% in average) the other three wetlands showed a negative balance in the removal of this pollutant. Moreover, in Table 3 is possible to see that Cw1, Cw2 and Cw3 had similar removal rates while Cw4 is the only that had a difference variance.

Phosphorus in wetlands occurs as phosphate in organic and inorganic compounds. Free orthophosphate is the only form of phosphorus believed to be utilized directly by algae and macrophytes (Vymazal, 2007). Thus the removal of phosphate species is limited to a few compounds using constructed wetlands which coincide with the results obtained on this study; during the time that the wetlands were operating the phosphate concentrations increased steadily as the trouts gain weight. Moreover, P is an important water compound as in high concentrations can cause algae blooms (Konnerup *et al.*, 2011). Finally, it is important to note that in this particular study an automatic feeder was used to feed the trout which we believe could add the extra amount of phosphate compounds mainly as uneaten food at the outlet water; we recommend increasing the water retention time in the Cw's for a better phosphate plant/microbial uptake. However, sorptions as well as storage in biomass are saturable processes, meaning they have a finite capacity and therefore Cw's cannot contribute to long-term sustainable removal (Vymazal, 2007). If a substantial and constant removal is wanted the best solution is probably to install a unit with P-adsorbing substrate (Naylor *et al.*, 2003) or the use of chemicals for precipitation processes.

3.5. Chemical Oxygen Demand

Chemical Oxygen Demand is a water quality constituent of concern because it represents the amount of organic matter that have the potential to become an oxygenated water into an anoxic one. Inlet COD concentration ranged from 36.01 mgL⁻¹ to 188 mgL⁻¹, it is important to note that as the trout biomass increased so did the amount of organic matter presented in the wastewater. Outlet average concentration in Cw1 (92.04 mgL⁻¹), Cw2 (66.68 mgL⁻¹) and Cw3 (77.8 mgL⁻¹) showed significant differences compared to the inlet concentration. The Cw4 performance was negative as this wetland added more organic matter to the water in average (118 mgL⁻¹); the added organic matter amount measured at the outlet showed differences to the inlet concentration (Table 2), this could happened due to the accumulation of organic matter in the wetland as the DO concentrations in Cw4 (Table 2) were the lowest compared to the other Cw's.

The LRE (%) in Cw1 and Cw4 were negative at the mean values (Fig. 5); which is similar to previous studies as constructed wetlands accumulated organic matter after been operating a certain period of time plus during winter several plants died in Cw1 mainly because cold temperature that could add more organic matter to the system. Cw2 was the only wetland with a positive performance in average <10% but there were samples in which this wetland had a LRE of 50% (Fig. 5) and the removal probably occurred by anaerobic process as oxygen levels were consistently low (Thuy-Diem *et al.*, 2010). Cw2 and Cw3 represent the wetlands that had the best COD removal performance; nevertheless, in Table 3 is possible to see that Cw1 had a similar performance to the two previous wetlands. In this case we recommend the use of plants such as *Hydrocotyle* sp. as this plant grows rapidly, forms large mats and form large rhizomatus mats as well (Hussner & Lösch, 2007) as this species grows in nutrient-rich sites (Husnner & Meyer, 2009) which could help to precipitated the organic matter in water suspension so it could be oxidized in the substrate. Moreover, the presence of *Hydrocotyle* sp. in the Cw2 combined with *Echinochloa* sp. was beneficial as *Echinochloa* sp. generated free sites of *Hydrocotyle* sp. which could help the entrance of Oxygen in the water helping oxidizing the organic matter accumulated in the wetland. Finally, Cw2 was the unit with less plant mortality due cold conditions as *Hydrocotyle* sp. result to be very resistant to environmental changes generating better circumstances in which *Echinochloa* sp. could survive during winter.

3.6. Total Organic Carbon

TOC is an important parameter to analyze in water quality matters as several chemical compounds such as humic acid, amines, and urea, which are part of organic matter, generate TOC in water. Inlet TOC concentration averaged 71.26 mgL⁻¹. Despite Cw1 and Cw4 did remove TOC from water these systems did not show significant differences respect to inlet concentration. Meanwhile Cw2 (26.42 mgL⁻¹) and Cw3 (34.85 mgL⁻¹) presented significant removal differences respect to the inlet concentration (Table 2). For the four constructed wetlands the performance in terms of LRE (%) had negative values (Fig. 5) which according to

Table 3 there are no differences in the removal ability of any constructed wetland. It is important to note that there is a great data dispersion especially in Cw2 in which there is TOC LRE near to 50% but also negative ones that could reach values of LRE -50%. Nevertheless, Carroll *et al.* (2003) found that the concentrations of TOC in sediments significantly decrease once the wastewater from a fish farm is liberated into natural water bodies. Therefore, increasing the size of the wetland and depth of the substrate it is possible to expect a better removal of TOC by using Cw.

3.7. Total suspended solids (TSS)

TSS inlet concentration averaged 251.1 mgL^{-1} . Cw1 and Cw3 differed in their performances, Cw3 was the wetland that had the worst removal values (Table 2) compared to inlet concentration (251.1 mgL^{-1} vs. 301.37 mgL^{-1}) Cw1 had also a negative performance but not that sharply compared to inlet concentration (251.1 mgL^{-1} vs. 276.41 mgL^{-1}). On the other hand in the punctual sampling analysis Cw2 and Cw4 showed positive values. Cw2 averaged at the outlet a concentration of 58.64 mgL^{-1} while Cw4 at the outlet presented a concentration of 97.26 mgL^{-1} . In the LRE% analysis Cw1 averaged concentration of -310.28 mgL^{-1} and Cw3 averaged a concentration of -628.64 mgL^{-1} , which is the worst performance among all the wetlands. Cw2 and Cw4 in the punctual analysis had positives developments but also in terms of LRE (%) (Fig. 5) these two wetlands had positives performances as the LRE in both systems averaged a LRE (%) <60%.

However it is important to note that Cw2 in some cases showed LRE <90% and this patron is similar en Cw4. Vymazal, (2009) and Thuy-Diem *et al.* (2010) studying similar type of wetland reported a TSS LRE of 30% and 54.5 % respectively, which is similar to the results of Cw2 and Cw4. Thus, these two wetlands were different in their performances compared with Cw1 and Cw3 (Table 3). Is well known that *Hydrocotyle* sp. generates obstruction by rhizomatous mats which help to concentrate suspended solids that would create clogging problems; moreover, suspended solids content in the influent should also be paid attention in clogging as Lianfang *et al.* (2009) suggested that the average concentration of TSS

in the inflow should not exceed 100 mgL^{-1} to avoid clogging situations in a Cw, in this study inlet TSS concentration averaged 251.1 mgL^{-1} which in addition with the biological conditions of *Hydrocotyle* sp. could generated circumstances where the concentrations in the Cw3 outlet were the highest compared with the other three wetlands. We suggest to avoid the use of automatic feeders in order to control the excess of TSS concentrations generated as non-eaten food.

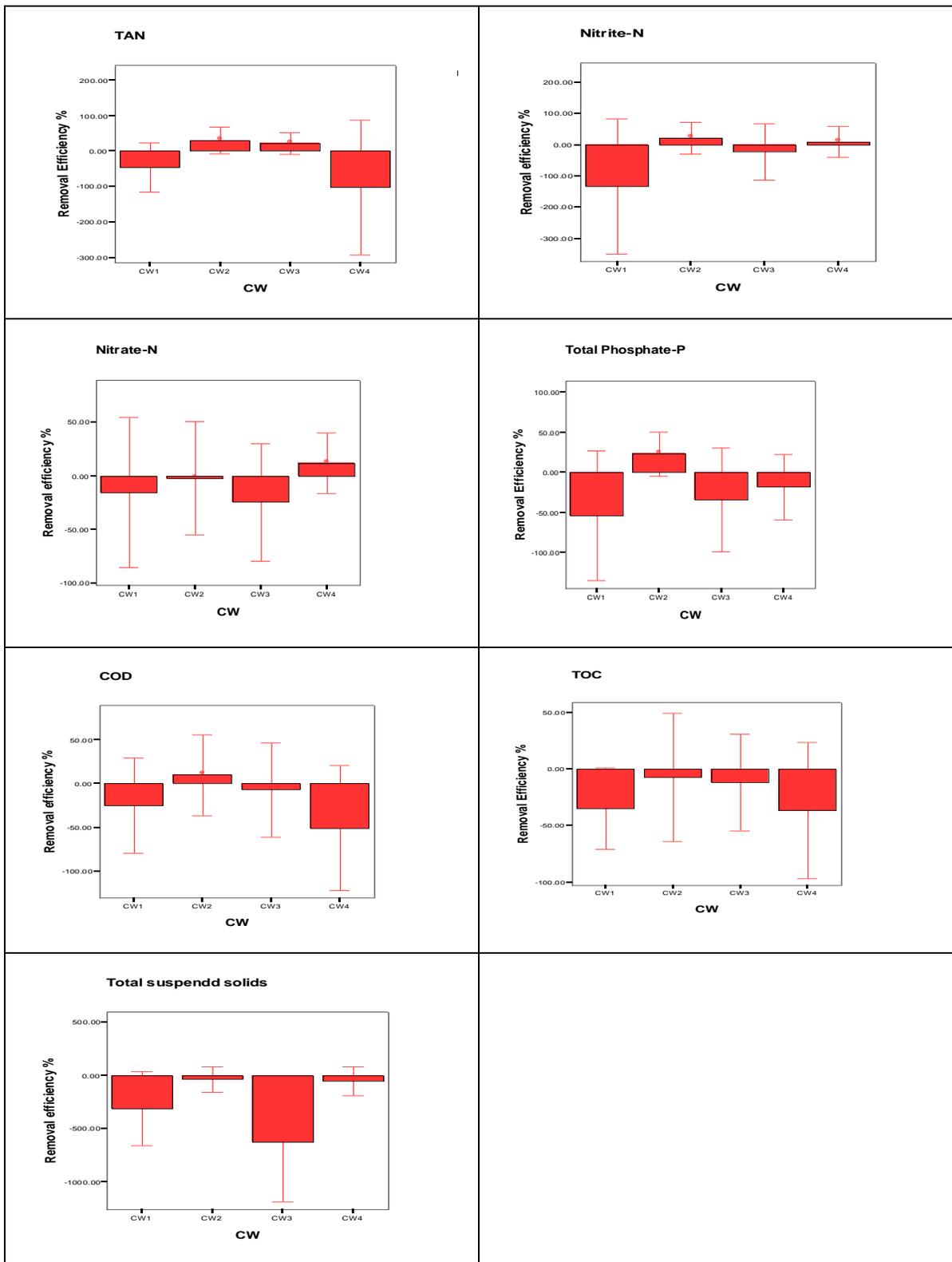


Figure 5. Comparison of removal efficiency for several chemical and physical pollutants in four constructed wetlands during the sampling season (October 2012-March 2013). Boxes represent mean and standard error; n=20-25 per location.

4. Conclusions

Information generated from this study has shown performance of Cw's for treating aquacultural wastewater is quite heterogeneous in tough environmental conditions. However, we found that the correct selection of vegetation and their combination can improve the removal performance of constructed wetlands despite the negative effects that temperature can induce in the pollutant removal in a Cw. Moreover, it is important to remark that the design of a wetland in cold climates should be considered a longer water retention time in order to enhance the removal efficiency as the standard method system design shows that the retention time calculated for wetlands is not enough for the removal of pollutants in cold conditions. In cold climates wetlands should have vegetation as the lack of it in a Cw maximized the negative effects of temperature in these systems. Finally, it is necessary to carry out more studies in the use of vegetation acclimated to cold conditions to find out the capacity of different plants removing pollutants in constructed wetlands.

5. Acknowledges

This work was supported by the Mexican Science and Technology National Commission (CONACYT). We thank to Autonomous University of the State of Mexico for letting us use the water analysis facilities and the Aquaculture Laboratory. Finally we want to thank to the Agriculture and Livestock Mexican Secretary (SAGARPA) for letting use the breeding trout facilities "El Zarco" to develop this project.

References

- Arıratos C. S. and Tsihrintzis V. A. 2007. Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecol. Eng.* 29, 173-191.
- Arias, C.A., 2004. Humedales construidos. Introducción y clasificación. Artículo de la pontificia Universidad Javeriana. Bogotá. Colombia.
- Belmont, M.A., Cantellano E., Thompson S., Williamson M., Sanchez A., Metcalfe C.D. 2004. Treatment of domestic wastewater in a pilot-scale natural treatment system in Central Mexico. *Ecol. Eng.* 23, 299-311.
- Camargo, J.A. 1992. Structural and trophic alternations in macrobenthic communities downstream from a fish farm outlet. *Hydrobiologia* 242 (1), 41-49.
- Carroll, L.M., Cochrane, S., Fieler, R., Velvin R., White, P., 2003. Organic enrichment of sediments from salmon farming in Norway: Environmental factors, management practices, and monitoring technics. *Aquaculture*, 226, 165-180.
- Coyne, M., 2000. Soil Microbiology: An exploratory perspective. Edit. Paraninfo. Chapter 19.
- Dan, T.H., Quang, L. N., Chiem, N. H., Brix, H. 2011. Treatment of high-strength wastewater in tropical constructed wetlands planted with *Sesbania sesban*: Horizontal subsurface flow versus vertical downflow. *Ecol. Eng.* 37, 711-720.
- Díaz, J.F., O'Geen, T.A., Dahlgren, A.R. 2012. Agricultural pollutant removal by constructed wetlands: Implications for water management and design. *Agricultural Water Management*, 104, 171-183.
- FAO, 2010. *El estado mundial de la pesca y la acuicultura* 2010.
- Gottschall, N., Boutin, C., Crolla, A., Kinsley, C., Champagne, P. 2007. The role of plants in the removal of nutrients at a constructed wetland treating agricultural (dairy) wastewater, Ontario, Canada. *Ecol. Eng.* 29, 154-163.
- García-Lledo, A., Vilar-Sanz, A., Trias, R., Hallin, S., Bañeras, L., 2011. Genetic potential for N₂O emissions from the sediment of a free water surface constructed wetland. *Water Research*. 45, 5621-5632.

- Gutierrez-Wing, M. T., Malone, R. F. 2006. Biological filters in aquaculture: Trends and research directions for freshwater and marine applications. *Aquacultural Engineering*, 34, 163-171.
- Hussner, A. & Lösch R. 2007. Growth and photosynthesis of *Hydrocotyle ranunculoides* L. fil. In Central Europe. *Flora*, 202, 653-660.
- Hussner, A. & Meyer, C. 2009. The influence of water level on the growth and photosynthesis of *Hydrocotyle ranunculoides* L. fil. *Flora*, 204, 755-761.
- Konnerup, D., Thuy Diem Trang, N., Brix, H. 2011. Treatment of fishpond water by recirculating horizontal and vertical flow constructed wetlands in the tropics. *Aquaculture*, 313, 57-64.
- Lianfang, Z., Wei, Z., Wei, T., 2009. Clogging processes caused by biofilm growth and organic particle accumulation in lab-scale vertical flow constructed wetlands. *Journal of Environmental Science*, 21, 750-757.
- Lin, Y.F., Jing, S.R., Wang, T.W., Lee, D.Y. 2002. Effects of macrophytes and external carbon sources on nitrate removal from groundwater constructed wetlands. *Environmental Pollution*, 119 (3), 413-420.
- Martínez-Cruz, P., Hernández-Martínez, A., Soto-Castor, R., Esquivel-Herrera, A., Rangel-Levario J., 2006. Use of constructed wetlands for the treatment of water from an experimental channel at Xochimilco, Mexico. *Hidrobiologica*, 16(3), 215.
- Mexicano, L., et al., Long-term sustainability of the hydrology and vegetation of Cienega de Santa Clara, an anthropogenic wetland created by disposal of agricultural drain water in the delta of the Colorado River, Mexico. *Ecol. Eng.* (2013), <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.12.096>.
- Naylor, S., Brisson, J., Labelle, M.A., Drizo, A., Comeau, Y., 2003. Treatment of freshwater fish farm effluent using constructed wetlands: the role of plants and substrate. *Water Sci. Technol.* 48, 215-222.
- Schulz, C., Gelbrecht, J., Rennert, B. 2003. Treatment of rainbow trout farm effluents in constructed wetland with emergent plants and subsurface horizontal water flow. *Aquaculture*. 217, 207-221.
- SEDAGRO. 2006. Cultivo de trucha. Dirección general pecuaria. Estado de México p 2.
- Sindilariu, P.D., Wolter C., Reiter, R. 2008. Constructed Wetlands as a treatment method for effluents from intensive trout farms. *Aquaculture*. 227, 179-184.

- Thuy Diem Trang, N., Konnerup D., Schierup, Hans-Henrik S., Huu Chiem, N., Anh Tuan, L., Brix, H., 2010. Kinetics of pollutant removal from domestic wastewater in a tropical horizontal subsurface flow constructed wetland system: Effects of hydraulic loading rate. *Ecol. Eng.* 36, 527-535.
- Tilley, R. D., Badrinarayanan, H., Rosati, R., Son, J. 2002. Constructed wetlands as recirculation filters in large-scale shrimp aquaculture. *Aqua. Eng.*, 26, 81-109.
- Vymazal, J. 2009. The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater. *Ecol. Eng.* 35, 1-17.
- Vymazal, J. 2007. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the Total Environment.* 380, 48-65.
- Whitney, D., Rossman, A., Hayden N. 2003. Evaluating an existing subsurface flow constructed wetland in Akumal Mexico. *Ecol. Eng.* 20, 105-111.
- Yalcuk, A., Ugurlu, A. 2009. Comparison of horizontal and vertical constructed wetland systems for landfill leachate treatment. *Bioresource Technology.* 100, 2521-2526.
- Ye, F. & Li, Y. 2009. Enhancement of nitrogen removal in towery hybrid constructed wetland to treat wastewater for small rural communities. *Ecol. Eng.* 35, 1043-1050.
- Zachritz, W.H., Hanson, A.T., Saucedo, J.A., Fitzsimmons K.M. 2008. Evaluation of submerged surface flow (SSF) constructed wetlands for recirculating tilapia production systems. *Aquacultural Engineering*, 39, 16-23.
- Zurita, F., De Anda, J., Belmont, M.A. 2009. Treatment of domestic wastewater and production of commercial flowers in vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetlands. *Ecol. Eng.* 35, 861-869.

Web References

- CONAPESCA.2011 .http://www.conapesca.sagarpa.gob.mx/wb/cona/o8_de_julio_de_2011_mexico_df
Acceded on April 11, 2013
- SAGARPA.2011 .<http://www.sagarpa.gob.mx/saladeprensa/boletines2/paginas/2011B532.aspx>
Acceded on March 1, 2013

5.3. Resultados efectos ambientales de actividades de construcción y operación del SRA “El Zarco”

5.3.1. Preparación del sitio de construcción

El apartado “Preparación del sitio de construcción” (Tabla 13) muestra que existen interacciones con los componentes ambientales siguientes:

5.3.1.1. Físicos

- A) **Atmosfera:** La principal interacción encontrada entre los componentes ambientales y las actividades humanas se refiere al ruido generado por la preparación de la zona para la construcción del estanque con tecnología SRA. Al tratarse de una zona ya alterada por el hombre de forma constante (carreteras a ambos lados así como actividades turísticas) que se evite el uso de maquinaria pesada o equipo portátil de gran poder (uso de sierras etc.) lo menos posible y de no poder evitarse se recomienda que se utilice en periodos cortos para minimizar la contaminación por ruido.
- B) **Paisaje:** Al modificarse una zona que ya se encontraba inactiva por actividades humanas existe un efecto de tipo negativo en el equilibrio que los sistemas naturales habían alcanzado. Se recomendó que cualquier actividad humana que modifique los sistemas naturales lleve como estudio previo un análisis de ecología del paisaje de manera que el proyecto interactúe de manera positiva con los sistemas naturales.

5.3.1.2. Biológicos

- A) **Vegetación:** Al realizar el desmonte de la zona para construcción existe un efecto negativo sin embargo para el proyecto “SRA El Zarco” el desmonte fue mínimo y muy localizado ya que se utilizó un antiguo estanque en desuso y se acondicionó a la tecnología SRA, por lo tanto los efectos son locales y de recuperación rápida.

5.3.1.3. Socio-económicos

- A) Las actividades correspondientes a la preparación del sitio generan interacciones positivas ya que generan empleo y activan la actividad comercial, sin embargo, al ser este proyecto de baja escala los beneficios socio-comerciales se ven limitados por la cantidad de personal contratado.

Tabla 13. Matriz del Leopold de interacciones de actividades antropogenicas con los componentes ambientales del SRA "El Zarco"

Matriz de Leopold de interacciones de actividades acuicolas de SRA "El Zarco" con los componentes ambientales														
Componentes	Factores Impactantes	Acciones Impactantes												
		Preparación del sitio de construcción	Suministro de materiales de construcción	Suministro de agua etapa construcción	Campamento de trabajadores	Construcción del estanque y filtro	Acabados y pintura estanque-filtro	Construcción humedales	Operación de humedales	Suministro de agua operación SRA	Uso tecnología alimentación (alimentador automatico)	Aguares residuales operación SRA	Comercialización de trucha	
Físico-Químicos	Atmósfera	Aire		(-1) 3			(-2) 3	(-3) 2						
		Ruido	(-2) 3	(-2) 2		(-2) 3	(-3) 3	(-2) 2	(-2) 2					
		Olor		(-1) 2		(-2) 2	(-2) 2	(-3) 2	(-2) 2					(-2) 2
	Agua	Cantidad			(-2) 2	(-2) 2	(-2) 2			(+1) 3	(-1) 2			(-1) 2
		pH				(-1) 2				(+1) 3		(-1) 2		
		Temperatura								(+1) 3				
		Oxigeno disuelto				(-2) 3				(+1) 3		(-3) 3	(-1) 2	
		Nitrogeno				(-2) 3				(+3) 1		(-3) 3	(-1) 2	
		Fosforo				(-2) 3				(-2) 3		(-3) 3	(-2) 2	
		Materia organica				(-2) 3				(+2) 2		(-3) 3	(-2) 2	
Solidos suspendidos				(-2) 3				(+2) 2		(-3) 3	(-2) 2			
Paisaje	Calidad	(-2) 2	(-1) 2	(-1) 2	(-3) 2	(-3) 3	(-2) 2	(-2) 2	(+2) 2	(-1) 2			(-1) 2	
	Calidad	(-2) 3	(-2) 3		(-2) 2			(-3) 2	(+3) 3					
Suelo	Erosion	(-2) 3	(-2) 3	(-1) 2	(-2) 2				(-2) 2					
Biologico	Flora	Arboles												
		Arbustos	(-1) 2				(-2) 2		(-2) 2					
		Estrato Herbaceo					(-1) 3							
		Plantas acuaticas			(-2) 2				(-2) 2	(+3) 3	(-1) 2	(-3) 3	(-2) 3	
	Diversidad vegetación	(-1) 2						(-2) 2	(+3) 3		(-3) 3	(-2) 2		
	Fauna	Aves				(-3) 2	(-2) 2	(-1) 6	(-2) 2	(+3) 3			(-1) 2	
		Insectos					(-2) 2	(-3) 3	(-2) 2	(+3) 3			(-1) 2	
		Especies terrestres				(-3) 2	(-2) 2	(-1) 2	(-2) 2	(+3) 3			(-1) 2	
		Peces			(-2) 2			(-1) 2	(-2) 2	(+3) 3	(-1) 2	(-1) 3	(-1) 3	
		Diversidad organismos acuaticos				(-2) 2	(-2) 2	(-1) 2	(-2) 2	(+3) 3	(-1) 2	(-1) 3	(-1) 3	
Socio-economicos	Población	Salud		(-1) 2		(-1) 2	(-1) 2	(-1) 2	(+2) 2				(-1) 2	(+3) 3
		Empleo	(+3) 1	(+3) 2			(+3) 3	(+3) 3					(+3) 3	
	Económica	Pecuario								(+3) 3	(+3) 3	(-3) 3	(-1) 2	(+3) 3
		Turismo								(+1) 2				(+3) 3
		Comercio	(+2) 2	(+2) 2		(+2) 2								(+3) 3

Rangos de valor de la magnitud de los impactos generados	
Impacto debil	1
Impacto moderado	2
Impacto alto	3
Impacto positivo	(+)
Impacto negativo	(-)

Rangos de valor de la importancia de los impactos generados	
Importancia alta	3
Importancia media	2
Importancia baja	1

5.3.2. Suministro de materiales

La sección “Suministro de materiales” (Tabla 13) muestra que existen diferentes interacciones con los siguientes componentes ambientales:

5.3.2.1. Físicos

- A) **Atmosfera:** El suministro de materiales suele generar impactos negativos en los componentes ambientales atmosféricos ya que los vehículos generan ruido, smog y olores que afectan el equilibrio ambiental de la zona de construcción, el caso del SRA “El Zarco” estos efectos son moderados y bajos ya que son locales y temporales. Como medida de mitigación es necesario solicitar a los prestadores de servicio de transporte de materiales hojas de verificación y de servicio automotriz de las unidades que se encargan de transportar dichos materiales para asegurar que los contaminantes y ruidos generados sean limitados.
- B) **Suelo:** Resulta de suma importancia evitar que las unidades que transportan material al sitio de construcción eviten circular por las zonas no pavimentadas ya que debido al peso de las unidades estas son capaces erosionar rápidamente el terreno si este no se encuentra pavimentado.

5.3.2.2. Socio-económicos

- A) El suministrar materiales impacta de manera positiva a los factores sociales de empleo y comercio. Sin embargo es importante saber si el personal de transporte de material cuenta con seguro médico y capacitación ya que muchas veces el material transportado es de gran peso pudiendo poner en riesgo la integridad de los trabajadores. Como medida de mitigación se

propuso solicitar a las empresas de transporte de materiales la documentación conveniente de seguridad social en donde se acredite la protección de los trabajadores.

5.3.3. Suministro de agua etapa construcción

La etapa “Suministro de agua etapa construcción” (Tabla 13) muestra que existen diferentes interacciones con los siguientes componentes ambientales:

5.3.3.1. Físicos

- A) Agua: El uso de agua usualmente genera impactos negativos ya que esta suele tomarse de tributarios naturales. Por lo tanto como medida de mitigación regular se suele solicitar que el agua sea suministrada por pipas; en el caso del proyecto “El Zarco” al tener abundancia de este recurso resulta tanto ambiental como económicamente menos dañino tomar este recurso del sitio mismo sugiriendo que el uso de esta sea sólo el necesario para llevar a cabo las actividades de construcción de esta forma se evita la degradación del ambiente de la zona.

5.3.3.2. Biológicos

- A) Diversidad organismos acuáticos: Es importante seleccionar la mejor zona para la toma de agua utilizada en la etapa de construcción ya que si esto se hace sin considerar a los organismos acuáticos se puede afectar su salud o provocar la migración de los mismos causando una disminución en la diversidad de la zona. Dado que la calidad de los parámetros físico-químicos del agua no es una prioridad en la construcción se recomendó

tomar el agua de la salida (desagüe) de alguno de los estanques cercanos al proyecto el “El Zarco” evitando tomar el agua de los manantiales cercanos de la zona.

5.3.4. Campamento de trabajadores

La sección Campamento de trabajadores (Tabla 13) mostro las siguientes interacciones con los factores ambientales

5.3.4.1. Físicos

- A) Atmosfera: El campamento de trabajadores del proyecto “El Zarco” sólo era ocupado en horas hábiles sin embargo el tener trabajadores en la zona genera ruido que puede alejar a las poblaciones de organismos que habitan la zona. Se recomendó considerar que el campamento debe ubicarse en áreas en donde el efecto sonoro sobre las diferentes poblaciones animales sea mínimo.
- B) Agua: El agua es un componente físico muy susceptible de sufrir impactos negativos cuando un asentamiento humano es colocado en las cercanías. Se recomendó que el campamento este equipado con baños portátiles ya que los más cercanos se encontraban a una distancia considerable promoviendo que los empleados realicen sus actividades fisiológicas en la zona provocando la degradación del medio cercano. Sin embargo estos efectos se consideran locales y temporales.
- C) Suelo: Los efectos de erosión en el suelo son los más evidentes aunque la cantidad de trabajadores fue baja en la etapa de construcción, sin embargo la delimitación de caminos resulta recomendable para evitar modificar las condiciones físicas en aquellos suelos en donde no sea necesario.

5.3.4.2. Biológicos

A) Fauna: La fauna de la región fue afectada ya que al tener humanos durante gran parte del día así como los ruidos inherentes a la construcción genera que estos migren de la zona disminuyendo la diversidad de la región. Sin embargo, el tiempo de ejecución de la obra fue corto siendo esta una medida de mitigación apropiada ya que una vez que los trabajadores se retiraron la tendencia natural mostrada fue la recolonización.

5.3.4.3. Socio-económicos

A) Comercio: La presencia de trabajadores incrementa el comercio local siendo benéfico para la población de la región.

5.3.5. Construcción del estanque y filtro

La sección Construcción del estanque y filtro (Tabla 13) mostro las siguientes interacciones con los factores ambientales

5.3.5.1. Físicos

- A) Atmosfera: Al igual que en la preparación del sitio el ruido y polvo generados por las actividades de construcción son los factores que más afectan los componentes atmosféricos. Como medida de mitigación se sugirió que el uso de maquinaria y equipo de gran actividad sonora se utilice solo necesario y evitar el uso continuo del mismo permitiendo momentos de reposo.
- B) Paisaje: El paisaje se vio modificado por las actividades de construcción a pesar de que sus efectos fueron locales se recomendó el uso de buenas

prácticas de construcción como lo son la separación de residuos de construcción (ejemplo: concreto, acero etc.) para que su recolección fuera rápida y se restableciera el equilibrio de la región en cuanto acaben los trabajos de construcción.

5.3.5.2. Biológicos

- A) Flora: La flora ubicada en la zona de construcción fue afectada, dicho impacto fue local y de rápida recuperación por lo que se recomendó incentivar actividades en la zona (siembra de vegetación adecuada, etc.) que mejore las condiciones de la región y limiten la erosión generados por el desmonte de la zona.
- B) Fauna: La fauna de la región resulto afectada a causa del ruido y actividades humanas; el proyecto “El Zarco” al ser una construcción local afecto de manera local a la fauna, así mismo el tiempo de ejecución fue rápido por lo que su impacto en la región resulto limitado.

5.3.5.3. Socio-económico

- A) Empleo: La generación de empleo por la construcción del estanque y el filtro promovió el desarrollo de empleos aun cuando fue un proyecto pequeño siempre resulta positivo la generación de empleos.

5.3.6. Acabados y pintura de estanque y filtro

La sección Acabados y pintura de estanque y filtro (Tabla 13) mostro las siguientes interacciones con los factores ambientales:

5.3.6.1. Físicos

- A) Atmosfera: El uso de pinturas y solventes para los acabados del estanque siempre generar olores que modifican el equilibrio atmosférico; en el caso del proyecto “El Zarco” el uso de pinturas fue en una superficie mínima por lo que los efectos son considerados locales. Como medida de mitigación se recomendó el uso de pinturas libres de CFC u otros compuestos químicos que afecten de manera significativa los componentes atmosféricos.
- B) Paisaje: El color que debe utilizarse se deja a criterio del constructor, sin embargo, siempre es recomendable que dicho color este en equilibrio con los colores imperantes en la región

5.3.6.2. Fauna

- A) Insectos: En el caso de los insectos se tuvo una interacción muy negativa debido a que el color seleccionado para el proyecto tiene la capacidad de atraer insectos al proyecto. Como medida de mitigación se recomendó cambiar el color del proyecto a uno de tonalidad verde para evitar la atracción de insectos que en muchos casos son polinizadores.
- B) Fauna en general: Al realizar los acabados la fauna local suele ser afectada ya que los olores ahuyentan la fauna de la región sin embargo, este efecto solo es temporal y muy localizado en este proyecto.

5.3.7. Construcción de Humedales

La sección Construcción de Humedales (Tabla 13) mostro las siguientes interacciones con los factores ambientales

5.3.7.1. Físicos

- A) Ruido: En la construcción de los humedales fue inevitable la generación de ruido sin embargo al hacerse el trabajo de manera manual la cantidad de ruido fue local y de baja intensidad por lo que no se recomendó medida de mitigación alguna
- B) Agua: Los humedales al construirse al lado de un flujo de agua natural pudieron afectar las características físicas del agua (Sólidos suspendidos y material orgánica) se recomendó en lo futuro generar una distancia razonable entre los humedales y los tributarios de agua de la región.

5.3.7.2. Biológicos

- A) Flora: La vegetación acuática ubicada en la zona de construcción de los humedales se vio afectada debido a la misma construcción pero los efectos fueron locales y temporales.
- B) Fauna: Como en las demás etapas de construcción del proyecto “El Zarco” la etapa de construcción provoca la migración de especies de la zona, pero debido a que el tiempo de ejecución de los humedales fue corta el efecto sobre la fauna fue mínimo y focalizado a una zona específica.

5.3.8. Operación de humedales

La sección Operación de humedales (Tabla 13) mostro las siguientes interacciones con los factores ambientales

5.3.8.1. Físicos

- A) Agua: La construcción de los humedales en si son una medida de mitigación estos generan efectos positivos cuando están operando en la calidad de agua ya que disminuyen las concentraciones de contaminantes de las descargas de aguas residuales provenientes del SRA.
- B) Paisaje: los humedales mejoran la calidad ambiente de la región evitando que las aguas residuales afecten de manera importante la estética del paisaje por olores o colores provenientes de las aguas residuales.

5.3.8.2. Biológicos

- A) Flora: Los humedales fueron sembrados con vegetación de la región por lo tanto la diversidad de plantas se mantiene y al mismo tiempo se evita la invasión de vegetación ajena a la región si estos hubieran sido sembrados con especies diferentes.
- B) Fauna: La fauna local era atraída a los humedales de constante lo que permitió recobrar la diversidad de la zona después de las etapas de construcción del proyecto

5.3.8.3. Socio-económicos

- A) Pecuario: El uso de humedales permite que el agua después de usarse en la producción del SRA esta regrese a sistemas naturales y al mismo tiempo pueda usarse por subsecuentes unidades de producción trutícola corriente abajo.

5.3.9. Suministro de agua operación de SRA

Los sistemas del tipo SRA son una medida de mitigación en la producción acuícola ya que el consumo de agua se reduce en algunos casos hasta en un 90% lo cual es sumamente positivo y aunque si existe un consumo de agua los efectos son locales y de poca duración. La recomendación fue la de aumentar el uso de la tecnología de recirculación en los cultivos de trucha u cualquier otro tipo de cultivo acuícola.

5.3.10. Uso tecnología de alimentación (alimentador automático)

La sección Uso tecnología de alimentación (Tabla 13) mostro las siguientes interacciones con los factores ambientales

5.3.10.1. Físicos

A) Agua: El uso de alimentadores automáticos afectaron de manera muy negativa las concentraciones de nutrientes en el agua residual procedente del estanque aumentando las concentraciones de las mismas de manera excesiva. La medida de mitigación recomendada fue de evitar la dependencia de este tipo de tecnología y solo utilizarla cuando fuera necesaria.

5.3.10.2. Biológicos

A) Flora: Al aumentar las concentraciones de nutrientes también se disminuye la capacidad de los humedales para remover estos nutrientes por lo que el riesgo de causar blooms de algas en los cuerpos de agua cercano se incrementa de manera considerable. Se recomendó la misma medida de mitigación que el punto anterior (físicos).

- B) Fauna: Al incrementarse las concentraciones de nutrientes en el agua los organismos acuáticos pueden sufrir estrés debido a estos cambios provocando la migración de los mismos y en casos extremos su muerte. Se recomendó la misma medida de mitigación que el punto anterior (físicos).

5.3.11. Aguas residuales operación SRA

La sección Aguas residuales operación SRA (Tabla 13) mostro las siguientes interacciones con los factores ambientales

5.3.11.1. Físicos

- A) Atmosfera: El olor procedente de las aguas residuales suele ser fuerte debido a la acumulación de materia orgánica en las mismas; sin embargo, el volumen de este tipo de agua es bajo y al ser vertida en los humedales el olor se disminuye de manera importante.
- B) Agua: Usualmente en la etapa de operación las aguas residuales suelen dañar de forma muy negativa a las aguas de sistemas naturales cercanos a las actividades acuícolas, sin embargo, para el proyecto “El Zarco” el uso de humedales para tratar estas aguas ayudaron a que las descargas del SRA fueran hasta en un 30% - 50% menor que si el sistema descargara estas aguas sin tratamiento alguno. Como medida de mitigación se recomendo que siempre que se construya un SRA se deba incluir un sistema de tratamiento de aguas residuales

5.3.11.2. Biológicos

- A) Flora y fauna: Los factores biológicos se vieron afectados debido al cambio en las concentraciones de los parámetros químicos y físicos del agua sin

embargo este efecto es considerado local y temporal. La medida de mitigación será la de medir regularmente las concentraciones de nutrientes en los tributarios cercanos para evitar aumentos de estos o momentos de contingencia.

5.3.11.3. Socio-económicos

- A) Salud: El personal encargado del control de las purgas debe utilizar equipo de seguridad (guantes y cubre bocas) ya que la acumulación de residuos orgánicos en el agua residual es una zona de potencial cultivo de organismos patógenos que puede afectar la salud del personal de manera negativa.

5.3.12. Comercialización de trucha

5.3.12.1. Socio-económicos

- A) Población: Existe una interacción positiva en la comercialización de la trucha ya que al ser un producto de alta calidad este beneficia la salud de aquellas poblaciones que lo consumen. Se recomendó aumentar la tasa de consumo de este producto en el territorio nacional.
- B) Económico: Finalmente el objetivo de la producción de trucha es para generar ganancias. Por lo tanto como medida de mitigación de riesgos en el cultivo de trucha se recomendó capacitación de personal y buenas prácticas de producción.

CAPITULO VI

DISCUSIÓN GENERAL

6. DISCUSIÓN GENERAL

La acuicultura es una actividad que a corto y mediano plazo presentará un crecimiento considerable por lo tanto las buenas prácticas en esta producción son extremadamente importantes; así como el desarrollo de tecnologías ambientalmente amigables. No obstante del crecimiento constante, esta actividad es sometida a presiones de un marco regulatorio ambiental, laboral y de uso de agua (Jacob & Culver, 2010).

La maduración de los humedales como tecnología de tratamiento de aguas residuales es de suma importancia ya que si este método no alcanza la mayor capacidad de tratamiento la actividad acuícola afectará de manera directa los cuerpos de agua de la zona o de la región. Colt (2006) comenta que la maduración de este tipo de biofiltros es una de sus mayores limitantes pero si además no se cuenta con un método adecuado para identificar el momento de maduración de estos sistemas las limitaciones son aún mayores, en este caso el uso de balance de masas para observar y luego identificar el momento de maduración de los humedales fue una herramienta confiable con datos estables que permitió definir cuando estos sistemas se encontraban listos para comenzar a tratar aguas residuales.

Por otro lado se observó que la maduración de estos sistemas no dependió del tipo de vegetación que se utilizó en los humedales de este proyecto. Ahora bien, se sabe que la maduración de estos biofiltros depende de tres factores: el tipo de sustrato, las plantas y la comunidad de bacterias (Samsó y García, 2013). Por lo tanto debido a que los humedales contaban con el mismo tipo y tamaño de sustrato pero diferente vegetación es posible definir que la vegetación a pesar de ser distinta poseía características que le permitió a la comunidad bacteriana crecer de manera similar en los tres humedales y alcanzar la maduración en tiempos similares.

Los humedales Cw1 y Cw4 fueron los humedales con los desempeños más bajos en la remoción de especies nitrogenadas mientras tanto los desempeños más

favorables se encontraron en los humedales Cw2 y Cw3 dichos sistemas contaban con una planta en común: *Hydrocotyle ranunculoides*.

Sin embargo el humedal con combinación de plantas (*Echinochloa crus-galli* e *Hydrocotyle ranunculoides*) fue el que presentó un mejor desempeño en clima frío esto se asocia a que la combinación de vegetación disminuye los efectos de aquellas características que en lo individual limitan la capacidad de tratamiento de las mismas ya que la planta *Hydrocotyle ranunculoides* tiene una alta capacidad de propagación y crece ocupando todo el espacio posible (Hussner & Lösch, 2007) limitando el intercambio gaseoso con el agua pudiendo generar anoxia en la misma y disminuir los procesos de nitrificación en los humedales, sin embargo la combinación de vegetación genero espacios entre las plantas permitiendo un mejor intercambio de gases entre la atmosfera y el agua pudiendo incrementar los procesos nitrificantes.

La alcalinidad por otro lado jugó un papel de importancia ya que las bajas concentraciones de compuestos carbonatados (CaCO_2) en el agua proveniente del estanque afectan de manera negativa la remoción de compuestos nitrogenados debido a que la baja alcalinidad disminuye la eficiencia de nitrificación hasta en un 40% (Coyne, 2000); por lo tanto, la baja eficiencia de los humedales en la remoción de compuestos nitrogenados fue influenciado en gran medida por los niveles de alcalinidad en el agua.

Se considera que el diseño y tipo de vegetación de los humedales para operar en clima fríos es esencial, fue posible observar que el tiempo de retención de agua calculado para humedales que operan en climas menos fríos no puede ser el mismo al de humedales en climas templados (Gottschall *et al.*, 2007; Akratos & Tsihrintzis, 2007) ya que la nitrificación por parte de las bacterias disminuye considerablemente en este tipo de condiciones climáticas por lo que un mayor tiempo de retención garantizará una mayor nitrificación y por lo tanto una mejor remoción de contaminantes del agua.

Finalmente al evaluar ambientalmente las etapas de construcción y operación del Sistema de Recirculación Acuícola fue posible identificar al menos un área de efectos significativos negativos, sin embargo, esta estuvo íntimamente ligada con el uso de un alimentador automático el cual vertía alimento al estanque aunque algunas veces los organismos no consumían en su totalidad provocando que este se precipitara en el fondo y comenzara su descomposición lo que a su vez aumento la concentración de contaminantes en el agua residual, por otro lado la corrección de este tipo de efectos es tan simple como dejar de usar alimentadores automáticos en los cultivos insertos en un sistema de recirculación.

Yokoyama (2003) comenta que un ambiente saludable se identifica por la existencia de macrofauna durante el todo el año mientras que un ambiente en estado crítico se reconoce por la falta de este tipo de fauna durante medio año o más; en el SRA “El Zarco” al contar con medidas de mitigación para el tratamiento de aguas residuales disminuyo sus efectos sobre el medio de manera importante por lo que su contribución de daños a los sistemas naturales es bajo, ya que las concentraciones de los contaminantes (a excepción de SST) no excedieron las concentraciones propuestas por la Chen *et al.* (1993) para las aguas residuales de origen acuícola, sin embargo, no fue igual con las concentraciones propuestas por la NOM-089-ECOL-1994 pero realizado las mejoras al sistema de tratamiento de aguas residuales (humedales) y el desuso del alimentador automático es posible cumplir con las concentraciones propuestas por la norma.

CAPITULO VII

CONCLUSIONES

7. CONCLUSION GENERAL

En la determinación del tiempo de maduración de los humedales es posible concluir que el tipo de vegetación no modificó, en las unidades experimentales, el tiempo en que estas alcanzaron la madurez como ecosistemas además de que el método de balance de masas resultó ser una técnica confiable en la determinación de la maduración de estos sistemas.

La combinación de las plantas *Echinochloa crus-galli* e *Hydrocotyle ranunculoides* en un mismo humedal resultó ser el método de tratamiento de aguas residuales acuícolas más efectivo de entre los cuatro sistemas propuestos debido a que la combinación de plantas disminuyó aquellas características que limitaban el desempeño de cada planta para remover residuos.

Los humedales artificiales mostraron una gran capacidad de adaptación a climas fríos, sin embargo, es importante decir que este éxito depende en gran medida del diseño de los mismos concluyendo que a menor temperatura el diseño debe contemplar un mayor tiempo de retención así como la selección de vegetación adecuada a plantarse en los mismos.

Al evaluar las dos plantas utilizadas en esta investigación es posible concluir que la planta *Hydrocotyle ranunculoides* mostro un mejor desempeño removiendo los contaminantes del agua residual en comparación con la planta *Echinochloa crus-galli* la cual fue incapaz de disminuir las concentraciones de los contaminantes después de tratamiento.

Ambientalmente los humedales contribuyen de manera positiva la relación que el Sistema de Recirculación guarda con el ambiente cercano haciendo de esta tecnología un método sustentable (social, económico y ambiental).

CAPITULO VIII

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

8. REFERENCIAS

- Apha, 1999. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater
- Aratos C. S. and Tsihrintzis V. A. 2007. Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecol. Eng.* 29, 173-191.
- Black K., 2000. Environmental Impacts of Aquaculture. Sheffield Academic press (pp 1).
- Burrige L., Weis J.S., Cabello F., Pizarro J., Bostick K. 2010. Chemical use in salmon aquaculture: A review of current practices and possible environmental effects. *Aquaculture* (306) 7-23.
- Boyd C.E. 1990. *Water Quality in Ponds for Aquaculture*. Birmingham Publish Co.
- Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud, 1994. Nitratos, Nitritos y Compuestos de N-Nitroso. Edit. Organización Panamericana de la Salud.
- Chen S., Coffin D.E., Malone R.F., 1993. Production, characteristics and modeling of aquaculture sludge from a recirculating aquaculture system using a granular media biofilter. J.K Wang ed, *Techniques of modern aquaculture*. St. Joseph MI, American Society of Agricultural Engineers, 16-25.
- CICEANA (Centro de Información y Comunicación Ambiental de Norte América) 2011. Saber más Ciclo del Nitrógeno. Disponible en: <http://www.ciceana.org.mx/recursos/ciclo%20del%20nitrogeno.pdf> (Accesado el 28 de Noviembre del 2011).
- Coyne, M., 2000. *Soil Microbiology: An exploratory perspective*. Edit. Paraninfo. Chapter 19.
- Colt, J., 2006. Water quality requirements for reuse systems. *Aquac. Eng.* 34, 143–156
- CONAPESCA. 2011. Anuario Estadístico de Acuicultura y Pesca 2009. DR Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca. México
- CONAPESCA 2011. Crece producción y consumo de trucha en el país. Disponible en: http://www.conapesca.sagarpa.gob.mx/wb/cona/08_de_julio_de_2011_mexico_df (Accesado el 4 de Marzo del 2013).

- Díaz, J.F., O'Geen, T.A., Dahlgren, A.R. 2012. Agricultural pollutant removal by constructed wetlands: Implications for water management and design. *Agricultural Water Management*, 104, 171-183.
- FAO 2012. *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2012*.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) 2003. *Acuicultura: Principales conceptos y definiciones*. Disponible en: <http://www.fao.org/spanish/newsroom/focus/2003/aquaculture-defs.htm> (Accesado el 8 de Noviembre del 2011).
- FAO 1988. *Perfiles de la alimentación de peces y crustáceos en los centros y unidades de producción acuícola en México*. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/field/003/AB460S/AB460S00.htm> (Accesado el 26 de Julio del 2013)
- Gottschall, N., Boutin, C., Crolla, A., Kinsley, C., Champagne, P. 2007. The role of plants in the removal of nutrients at a constructed wetland treating agricultural (dairy) wastewater, Ontario, Canada. *Ecol. Eng.* 29, 154-163.
- Hussner, A. & Lösch R. 2007. Growth and photosynthesis of *Hydrocotyle ranunculoides* L. fil. In Central Europe. *Flora*, 202, 653-660.
- Jacob, A. P. & Culver, D. A., 2010. Experimental evaluation of the impacts of reduced inorganic phosphorus fertilization rates on juvenile saugeye production. *Aquaculture*, 304, 22-33.
- Konnerup D., Thuy Diem Trang N., Brix H. 2011. Treatment of fishpond water by recirculating horizontal and vertical flow constructed wetlands in the tropics. *Aquaculture* (313) 57-64.
- Leopold, Bergere L., Clarke F. E., Hanshaw B. B., Balsley J. R. 1971. A procedure for evaluating environmental impact. U.S. Dept. of the Interior.
- Lessard R., Ginac L.D., Rochette P. 2008. *El ciclo del carbono: Midiendo el flujo del CO₂ del suelo*. Alberta University, Edmonton.
- Lin C.K., Yi Y. 2003. Minimizing environmental impacts of freshwater aquaculture and reuse of ponds effluents and mud. *Aquaculture* (226) 57-68.
- Lin Y.F., Jing S.R., Lee D.Y., Wang T.W. 2002. Nutrient removal from aquaculture wastewater using constructed wetlands system. *Aquaculture* (209) 169-184.

- Lymbery A. J., Doupé R. G., Benneth T., Starcevich M.R. 2006. Efficacy of a subsurface- flow wetland using the estuarine sedge *Juncus kraussii* to treat effluent from inland saline aquaculture. *Aquacultural Engineering* 1-7.
- MacMillan J. R., Huddleston T., Woolley M. y Fothergill K. (2003). Best management practice development to minimize environmental impact from large flow-through trout farms. *Aquaculture* (226) 91-99.
- Mazón M.J., Piedecausa M.A., Hernández M.D. García-García B. 2007. Evaluation of environmental nitrogen and phosphorus contributions as a result of intensive on-growing of common octopus (*Octopus vulgaris*). *Aquaculture* (266) 226-235.
- Michael J. H., 2003. Nutrients in Salmon Hatchery wastewater and its removal through the use of a wetland constructed to treat off-line settling pond effluent. *Aquaculture* (226) 213-225.
- Metas y Metrologos Asociados (2010) Medición de la turbidez en la calidad del agua. Disponible en: www.metas.com.mx/guiametas/La-Guia-MetAs-10-01-Turbidez.pdf (Accesado el 9 de Noviembre de 2011).
- Núñez López R. A., Vong Y. M., Ortega Borges R., Olgún E. 2004. Fitorremediación: Fundamentos y aplicaciones. *Fitorremediación* 69-82.
- Picone L.I., Zamuner E., 2002. Fosforo orgánico y fertilidad fosfórica. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* (16) 11-15.
- Piedrahita Raul H. 2003. Reducing the potential environmental impact of tank aquaculture effluents through intensification and recirculation. *Aquaculture* (226) 35-44.
- Rabassó-Krohnert, M., 2006. Los impactos ambientales de la acuicultura, causas y efectos. *Vector plus: miscelánea científico* (28) 90-98
- RAMSAR (The Ramsar Convention on Wetlands) 1996. Definición de humedales y sistema de clasificación de tipos de humedales de la convención RAMSAR. Disponible en: http://www.ramsar.org/cda/es/ramsar-about-sites-classification-system/main/ramsar/1-36-55%5E21235_4000_2 (Accesado el 8 de Noviembre de 2011).
- Samsó, R. & García J., 2013. Bacteria distribution and dynamic in constructed wetlands based on modelling results. *Science of the Total Environment*, (461-462), 430-440.

- SAGARPA 2011. Logra SAGARPA incrementar disponibilidad de agua y producción de trucha y carpa. Disponible en: <http://www.sagarpa.gob.mx/saladeprensa/boletines2/paginas/2011B532.aspx> (Accesado el 04 de Marzo de 2013).
- SEMARNAT 2011. Definición y objetivo de la Evaluación de Impacto Ambiental. Disponible en <http://www.semarnat.gob.mx/temas/gestionambiental/impactoambiental/Paginas/evaluacion.aspx> (Accesado el 04 de Marzo del 2013).
- Shnel, N., Barak, Y., Ezer., T., Dafni, Z., Van Rijn, J., 2002. Design and performance of a zero-discharge tilapia recirculating system. *Aquaculture Engineering*. 26, 191-203.
- Sonnenholzner S., 2004. Determinación de tasas de nitrificación en Biofiltros. Disponible en <http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/8444/1/bquinc112.pdf> (Accesado el 25 de Marzo del 2013).
- Sibatani A., 1996. Why do Salmon ascend rivers? *Selected papers on Entropy Studies* 3, 3-11.
- Schulz C., Gelbrecht J., Rennert B. 2003. Treatment of rainbow trout farm effluents in constructed wetland with emergent plants and subsurface horizontal water flow. *Aquaculture* (217) 207-221.
- Sindilariu P.D., Wolter C., Reiter R. 2008. Constructed Wetlands as a treatment method for effluents from intensive trout farms. *Aquaculture* (227) 179-184.
- Stickney R.R. 2000. *Encyclopedia of Aquaculture*. John Wiley & Sons, Inc. United States of America.
- Timmons M.B. y Ebeling J.M. (2010). *Recirculating Aquaculture*. 2nd ed. Cayuga Aqua Ventures New York, U.S.A.
- Vymazal J. 2009. The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater. *Ecological Engineering* (35) 1-17.
- Ying-Feng L., Shuh-Ren J., Der-Yuan L., Tze-Wen W. 2002. Nutrient removal from aquaculture wastewater using constructed wetlands system. *Aquaculture* (209) 169-184.
- Yokoyama H. 2003. Environmental quality criteria for fish farms in Japan. *Aquaculture* (226) 45-56.

- Zachritz W.H., Hanson A.T., Sauce J.A., Fitzsimmons K. M. 2008. Evaluation of submerged surface flow (SSF) constructed wetlands for recirculating tilapia production systems.
- Zagal E., Rodriguez I., Hofmann V., Hofmann G. 2003. Eficiencia del uso y dinámica del nitrógeno en la rotación con y sin uso de residuos. Agricultura técnica (63) 298-310.
- Zurita F., De Anda J., Belmont M.A. 2009. Treatment of domestic wastewater and production of commercial flowers in vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetlands. Ecological Engineering (35) 861-869.

CAPITULO IX

ANEXOS

Tabla 12. Datos originales de muestreo

Temperatura °C durante periodo de muestreo

Purga	Humedal 1	Humedal 2	Humedal 3	Humedal 4
11.9	11.8	11.9	11.9	11.9
6.8	9.8	10.2	10.6	8.9
9.2	11.05	11.2	11.6	14.1
11.6	12.3	12.2	12.7	19.4
10.5	10.9	10.9	11.8	10.2
11.1	11.2	11.2	11.4	11.5
8.9	11.3	11.1	10.9	10.4
10.2	11.3	11.25	11.05	10.7
11.5	11.3	11.4	11.2	11
11.2	10.75	10.75	10.7	10.3
10.9	10.6	11.1	10.1	11
10.9	10.4	10.6	10.1	10.3
10.9	10.2	10.1	10.2	9.6
10.6	10.5	11.5	9.5	11.7
9.8	10.9	11.2	10.15	11.65
9.4	11.1	11.05	10.4	11.6
9	11.3	10.9	10.8	11.6
8.8	9.7	9.7	9.4	8.8
8.6	8.2	8.5	8.1	6
9.1	8.9	9.3	9.4	7.1
9.4	9.2	9.7	10.1	7.7
9.7	9.6	10.1	10.8	8.3
9.7	10.05	10.3	10.6	9.05
9.7	10.2	10.4	10.5	9.4
9.7	10.3	10.4	10.5	9.6
9.7	10.4	10.4	10.5	9.7
9.8	10.5	10.5	10.5	9.8
10	10.6	10.5	10.4	10.1
9.1	8.9	9.3	9	9
9.1	9.1	9.3	8.8	7.85
9.1	9.3	9.3	8.6	6.7
10.2	9.7	9.8	9.3	8.1
10.8	9.9	10.1	9.7	8.8
11.4	10.2	10.4	10.1	9.6
10.1	9.4	10.1	10.1	10
9.8	9.8	9.8	9.8	9.6

9.6	9.6	9.3	9.7	9.05
9.5	9.5	8.9	9.7	8.5
8.6	8.2	8.1	8.6	8.9
7.1	7.2	8.4	7.3	6.8
7.7	7.3	9.1	7.7	7
8.3	8.6	7.9	8.3	7.4
8.2	8.3	8.3	8.3	5.2
8.2	13.9	12.1	11.8	12
9.4	9	7.3	7.8	1.6
7.2	7.2	6.4	6.8	6.5
8.8	8.2	7.8	8.1	8.3
10.5	9.2	9.3	9.4	10.1
10.1	9.5	9.5	9.7	9.3
9.7	9.8	9.8	10.1	8.6
9.3	10.2	10.3	9.3	8.9
9.7	9.9	10.2	9.9	8.9
10.1	9.6	10.2	10.6	8.9
10.8	10.8	10.6	11.2	11.4
9.7	9.6	10.5	10.3	10.3
10.7	10.8	10.8	10.9	11.8
9.7	9.8	9.8	10.1	8.6
9.6	9.9	9.9	9.9	8.6
9.5	10	10.05	9.7	8.7
9.4	10.1	10.1	9.5	8.8
9.3	10.1	10.2	9.4	8.8
9.3	10.2	10.3	9.3	8.9
9.7	9.9	10.2	9.95	8.9
10.1	9.6	10.2	10.6	8.9
10.8	10.8	10.6	11.2	11.4
13.2	13	12.3	12.3	16.2
11.1	11.3	11.4	11.3	13.2
10.1	10.4	10.9	10.8	11.7
9.1	9.6	10.5	10.3	10.3
13.3	9.5	10.1	10.2	10.4
9.7	9.6	10.5	10.3	10.3
10.4	10.5	11.1	10.8	11.1
11.2	11.4	11.7	11.3	11.9
11.2	11.2	11.5	11.2	11.3
11.2	11.1	11.4	11.1	11.0
11.3	11.1	11.4	11.1	10.8
10.7	10.8	10.8	10.9	11.8

10.6	11.5	13	12	13.7
10.8	12.2	11.3	10.9	11.2
10.7	12.4	11.6	10.6	11.5
10.6	12.5	11.7	10.5	11.6
10.6	12.5	11.8	10.4	11.7
10.6	12.5	11.8	10.4	11.7
10.6	12.6	11.9	10.4	11.8
10.7	12.2	13	10.9	14.7
10.9	11.8	14.1	11.4	17.6
10.9	10.8	10.8	10.9	10.6
11.1	10.8	10.8	10.9	10.6
11.2	10.8	10.8	10.9	10.6

Oxígeno disuelto (mgL^{-1}) durante periodo de muestreo

Purga	Humedal 1	Humedal 2	Humedal 3	Humedal 4
7.6	5.4	7.05	5.6	5.6
2.16	0.26	0.18	0.15	3.74
4.175	2.2	1.095	2.26	5.4
6.19	4.14	2.01	4.37	7.06
6.06	4.42	3.29	3.66	2.02
6.53	4.49	6.19	0.24	5.03
2.99	0.78	6.4	1.43	3.55
3.07	0.48	5.8	0.95	2.875
3.15	0.18	5.2	0.47	2.2
2.495	1.77	4.69	3.34	2.935
2.17	2.57	4.44	4.78	3.30
2.00	2.96	4.31	5.49	3.49
1.84	3.36	4.18	6.21	3.67
5.15	6.44	3.99	4.35	2.25
5.2	4.2	3.2	4.8	3.5
5.15	3.05	2.86	5.05	4.11
5.15	1.92	2.48	5.28	4.73
3.08	2.155	3.72	4.875	3.1
1.01	2.39	4.96	4.47	1.47
2.7	1.4	5.3	4.4	2.1
3.5	0.9	5.5	4.4	2.4
4.33	0.41	5.72	4.34	2.67
4.37	3.06	5.58	5.34	3.69
4.38	4.38	5.51	5.83	4.19
4.39	5.04	5.48	6.08	4.45
4.40	5.37	5.46	6.21	4.57
4.40	5.53	5.45	6.27	4.64
4.40	5.62	5.44	6.30	4.67
4.4	5.7	5.44	6.33	4.7
5.1	6.065	5.88	4.565	2.85
5.8	6.43	6.32	2.8	1
5.6	3.3	5.4	2.5	1.4
5.6	1.7	4.9	2.4	1.6
5.48	0.18	4.41	2.24	1.75
5.51	1.01	4.5	2.56	2.01
5.75	5.42	5.63	5.47	2.1
4.92	4.67	2.88	4.50	2.29
4.09	3.92	0.12	3.53	2.47

5.94	5.02	2.68	1.27	2.29
5.37	5.71	5.59	4.37	4.15
5.63	3.035	5.255	3.415	3.14
5.89	0.36	4.92	2.46	2.13
5.265	0.88	4.4	1.375	2.18
4.64	1.4	3.88	0.29	2.23
6.24	3.73	6.09	5.9	0.57
	6.23	0.7	4.54	2.75
1.7	3.3	0.5	2.6	2.1
1.7	1.9	0.3	1.6	1.7
1.7	0.4	0.2	0.6	1.4
5.8	6.9	4.2	3.3	0.6
6.85	3.85	2.5	1.9	1.35
7.9	0.8	0.8	0.5	2.1
5	2.2	1	1.05	1.6
2.1	3.6	1.2	1.6	1.1
3.6	2.4	1.35	1.1	0.7
5.1	1.2	1.5	0.6	0.3
3.15	0.7	1.65	0.5	1.4
1.2	0.2	1.8	0.4	2.5
7	0.7	1.4	0.2	0.1
0.1	0.3	2.2	1.4	4.1
0.07	0.25	1.3	1.6	3.9
0.1	0.2	0.9	1.7	3.8
0.0	0.2	0.4	1.8	3.7
0.1	0.3	0.5	1.9	3.8
0.0	0.2	0.4		3.7
0.6	2.4	0.6	1.7	2.7
1.1	4.6	0.7	1.7	1.6
0.6	2.4	0.7	1.6	1.9
0.4	1.3	0.6	1.5	2.0
0.1	0.2	0.6	1.4	2.1
0.3		0.9	5.4	3.8
0.5	0.3	2.3	3.3	4.6
0.8	0.2	0.4	2.6	2.3
0.3	0.3	0.5	2.7	2.4
1.1	0.3	0.5	2.7	2.4
0.9	0.3	0.5	2.7	2.4
1.2	0.3	0.5	2.7	2.4
0.5	0.3	0.5	2.7	2.4
0.6	3.1	0.3	2.7	1.6

pH durante periodo de muestreo

Purga	Humedal 1	Humedal 2	Humedal 3	Humedal 4
6.1	5.3	5.3	5.3	5.2
3.6	2.3	4.3	3.5	2.3
5.3	4.15	5.15	4.75	4.4
7	6	6	6	6.5
6	5	5	6	6
6	5.5	5.5	5.5	6
6.5	5.5	5.5	5.5	5.5
5.50	4.83	5.50	5.50	5.50
5	4.5	5.5	5.5	5.5
5	4.75	5.5	5.25	5.25
5.0	4.9	5.5	5.1	5.1
5.0	4.9	5.5	5.1	5.1
5	5	5.5	5	5
6	6	6	6	6
6.5	6.5	6.5	6.5	6.5
6.8	8.1	6.6	8.1	7.4
6.9	7.7	6.7	7.7	7.2
6.9	7.5	6.8	7.5	7.1
7.0	7.0	6.9	6.9	6.8
7.5	7.3	7.4	6.9	7.5
7.5	7.2	7.3	7.0	7.3
7.4	7.1	7.1	7.0	7.0
7.1	7.0	7.0	7.0	6.7
6.7	7.0	7.0	7.0	6.4
7.1	7.1	7.2	6.9	7.1
7.4	7.3	7.5	6.9	7.9
7.4	7.2	7.1	6.9	7.2
7.3	7.1	6.8	6.9	6.5
7.1	7.0	7.0	6.6	6.5
7.4	7.4	7.4	6.7	6.7
7.3	7.2	7.0	7.0	6.5
7.2	7.2	6.9	7.1	6.4
7.18	7.13	6.73	7.26	6.33
7.41	7.14	6.74	7.28	6.34
7.18	7.13	6.73	7.26	6.33
7.1	7.1	6.9	7.3	6.6

6.97	6.99	7.06	7.37	6.85
7.1	7.1	7.2	7.3	6.7
7.2	7.1	7.2	7.3	6.7
7.21	7.16	7.24	7.32	6.61
6.84	6.83	7.33	6.84	6.84
7.48	7.37	7.5	7.85	7.34
7.5	6.85	7.18	7.57	7.38
7.45	6.9	7.26	7.53	7.4
7.43	6.93	7.30	7.51	7.41
7.41	6.94	7.32	7.50	7.42
7.41	6.94	7.33	7.50	7.42
7.4	6.95	7.34	7.49	7.42
7.82	7.45	7.46	7.81	7.30
8.23	7.95	7.58	8.12	7.18
7.25	7.54	7.54	6.92	6.91

Nitrógeno Amoniacal total (mgL⁻¹) durante periodo de muestreo

Purga	Humedal 1	Humedal 2	Humedal 3	Humedal 4
2.53	0.45	0.17	0.23	0.06
0.23	0.24	0.22	0.24	0.21
0.43	1.91	0.06	0.27	0.21
0.56	0.94	0.39	0.11	0.15
0.4	0.26	0.16	0.19	0.18
0.38	0.6	0.14	0.52	1.53
2.75	2.75	0.69	0.54	1.95
1.42	1.75	0.24	0.88	2.75
2.75	2.62	1.86	2.75	2.75
1.57	1.63	0.38	0.59	2.1
2.75	2.75	2.75	2.75	2.75
1.44	1.67	1.66	0.71	0.3
0.14	1.22	0.68	0.54	3.34
1.23	1.33	1.06	2.01	2.75
1.25	2.36	0.32	0.25	3.34
3.34	3.34	1.3	3.34	3.34
2.75	2.75	1.18	2.75	2.75
2.5	2.5	2.4	2.6	2.1
2.75	2.75	2.75	2.75	2.75
2.75	2.75	1.89	2.75	2.75
2.75	1.73	1.04	0.03	2.75
3.03	2.48	0.67	2.63	2.75
2.75	1.81	2.5	1.01	2.75
2.75	2.26	0.91	0.58	2.75
2.75	1.53	1.35	2.75	2.75

NO₂ (mgL⁻¹) durante periodo

Purga	Humedal 1	Humedal 2	Humedal 3	Humedal 4
0	0	0.55	0.109	0
0.008	0.036	0.007	0.027	0.034
0.013	0.021	0.008	0.004	0.001
0.11	0.138	0.05	0.032	0.021
0.01	0.083	0.042	0.033	0.014
0.127	0.133	0.004	0.039	0.043
0.623	0.636	2.71	0.248	0.201
0.612	0.701	0.013	0.156	0.093
0.32	0.223	0.109	0.148	0.153
0.518	0.204	0.19	0.225	0.339
0.043	0.037	0.038	0.034	0.007
0.9	0.003	0.003	0.13	0.011
0.031	0.034	0.056	0.058	0.048
0.013	0.033	0.01	0.013	0.006
0.24	0.174	0.059	0.28	0.599
0.28	0.244	0.042	0.16	0.148
0.196	0.221	0.031	0.067	0.186
1.807	0.231	0.354	0.11	0.394
0.076	1.807	0.123	0.154	0.067
0.218	0.057	0.051	0.049	0.179
0.035	0.024	0.009	0.341	0.13
0.706	0.383	0.027	0.039	0.054
0.179	0.021	0.049	0.02	0.039

NO₃ (mgL⁻¹) durante periodo de muestreo

Purga	Humedal 1	Humedal 2	Humedal 3	Humedal 4
1	0.9	1.3	2.3	1.2
0.7	0.6	0.6	0.8	0.8
1.2	0.9	0.8	1.1	0.8
1.2	1.2	1.3	1.1	1.3
1.3	1.8	0.8	1.6	0.9
2.6	2	2	2.4	1.4
0.4	3.4	2.6	2.7	1.4
3.2	4	1.4	3.1	1.2
3.6	3.9	2.2	2	1.8
2.65	2.55	1.6	3.2	1.35
1.7	1.2	1	1.2	0.9
1.75	0.95	1.1	1.5	1.1
1.8	0.7	1.2	1.8	0.9
1.15	0.4	0.8	1.4	0.7
0.5	0.7	0.3	1	0.8
0.75	0.4	1.1	1.2	1.1
1.1	0.2	1.5	1.2	1.4
2.5	1.5	2	1.8	1.35
4	2.8	2.6	2.4	1.3
2.9	2.5	2	2.1	2
2.4	2	1.4	1.6	2.1
2.6	1.5	2.6	2	1.4
2.6	1.6	1.5	2.6	2.4
2.3	2.2	3.1	2.1	1.9
2.7	1.9	1.4	1.8	2.2

Fosfatos Totales (mgL⁻¹) durante periodo de muestreo

Purga	Humedal 1	Humedal 2	Humedal 3	Humedal 4
1	0.9	1.3	2.3	1.2
0.7	0.6	0.6	0.8	0.8
1.2	0.9	0.8	1.1	0.8
1.2	1.2	1.3	1.1	1.3
1.3	1.8	0.8	1.6	0.9
2.6	2	2	2.4	1.4
0.4	3.4	2.6	2.7	1.4
3.2	4	1.4	3.1	1.2
3.6	3.9	2.2	2	1.8
2.65	2.55	1.6	3.2	1.35
1.7	1.2	1	1.2	0.9
1.75	0.95	1.1	1.5	1.1
1.8	0.7	1.2	1.8	0.9
1.15	0.4	0.8	1.4	0.7
0.5	0.7	0.3	1	0.8
0.75	0.4	1.1	1.2	1.1
1.1	0.2	1.5	1.2	1.4
2.5	1.5	2	1.8	1.35
4	2.8	2.6	2.4	1.3
2.9	2.5	2	2.1	2
2.4	2	1.4	1.6	2.1
2.6	1.5	2.6	2	1.4
2.6	1.6	1.5	2.6	2.4
2.3	2.2	3.1	2.1	1.9
2.7	1.9	1.4	1.8	2.2

DQO (mgL⁻¹) durante periodo de muestreo

Purga	Humedal 1	Humedal 2	Humedal 3	Humedal 4
12	0	10	0	2
13	0	9	8	7
3	14	7	19	2
147	60	41	4	3
0	21	72	7	17
16	40	1	16	80
153	24	117	12	88
170	72	7	12	113
173	169	79	196	193
186	86	59	46	195
146	169	94	154	166
107	154	163	153	114
13	54	70	18	104
110	171	81	129	202
48	171	31	93	95
176	41	134	70	180
42	75	38	78	101
278	230	47	123	203
65	105	123	148	140
191	156	78	166	196
109	126	64	86	145
170	157	58	96	136
179	172	82	102	153
156	8	65	54	163
148	26	122	157	155

COT (mgL⁻¹) durante periodo de muestreo

Purga	Humedal 1	Humedal 2	Humedal 3	Humedal 4
18.275	20.204	17.801	17.709	15.858
10.233	10.673	6.664	8.455	10.342
8.669	12.473	8.958	11.201	8.152
11.386	16.833	11.955	12.917	13.614
9.856	22.858	22.15	11.009	13.332
6.085	14.701	8.487	13.8	24.237
61.641	40.209	16.57	14.709	23.674
28.439	19.239	11.683	18.186	33.492
446.15	33.293	18.618	31.56	53.627
58.254	23.092	10.881	11.831	3.973
280.571	110.973	74.756	46.846	100.115
9.814	12.797	39.728	11.911	6.571
4.288	8.028	17.139	15.357	23.84
22.302	47.692	13.475	49.502	23.635
8.175	24.808	16.13	7.567	15.59
80.775	53.461	6.871	181.861	90.384
63.345	113.348	16.698	111.171	103.177
128.711	187.238	13.05	18.31	139.55
99.046	101.535	180.455	42.536	157.363
69.381	112.8	16.5	60.727	81.319

SST (mgL⁻¹) durante periodo de muestreo

Purga	Humedal 1	Humedal 2	Humedal 3	Humedal 4
21	790	170	1067	8
5	42	9	189	9
68	17	6	44	8
9	16	58	185	135
47	78	49	234	16
12	135	6	25	41
1067	597	39	20	51
122	132	7	28	83
1067	103	87	564	162
790	182	121	346	185
840	277	241	865	216
34	427	332	590	9
14	15	13	92	64
146	102	46	445	146
48	134	10	51	16
207	381	17	273	231
248	551	45	466	122
569	1067	7	90	470
307	790	16	146	129
288	1067	190	489	27
0.92	0.6	0.19	0.73	2.2
59	189	5	684	30
495	191	44	316	230
70	18	70	191	100
350	28	29	23	61

CAPITULO X

GLOSARIO

GLOSARIO

Acuicultura

Cría de organismos acuáticos, comprendidos peces, moluscos, crustáceos y plantas. La cría supone la intervención humana para incrementar la producción; por ejemplo: concentrar poblaciones de peces, alimentarlos o protegerlos de los depredadores.

La cría supone asimismo tener la propiedad de las poblaciones de peces que se estén cultivando. La acuicultura varía mucho según el lugar donde se lleve a cabo, desde la piscicultura de agua dulce en los arrozales de Viet Nam hasta la cría de camarón en estanques de agua salada en las costas de Ecuador, y la producción de salmón en jaulas en las costas de Noruega o de Escocia. Sin embargo, la mayor parte de la acuicultura se lleva a cabo en el mundo en desarrollo, para la producción de especies de peces de agua dulce de poco consumo en la cadena alimentaria, como la tilapia o la carpa (FAO, 2003).

Calidad del agua

El concepto de calidad de agua es usado para describir y regular las características químicas, físicas y biológicas que se deben cumplir.

Agua natural

Agua cruda, subterránea, de lluvia, de tormenta y superficial.

Agua residual

Las aguas residuales de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, agrícolas, pecuarias, domésticos y similares así como la mezcla de ellas. (Metas y Metrologos Asociados, 2010).

Fitorremediación

La fitorremediación se define como una tecnología sustentable que se basa en el uso de plantas para reducir in situ la concentración o peligrosidad de contaminantes orgánicos e inorgánicos de suelos, sedimentos agua y aire a partir de procesos bioquímicos realizados por las plantas y microorganismos asociados a su sistema de raíz que conducen a la reducción, mineralización, degradación volatilización y estabilización de diversos tipos de contaminantes.

Humedal

En el párrafo 1 del artículo 1 y en el párrafo 1 del artículo 2 de la Convención sobre los Humedales (Ramsar) la expresión "humedales" se define como sigue:

Humedal:

A los efectos de la presente Convención son humedales las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros. (RAMSAR, 1996).

Evaluación de Impacto Ambiental (EIA)

La evaluación de impacto ambiental es un instrumento de la política ambiental, cuyo objetivo es prevenir, mitigar y restaurar los daños al ambiente así como la regulación de obras o actividades para evitar o reducir sus efectos negativos en el ambiente y en la salud humana. A través de este instrumento se plantean opciones de desarrollo que sean compatibles con la preservación del ambiente y manejo de los recursos naturales.

