

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL



**“COMPARACIÓN Y EVALUACIÓN DE TRES PLANTAS ACUÁTICAS
PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE
NUTRIENTES EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES
DOMÉSTICAS”**

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO SANITARIO

PRESENTADO POR:

**ZARELA MILAGROS
GARCIA TRUJILLO**

LIMA - PERÚ

2012

DEDICATORIA

Dedico al esfuerzo de mis padres, Almaquio y Clara, en especial a mi amada madre, ya que sin su infinito apoyo no habría sido sencillo lograr mis objetivos profesionales, por brindarme sus sabios consejos para tomar decisiones firmes en todas las etapas de mi vida. A mis amigos que me apoyaron durante el desarrollo de la Tesis.

Zarela Milagros García Trujillo

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Otto Rosasco Gerkes, por sus conocimientos, recomendaciones a lo largo de la elaboración y revisión de la presente tesis hasta la finalización de este proyecto.

A la Universidad de Oshfalia y al grupo LIWA, por su apoyo en la elaboración del marco teórico de esta tesis; asimismo, agradezco a todo el personal del laboratorio de dicha Universidad por su confianza y apoyo en las mediciones fisicoquímicas realizadas.

Al Dr. Ing. Arthur Mennerich, quien a los inicios de este proyecto de investigación me apoyó mucho para el desarrollo de la tesis en mi estadía en Alemania; en compañía del Dr. Manfred, miembro del proyecto LIWA (Alemania-Lima), por su colaboración en la realización de este proyecto de investigación.

A varios amigos de la Universidad de Luneburgo y a mis amigos de la Universidad Nacional de Ingeniería, que me apoyaron para obtener más facilidades durante el desarrollo de la investigación.

A la Ing. Rosa Yaya Beas, por ofrecerme su confianza y apoyo para dar inicio a la realización de la segunda parte del presente proyecto de investigación en CITRAR.

Al Ing. Juan Carlos Alarcón por brindarme las facilidades y consejos para la elaboración de la presente investigación en las instalaciones de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la UNI – CITRAR.

Agradezco a Manuel, operador de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la UNI – CITRAR, por su apoyo para realizar la presente Investigación.

RESUMEN

En este trabajo se presenta un estudio comparativo acerca de la capacidad depuradora de nutrientes presentes en las aguas residuales, de tres plantas acuáticas flotantes, *Azolla filiculoides*, *Lemna minor* y *Eichhornia crassipes*; donde sus partes fotosintetizadoras sobre la superficie del agua y sus raíces se extienden hacia abajo dentro de la columna de agua, como se presentan en la Fotografía 1 (Anexo).

Antes de iniciar esta investigación se desarrolló la evaluación de *Azolla Filiculoides* cultivado en el efluente de la PTAR-Suderburgo (Alemania) que se realizó desde Julio hasta Noviembre del 2009, la cual se menciona en este informe. Los experimentos realizados fueron los sistemas “por tandas” compuesto por un estanque y “de flujo continuo” compuesto por tres estanques, donde cada estanque posee un área de 30.2 dm². Uno de los experimentos realizados se muestra en la Fotografía 2.

En este proyecto de investigación se trabajaron los experimentos realizados con *Lemna Minor* y *Eichhornia Crassipes*, a partir de Febrero hasta Junio de 2010, cultivados en el efluente de la PTAR-CITRAR en Lima (Perú). En la Fotografía 3, se muestra uno de los experimentos realizados.

Este estudio busca mejorar más la calidad del efluente de CITRAR (Lima-Perú), planta de tratamiento de aguas residuales utilizando macrófitos o plantas acuáticas.

La primera fase de la investigación consistió en la aplicación de plantas acuáticas en monocultivo con *Lemna M.* y *Eichhornia C.* utilizando el efluente de las PTAR-CITRAR en Lima para analizar el efecto depurador de las plantas acuáticas, además se trabajó con un control (sin plantas), los cuales funcionaron como sistemas “por tandas”, donde el estanque en acuarios posee un área de 36.0 dm²; desarrollándose por la homogeneidad en el tamaño de los estanques.

La segunda fase o técnica de esta investigación consistió en un flujo lento del efluente de la PTAR-CITRAR atravesando estanques con niveles de agua poco profundo, en las cuales plantas acuáticas flotantes (*Lemna M.* y *Eichhornia C.*) son cultivadas. Los sistemas de flujo continuo se componen de tres estanques

en el que además se implementó un sistema de filtros previo al tratamiento en estudio.

En ambas fases, las plantas acuáticas mantienen las condiciones de degradación anaeróbica y aeróbica de la materia orgánica y sedimentos filtrados gracias a sus raíces, donde se desarrolla una intensa actividad de las bacterias.

El objetivo principal fue determinar si el sistema de reactores con plantas acuáticas remueve nutrientes y observar si es un sistema adecuado y complementario con las plantas de tratamiento de aguas residuales convencionales existentes en nuestro país.

En el estudio realizado se observó que fue posible remover los nutrientes a un 90% como se esperaba pues estudios recientes hechos en el Perú y en América Latina que señalan eficiencia promedio del 95%. Sin embargo se determinó como mejor tratamiento a *Eichhornia Crassipes*, y en base a este resultado, esta especie se aplicó para la depuración de aguas residuales domésticas.

El Jacinto de agua es la especie más eficiente en la remoción de lodos (50%, a diferencia de 40% en los otros tratamientos) y esta remoción estuvo asociada a las mismas variables fisicoquímicas (15%-30% de correlación).

Existiendo incrementos de los parámetros nitrogenados excepto los nitratos; los que se aumentaron especialmente con *Lemna Minor* y lograron ser removidos con *Eichhornia Crassipes*. En cuanto a los parámetros microbiológicos no se evaluaron los tratamientos con precisión los niveles de remoción.

Palabras claves:

Microalgas, macrofitas nutrientes, fósforo, fosfato, nitrógeno, nitrato, nitrito, lodos activados.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

A	Afluente
ARD	Agua Residual Doméstica
NH_4^+	Amonio
COT	Carbono orgánico total
DBO_5	Demanda Bioquímica de Oxígeno al quinto día (mg/l)
DQO	Demanda Química de Oxígeno (mg/l)
P	Fósforo total (mg/l)
E	Efluente
TR	Tiempo de retención (días)
NTK	Nitrógeno total Kjeldal (mg/l)
PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
OD	Oxígeno disuelto
NO_2	Nitrito
NO_3	Nitrato
R-1	Reactor N°1
R-2	Reactor N°2
R-3	Reactor N°3
PO_4^{-3}	Orto-Fosfato
SUNASS	Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento
SEDAPAL	Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima
1er Efluente	Agua Residual tratada a la salida del Reactor 1.
2do Efluente	Agua Residual tratada a la salida del Reactor 2.
COP	Carga Operacional
EWS	Entwässerungssatzung (Estatutos de Drenaje)
PS	Peso Seco
PF	Peso Fresco
DIN	Instituto Alemán de Normalización
EPA	Environmental Protection Agency

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de tratamiento de aguas con plantas acuáticas son una alternativa eficiente y económica para el tratamiento de aguas residuales, la remoción de microorganismos y contaminantes físico químico, esto debido a sus bajos costos de construcción, operación y mantenimiento frente a los sistemas convencionales actuales. La remoción en sistemas con macrófitas se atribuye a procesos de sedimentación, absorción y remoción de sólidos suspendidos y materia orgánica.

En este sentido, los sistemas con las plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales podrían ser alternativas adecuadas debido a que funcionan para la asimilación de los compuestos orgánicos mediante la eliminación de microorganismos, tanto biodegradables y no biodegradables; así como nutrientes, metales y patógenos.

A pesar de su bajo costo, estos sistemas no se han implementado en los países de América Latina, sin embargo se han encontrado investigaciones de estas macrófitas que han sido aplicados para otras finalidades como por ejemplo el uso agrícola en Brasil. En cambio su desarrollo se ha encontrado principalmente en los países ricos, debido a su buen desempeño de purificación; además son cosechadas en los sistemas de tratamiento que pueden ser utilizadas en la alimentación animal y en la producción de biogás.

Previo a este estudio, desde el punto de vista de tratamiento de aguas residuales, se realizó la simulación de una laguna pequeña, conteniendo el efluente de una PTAR del país de Alemania, poblada con el helecho *Azolla Filiculoides*. La finalidad de este estudio fue analizar la capacidad depuradora de esta planta acuática bajo condiciones de flujo continuo y por tandas.

Siguiendo con el proyecto se trabajó con la *Lemna Minor*, planta acuática llamada lenteja de agua, y finalmente con *Eichhorna Crassipes*, conocida como Jacinto de agua; ambas fueron analizadas en nuestro país, específicamente en CITRAR (Lima, Perú).

En esta tesis de investigación se analizaron los rendimientos de estas plantas acuáticas purificadoras en lagunas pequeñas de agua residual con el fin de

poder implementar este tipo de sistema en una PTAR de Perú bajo ciertos criterios para su correcto funcionamiento.

El objetivo del presente estudio fue comparar la eficiencia de dos especies de macrófitas para la remoción de nutrientes, fósforo y nitrógeno (P , PO_4^{-3} , NH_4^+ y NH_3) y evaluar una posible relación entre los tratamientos y las eficiencias de remoción, a escala de laboratorio bajo condiciones de flujo continuo y por tandas. Además de hallar parámetros como: temperatura, PH, Conductividad DBO, Turbiedad en el tiempo de la investigación; además se experimentó el crecimiento de estas plantas acuáticas en aguas del efluente de la segunda laguna de estabilización de aguas residuales tratadas en la Planta de Tratamiento de CITRAR.

El trabajo desarrollado consta de dos principales partes: La investigación ejecutada y finalizada en el país de Alemania; y por último la investigación hecha en nuestro país.

El primer proyecto de investigación utilizando *Azolla Filiculoides* en **Sudburgo-Alemania**, abarcó desde el mes de julio hasta mediados del mes de noviembre del año 2009, el cual constituyó los experimentos: sistemas por tandas, sistemas de flujo continuo y sistemas por tandas en acuarios.

El segundo proyectó, investigación utilizando *Lemna Minor* y *Eichhorna Crassipes* en **CITRAR-Lima**, abarcó desde el mes de enero hasta fines del mes de junio del año 2010. La evaluación comprendió dos etapas: la primera, el crecimiento de la Lenteja de agua y Jacinto de agua, por Tandas; y la segunda efectuada con flujo continuo (que simula a un sistema de tratamiento de aguas residuales).

En el Primer Capítulo se señalan algunos conceptos preliminares necesarios para la evolución a lo largo del informe haciendo mención en primer lugar a las propiedades y características morfológicas de las tres plantas acuáticas; en segundo lugar los parámetros que comprenden en el tratamiento de aguas residuales; y en tercer lugar se menciona las características de la zona y el medio en el cual se trabajó, la elección de la planta acuática *Azolla filiculoides* y las metas alcanzadas en esta primera experiencia con helechos.

En el Segundo Capítulo se ha considerado el diseño de la investigación donde se justifica el motivo para el desarrollo de este proyecto de investigación. Además se menciona los tipos de experimentos que se realizaron.

En el Tercer Capítulo se desarrolla la metodología de la investigación aplicada tanto en la Planta de Tratamiento de Suderburgo-Alemania como en CITRAR-Lima; señalando las características de los dos experimentos realizados: Sistema por Tandas y Sistema de Flujo Continuo.

En el Cuarto Capítulo se detallan la interpretación y discusión de los resultados en los experimentos con las tres plantas acuáticas: Sistema por Tandas y Sistema de Flujo Continuo. Estos resultados son parámetros físico-químicos y el parámetro microbiológico de la DBO₅. Además se evaluó el comportamiento de la biomasa.

Seguidamente se hizo la comparación de los distintos comportamientos de estos parámetros y de la biomasa, con respecto a la especie.

Finalmente el capítulo siguiente señala las conclusiones y recomendaciones necesarias de este estudio que abarco aproximadamente dos años.

CAPITULO I

MARCO TEÓRICO

Este capítulo pone en consideración los fundamentos científicos necesarios empleados como base para el desarrollo de este estudio, los mismos que han sido extraídos de libros, investigaciones afines, revistas científicas y publicaciones en internet. De tal manera que aquellos lectores e investigadores interesados tengan una percepción clara de los términos que se manejan como íconos en el proceso investigativo.

1.1. AGUAS RESIDUALES

Agua residual es "una combinación de los líquidos y residuos arrastrados por el agua proveniente de casas, edificios comerciales, fábricas e instituciones combinada con cualquier agua subterránea, superficial o pluvial que pueda estar presente".(Ver [20])

1.2. CONSTITUYENTES DEL AGUA RESIDUAL

Los constituyentes encontrados en las aguas residuales pueden ser clasificados como físicos, químicos y biológicos. De los constituyentes del agua residual, los sólidos suspendidos, los compuestos orgánicos biodegradables y los organismos patógenos son de mayor importancia, y por ello la mayoría de instalaciones de manejo de aguas residuales deben ser diseñadas para su remoción. Antes de considerar las características físicas, químicas y biológicas del agua residual, es conveniente tratar brevemente los procedimientos analíticos usados para la caracterización de las aguas residuales.

1.3. NUTRIENTES

Los nutrientes son compuestos químicos necesarios para el ciclo de vida de ciertos microorganismos, para sus funciones de almacenamiento y reutilización, siendo perjudiciales en grandes cantidades en los cuerpos receptores.

Para la caracterización del agua residual cruda los nutrientes se clasifican en:

1. Fósforo total

- Orto fosfato
- Poli fosfatos

2. Nitrógeno total

- Nitrógeno Orgánico
- Nitrógeno Amoniacal
- Nitratos
- Nitritos

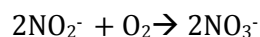
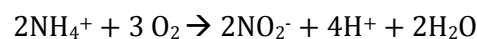
1.4. REMOCIÓN DE NUTRIENTES

La remoción de nutrientes es de gran importancia sanitaria, ya que su aumento en cuerpos de agua (especialmente lagos y lagunas), genera el fenómeno de eutrofización. La eutrofización consiste en un enriquecimiento excesivo de los elementos nutritivos del agua, que da lugar a una serie de cambios sistemáticos indeseables, entre ellos la producción perjudicial de algas y otras plantas acuáticas, el deterioro de la calidad de agua, la aparición de malos olores y sabores desagradables y la muerte de peces en el cuerpo de agua. La floración excesiva de algas y plantas acuáticas es un fenómeno visible que puede complicar considerablemente la utilización y la calidad estética de las masas de agua.

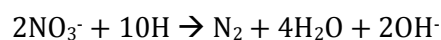
El consumo de las plantas acuáticas es un proceso por el cual los alimentos entran a ellas. Su fuente de alimentación son los nitratos (NO_3^-), amonio (NH_4^+), fosfato (PO_4^{3-}) y otros nutrientes para crecer, entonces tiene el efecto de eliminación de estos elementos de la fase acuosa. Varios organismos en el entorno de las plantas acuáticas, incluyendo algas y bacterias, también asimilan estos alimentos. La cosecha periódica de las plantas elimina permanentemente estos alimentos de la columna del agua.

La transformación de varios compuestos ocurre en la esfera de la planta acuática y los sedimentos de la planta. Los grupos específicos de microorganismos son responsables de transformaciones. Por ejemplo:

Nitrificación:



Desnitrificación:



La precipitación también ocurre en una Laguna con plantas acuáticas. Los compuestos en solución y otras, se precipitan y colocan al fondo de la laguna con plantas acuáticas. Por ejemplo, el Fosfato combina con Calcio para precipitarse como Fosfato de Calcio ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$).

1.5. DISMINUCIÓN DE LAS ALGAS

La característica de la altura en lagunas aeróbicas aproximadamente es de un metro, mientras que en lagunas con *Azollaes* de 10 a 25 cm solamente. Esto es porque las lentes que flotan en la superficie del agua como una alfombra opaco no permite que la luz pase a través de él. En consecuencia, las algas no pueden realizar la fotosíntesis y sedimentar.

La disminución de la concentración de algas reduce la DBO, DQO, sólidos en suspensión y turbidez.

1.6. CLASES DE PLANTAS ACUÁTICAS

Las plantas acuáticas son aquellas que requieren una gran cantidad de agua en sus raíces para vivir, crecen en medios muy húmedos y completamente inundados, Caicedo (1995), básicamente tienen los mismos requerimientos nutricionales de las plantas terrestres. Se pueden clasificar en flotantes, sumergidas y emergentes.

Las plantas acuáticas facilitan la integración paisajística de los sistemas y recrean los ecosistemas complejos donde intervienen otros elementos como insectos, anfibios y aves, regulando el sistema. Además ofrecen la posibilidad de obtener productos valorizables con diversos fines. Entre los posibles aprovechamientos están los usos ornamentales, cama para ganado, producción de compost, producción de forrajes, obtención de fibras para trabajos artesanales, etc.

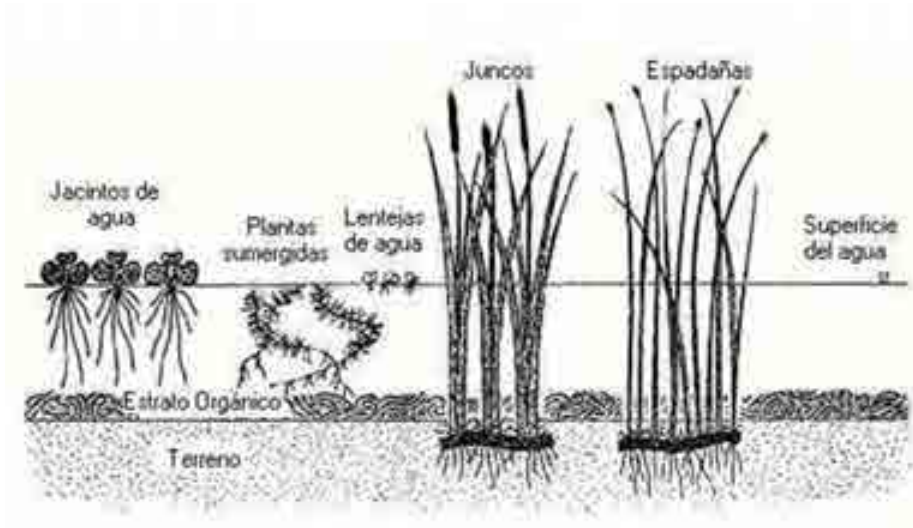


Figura 1. 1: Principales plantas acuáticas. Fuente EPA (2003)

Las libélulas, u odonatos, son algunas de las especies que viven en sistemas con plantas emergentes y flotantes, utilizadas en los sistemas de depuración. Éstos son insectos predadores que poseen hábitos carnívoros, alimentándose de otros invertebrados e incluso de larvas de peces.

1.7. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON PLANTAS ACUÁTICAS

En los últimos años el tratamiento de aguas residuales por medio de estanques con plantas acuáticas ha despertado un gran interés, por el potencial que han presentado para la depuración de las mismas. Algunos de estos sistemas han logrado proporcionar un tratamiento integral en donde no solamente se remueven eficientemente material orgánico y sólidos suspendidos sino que también se logran reducir nutrientes, sales disueltas, metales pesados y patógenos.

En la Fábrica de Imusa S.A. localizada en el municipio de Río Negro (Antioquía), Colombia, se tienen operando desde 1988 unos canales sembrados con *Eichhomia crassipes* (Jacinto de Agua), se ha comprobado una eficiencia de remoción de los diferentes contaminantes que alcanza más de 97% en los metales pesados.

También algunos investigadores como por ejemplo Chará (1988) quien describe uno de estos sistemas de tratamiento de aguas residuales

provenientes de granjas porcinas. El sistema está constituido por un biodigestor, seguido de un canal de sedimentación, un canal con *Eichhornia Crassipes* y, por último, un canal con *Lemna Minor*.

Otro investigador, Pedraza (1997) reporta una disminución en la demanda bioquímica de oxígeno de 247 a 149 mg/l y una reducción en los sólidos suspendidos totales de 214 a 58 mg/l en una granja porcina en el Valle del Cauca utilizando este sistema de tratamiento.

La Lechuga de Agua, en algunos estudios realizados en estanques ha demostrado poseer una capacidad de remoción de DBO superior en comparación con plantas de lodos activados.

1.8. PROPIEDADES DE LAS PLANTAS ACUÁTICAS EN SISTEMAS DE TRATAMIENTO

Las plantas juegan un papel fundamental en estos sistemas siendo sus principales funciones:

- Airear el sistema radicular y facilitar oxígeno a los microorganismos que viven en la rizósfera.
- Absorción de nutrientes (nitrógeno y fósforo).
- Eliminación de contaminantes asimilándolos directamente en sus tejidos.
- Filtración de los sólidos a través del entramado que forma su sistema radicular.

Se han estudiado distintas plantas acuáticas en sistemas de depuración de aguas residuales, algas u otras sumergidas, con vistas a explorar su posible valor, las así denominadas macrófitas acuáticas flotantes, la lenteja de agua o Lemna (*Lemna spp*), azolla (*Azolla spp*) y Jacinto acuático (*Eichhornia crassipes*) son del grupo de las plantas que con más intensidad se han estado evaluando en el trópico como posibles integrantes de sistemas de recirculación de nutrientes a través de su cultivo en estanques cargados con efluentes provenientes de biodigestores anaeróbicos, en lagunas, o simplemente colectadas en su medio natural.

Particularmente en estas macrófitas no se han encontrado factores antinutricionales que pudieran limitar su uso en alimentación animal, lo que las hace muy atractivas en este sentido.




Macrofita	Taxonomía Científica
 <p data-bbox="300 846 863 904">a) Planta acuática, <i>Azolla filiculoides</i> (helecho mosquito, helecho de pato, helecho de agua)</p>	<ul data-bbox="884 510 1198 860" style="list-style-type: none">• Reino: Plantae• División: Pteridophyta• Clase: Pteridopsida• Orden: Salviniales• Familia: Azollaceae• Género: Azolla• Especie: <i>A. filiculoides</i>
 <p data-bbox="300 1366 855 1397">b) Planta acuática, <i>Lemna Minor</i> (lenteja de agua).</p>	<ul data-bbox="884 1034 1214 1384" style="list-style-type: none">• Reino: Plantae• División: Fanerógamas• Clase: Liliopsida• Orden: Arel• Familia: Lemnaceae• Género: Lemna• Especie: <i>Lemna minuta</i>
 <p data-bbox="300 1832 842 1890">c) Planta acuática, <i>Eichhornia Crassipes</i> (Jacinto de agua común).</p>	<ul data-bbox="884 1482 1225 1832" style="list-style-type: none">• Reino: Plantae• División: Magnoliophyta• Clase: Liliopsida• Orden: Commelinales• Familia: Pontederiaceae• Género: Eichhornia• Especie: <i>E. crassipes</i>

Figura 1. 2: Notación científica de los helechos en estudio.

Macrofita	Características Morfológicas
 <p>a) <i>Azolla Filiculoides</i>.</p>	<ul style="list-style-type: none">• Flotan en la superficie del agua por medio de numerosas, pequeñas y estrechamente sobrepuestas escamas como hojas, con sus raíces colgando en el agua.• Frondes divididas cuyo color oscila entre rojo y púrpura a pleno sol y de verde pálido a verde azulado en la sombra.• Cada planta individual es de 1-2 cm de diámetro y divisiones en secciones más pequeñas a medida que crece.
 <p>b) <i>Lemna Minor</i></p>	<ul style="list-style-type: none">• Planta acuática de agua dulce flotante, con uno, dos o tres hojas cada uno (frondes oblongas) con una sola raíz colgando en el agua.• La raíz es de 1-2 cm de largo. Las hojas son ovales, 1-8 mm de largo y 0.6 a 5 mm verde amplio.• Las flores se producen raramente (\approx de 1 mm de diámetro, con una membrana en forma de copa que contiene un óvulo único y dos estambres.• La semilla es de 1 mm de largo.
 <p>c) <i>Eichornia Crassipes</i></p>	<ul style="list-style-type: none">• Flotan sostenidas por esponjosos rizomas, con las raíces cortas flotando libremente.• Son macrófitos flotantes, que alcanzan hasta un metro de altura, aunque normalmente no superan los 50 cm.• Hojas en rosetas, ascendentes a extendidas (2 a 16 cm) y su fruto una cápsula (1.5 cm).• Pecíolos cortos, hinchados (bulbosos), con tejido aerenquimatoso.• Flores azules a celestes, y una mancha amarilla en el lóbulo superior del perianto.

Figura 1. 3: Características físicas de los helechos en estudio.

Macrofita	Hábitat de cultivo
<p data-bbox="336 271 576 297">a) <i>Azolla Filiculoides</i></p> 	<ul data-bbox="767 271 1353 741" style="list-style-type: none">• Nativa de regiones templadas y tropicales de las Américas, así como la mayor parte del viejo mundo, incluyendo Asia y Australia.• Tiene fama de ser capaz de crecer tan rápido de duplicar su biomasa en tres días en buenas condiciones.• Es también una seria maleza en muchas partes del mundo, cubriendo cuerpos de agua tanto que no se ve el agua.• Son utilizadas como planta ornamental.
<p data-bbox="320 790 496 817">b) <i>Lemna Minor</i></p> 	<ul data-bbox="767 790 1353 1305" style="list-style-type: none">• Nativa en la mayor parte de África, Asia, Europa y América del Norte, que se producen en todas partes que los estanques de agua dulce y lento movimiento de las corrientes se producen, a excepción de ártica y climas subártico.• Crece con tanta rapidez y eficiencia que puede provocar grandes daños de forma frecuente a una alfombra completa aún cuando las condiciones son adecuadas.• Especie casi cosmopolita.
<p data-bbox="320 1355 576 1382">c) <i>Eichornia Crassipes</i></p> 	<ul data-bbox="767 1355 1353 1821" style="list-style-type: none">• Endémica del Amazonas y de la cuenca del río Paraná. Son plantas perennes flotantes oriundas de las regiones tropicales de Sudamérica.• Los jacintos acuáticos se han introducido ampliamente por toda América del Norte, Asia, Australia y África.• Además de salvaje, <i>Eichorniacrassipes</i> se cultiva en jardines de agua, en fuentes y piscinas.

Figura 1. 4: Hábitat de cultivo o crecimiento de los helechos en estudio.

1.8.1. Propiedades para utilizar *Azolla Filiculoides* en el tratamiento de aguas residuales domésticas y como reúso.

Este helecho tiene la habilidad de fijar nitrógeno atmosférico gracias a su asociación en simbiosis con una cianobacteria que lo fija, *Anabaenaazollae* (Peters Et al. 1982, y Calvert Et al. 1985). La *Anabaenaazollae*, que vive en las cavidades de las frondas del helecho, es capaz de usar su propia energía fotosintética para fijar el nitrógeno atmosférico y producir amonio, lo que es aprovechado por la azolla para cubrir sus propios requerimientos de nitrógeno.

Aún así, algunos factores ambientales tales como las condiciones del suelo y del agua, así como las técnicas de cultivo, influyen de una forma importante en el contenido de nutrientes de la *Azolla* (Naegel, 1998).

La *Azolla filiculoides* no es tolerante a bajas temperaturas, y en las regiones de clima templado en gran medida mueren en invierno, sobreviviendo a través de las yemas sumergidas. Pueden crecer en un amplio rango de condiciones ambientales, siendo intolerantes al agua salada.

La relación simbiótica entre el helecho y la cianobacteria, permite a la *Azolla* ser relativamente independiente de utilizar nitrógeno de su entorno que da a la planta la capacidad de llegar a fijar del aire más de 600 kg N/ha/año; y ha atraído el interés de muchos científicos. Este hecho hace que la *Azolla* tienda a contener niveles relativamente altos de nitrógeno y ser una fuente proteica atractiva para la alimentación animal, no solamente del ganado y en la avicultura Buckinham et al. (1986), sino en acuicultura, para alimentar peces en forma fresca Pantastico et al. (1986), o seca (Joseph Et al .1994).

Se le llama 'helecho mosquito', por la creencia de que ningún mosquito puede penetrar la cubierta verde de helechos para poner sus huevos en el agua.

Muchas de las especies pueden producir grandes cantidades de antocianinas, pigmentos hidrosolubles que se hallan en las vacuolas de las células vegetales, generadas con el sol brillante, creando una intensa coloración rojiza y dando la sensación de cubrirse la superficie acuosa de una alfombra roja.

Ayuda a controlar el desarrollo de las algas al limitar la disponibilidad de la luz.

1.8.2. Propiedades para utilizar *Lemna Minor* en el tratamiento de aguas residuales domésticas y como reúso.

Las lemnáceas se han utilizado en algunas oportunidades para aprovecharlas como plantas purificadoras de aguas residuales, Dingess (1983), y particularmente, han sido incluidas en circuitos complejos de depuración de excretas porcinas, Corradi (1991), con alto valor nutritivo, alto contenido inorgánico, no tóxico para los animales y carente de plagas serias, mientras que en otras ocasiones, la atención de los investigadores se ha movido preferencialmente hacia su uso en nutrición animal (Rusoff et al . 1980; Bui Huy 2000 citado por Clostre, 2007).

Con fines alimenticios: la *Lemna* por su alto contenido proteico, puede ser fuente alimenticia, previamente preparada como alimento balanceado, para la crianza de pollos y cerdos. Como alimento fresco es también una potencialidad de uso, con fines ganaderos y avícolas.

Con fines de lombricultura y producción de humus. La *Lemna* con 14 a 18 días de precomposteo puede ser utilizada para la crianza de lombrices, los que pueden tener niveles de 68 a 82% de proteínas.

La clonación y la modificación de ciertos genes de *Lemna* dan lugar a una forma de obtención barata de productos farmacéuticos, así mismo su alto contenido en proteínas hacen que se use como fuente de alimentación en acuicultura.

Se sumerge para florecer. A medida que crecen las hojas, las plantas se dividen y se convierten en individuos separados. Forman Colonias pequeñas que crecen en el agua con altos niveles de nutrientes y un pH de entre 5 y 9, de manera óptima entre 6.5 y 7.5, y temperaturas entre 6 y 33°C. En las regiones templadas, cuando las temperaturas caen por debajo de 6 a 7°C se desarrollan pequeñas y densas colonias, los órganos se llenan de almidón llamados "turiones" que se vuelven inactivos y se hunden hasta el fondo del agua; en la primavera siguiente, éstas reanudan el crecimiento y flotan de nuevo a la superficie.

Asimilan los nutrientes del efluente de las aguas residuales cuando son cosechadas y retiradas de los estanques, han mostrado facilidad para extraer

rápidamente de las aguas algunos metales tales como el zinc, manganeso y hierro, así como para remover gran cantidad de Nitrógeno, fósforo y potasio en las aguas servidas. Es indicadora de aguas eutróficas ricas en nitratos y fosfatos y por tanto no potables.

Asimismo es utilizada en test de toxicidad, tipo de prueba biológica, donde se expone a un organismo a dosis variado de un compuesto químico midiéndose su reacción.

1.8.3. Propiedades para utilizar *Eichornia Crassipes* en el tratamiento de aguas residuales domésticas y como reúso.

Esta planta obtiene del agua todos los nutrientes que requiere para su metabolismo, siendo el nitrógeno y el fósforo, junto a los iones de potasio, calcio, magnesio, hierro, amonio, nitrito, sulfato, cloro, fosfato y carbonato, los más importantes.

Poseen un sistema de raíces, que tienen microorganismos asociados a ellas que favorece la acción depuradora de las plantas acuáticas Novotny y Olem, citado por Celis (1994), retienen en sus tejidos metales pesados (cadmio, mercurio, arsénico). Además remueve algunos compuestos orgánicos, tales como fenoles, ácido fórmico, colorantes y pesticidas, y disminuye niveles de DBO (demanda biológica de oxígeno), DQO (demanda química de oxígeno), y sólidos suspendidos Metcalf y Eddy, citado por Celis (1995).

El impacto que estas plantas causan en lagos y charcas si no se mantienen bajo control es muy grave, ya que pueden cubrir estas extensiones completamente, impidiendo que la luz del sol llegue a las plantas acuáticas nativas y agotando el oxígeno del agua.

Es una de las plantas de más rápido crecimiento, se reproducen principalmente por estolones que forman nuevas plántulas, además de por semillas. El vigoroso Jacinto de agua común *Eichhornia crassipes* puede doblar su número en dos semanas.

El Jacinto de agua también se observa para mejorar la nitrificación en las aguas residuales tratadas con células de tecnología viva.

Sus zonas radiculares son excelentes microsítios de las comunidades bacterianas.

Remueve toxinas, tales como cianidas, un proceso que es de beneficio ambiental en las zonas que han sufrido las operaciones de minería de oro.

Flotan sostenidas por esponjosos rizomas, con las raíces flotando libremente.

Hasta el 50% de la biomasa del aguapé puede estar constituida por raíces fibrosas, de color violáceo o azulado gracias a la antocianina que contienen como defensa frente a los predadores. Alcanzan los 3 m de largo, con radículas laterales en gran cantidad que le dan una apariencia plumosa.

Producen además problemas sanitarios al constituir un hábitat propicio para los mosquitos, el clásico vector de las enfermedades y una especie de caracol (de los géneros *Biomphalaria* y *Oncomelania*) conocido por albergar un parásito platelminto que provoca la esquistosomiasis.

La planta es muy tolerante, y de alta capacidad de captación de metales pesados, tales como Cd, Cr, Co, Ni, Pb, Hg, etc, que podría ser utilizado para la biolimpieza de aguas residuales industriales.

Además la *Eichornia Crassipes* es alimento de los gorgojos, (escarabajos de la super familia Curculionoidea), *Neochetinabruchi*, *N. eichhorniae* y *Sameodesalbiguttalis*.

1.9. PARÁMETROS QUE SE ANALIZAN EN LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

En breve una descripción de todos los parámetros que se pueden analizar en aguas residuales domésticas y se resalta además la importancia a nivel de Contaminación.

1.9.1. Parámetros físicos

Los parámetros físicos, como su nombre lo explica son aquellos parámetros que dan las características físicas de visibles en el agua, se pone en consideración a continuación su descripción y los problemas que causan en el agua.

El **color y olor** sirven como indicadores del grado de contaminación por residuos y su presencia en aguas residuales es signo de un pre tratamiento inadecuado antes de la descarga.

El agua residual contiene una variedad de materiales **sólidos** que varían desde hilachas hasta materiales coloidales. En la caracterización de las aguas residuales, los materiales gruesos son removidos generalmente antes de analizar sólidos en la muestra. Existen tres tipos de sólidos que se pueden cuantificar en las aguas residuales entre estos están:

Los **sólidos totales** representan la suma de los SDT (Sólidos Disueltos Totales) y SST (Sólidos Suspendidos Totales), además estos poseen fracciones de sólidos fijos y sólidos volátiles, que pueden ser sedimentables y no sedimentables. Generalmente cerca del 60% del total de sólidos suspendidos en aguas residuales son sedimentables. La prueba de SST son usados comúnmente como una medida de desempeño de las unidades de tratamiento y con propósitos de control, pues los **sólidos sedimentables** son aquellos que ocasionan la formación de bancos de lodos que producen olores desagradables.

1.9.2. Parámetros químicos

Son aquellos parámetros que solo se pueden determinar a través de análisis de laboratorio, su importancia radica en los efectos que producen todos estos sobre los organismos acuáticos ya sean estos, vegetales o animales. Además de las alteraciones que pueden causar en fuentes de agua natural si no se controlan en los sistemas de tratamiento de aguas residuales.

El término **pH** es usado universalmente para determinar si una solución es ácida o básica, es la forma de medir la concentración de iones hidrógeno en una disolución. La escala de pH contiene una serie de números que varían de 0 a 14, esos valores miden el grado de acidez o basicidad de una solución. Los valores inferiores a 7 y próximos a cero indican aumento acidez, los que son mayores de 7 y próximos a 14 indican aumento de basicidad, mientras que cuando el valor es 7 indican neutralidad.

Para Rodier (1986), el **pH óptimo** de las aguas debe estar entre 6.5 y 8.5 es

decir, entre neutra y ligeramente alcalina, el máximo aceptado es 9 donde relativamente existe la mayor parte de la vida biológica. Las aguas residuales con valores de pH menores a 5 y superiores a 9 son de difícil tratamiento mediante procesos biológicos, si el pH del agua residual tratada no es ajustado antes de ser vertido, el pH de la fuente receptora puede ser alterado; por ello, la mayoría de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales deben ser descargados dentro de límites específicos de pH.

La presencia **oxígeno disuelto** en el agua es indispensable para la vida de peces y otros seres acuáticos, el problema es la baja solubilidad de este gas en el agua, además la cantidad de oxígeno en el agua depende de las condiciones ambientales, ya que su cantidad aumenta al disminuir la temperatura o aumentar la presión.

Los desperdicios orgánicos que se encuentran en el agua son descompuestos por microorganismos que usan el oxígeno para su respiración, esto quiere decir que cuanto mayor es la cantidad de materia orgánica, mayor es el número de microorganismos y por tanto mayor consumo de oxígeno. En muchas ocasiones esta falta de oxígeno es la causa de la muerte de peces y otros animales acuáticos más que la existencia de los compuestos tóxicos.

La **temperatura** es importante, ya que muchos de los sistemas de tratamiento de aguas residuales incluyen procesos biológicos que dependen de la temperatura, esta influye de forma muy significativa en las especies acuáticas influyendo en su metabolismo, productividad primaria, respiración y descomposición de materia orgánica. Puede también influir en las velocidades de las reacciones químicas, en los usos del agua y en la vida de la flora y la fauna acuática, puede provocar la coagulación de las proteínas de la materia orgánica y aumentar la toxicidad de algunas sustancias.

La temperatura de un agua residual varía de estación en estación y también con la posición geográfica. En regiones frías, la temperatura varía de 7 a 18°C mientras que en regiones cálidas la variación será de 13 a 30°C. La temperatura óptima para el desarrollo de la actividad bacteriana está en el rango 25 a 35°C.

Una expresión numérica de la capacidad de una solución para transportar una

corriente eléctrica se determina con la conductividad. Esta capacidad depende de la presencia de iones y de su concentración total, de su movilidad, valencia y concentraciones relativas así como de la temperatura de medición. Cuanto mayor sea la concentración de iones mayor será la conductividad.

En las aguas naturales los iones que son directamente responsables de los valores de conductividad son entre otros el calcio, magnesio, potasio, sodio, carbonatos, sulfatos y cloratos. Con respecto a las aguas naturales la medida de la conductividad tiene varias aplicaciones, tal vez la más importante sea la evaluación de las variaciones de la concentración de minerales disueltos en aguas naturales y residuales.

Los iones **amonio** tienen una escasa acción tóxica por sí mismo, pero su existencia aún en bajas concentraciones, puede significar un alto contenido de bacterias fecales, patógenas, etc. La formación de amonio se debe a su descomposición bacteriana de urea y proteínas, siendo la primera etapa del proceso de naturaleza inorgánica. Su concentración máxima en las aguas potables de consumo público es de 0.5 mg/l.

El **nitrógeno orgánico** y el **nitrógeno amoniacal** se hallan contenidos en el nitrógeno orgánico este parámetro se determina por el método de Kjeldahl. Su presencia en altas concentraciones puede provocar el crecimiento acelerado de plantas acuáticas.

El método usado con mayor frecuencia en el campo de tratamiento para determinar la descomposición biológica en las aguas residuales es **Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)**. Si existe suficiente oxígeno disponible, la descomposición biológica aerobia de un desecho continuará hasta que el desecho se haya consumido.

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) es un indicador de la cantidad de sustancias orgánicas de origen biológico (proteínas, carbohidratos, grasas y aceites) y de productos químicos orgánicos sintéticos y biodegradables en las aguas residuales.

Para medir el material orgánico presente en las aguas residuales susceptible de ser oxidado químicamente se analiza **demanda química de oxígeno (DQO)**, la cual es oxidada con una solución de dicromato en medio ácido.

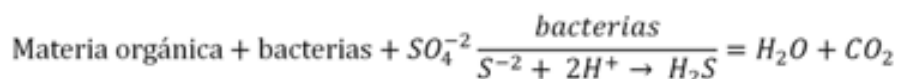
Aunque se podría esperar que el valor de la DBO_5 fuera similar al de la DQO, éste sería un caso fortuito. Algunas razones para explicar tal diferencia se enumeran a continuación:

1. Muchas sustancias orgánicas las cuales son difíciles de oxidar biológicamente, tales como la lignina, pueden ser oxidadas químicamente.
2. Las sustancias inorgánicas que se oxidan con dicromato aumentan evidentemente el contenido orgánico de la muestra.
3. Algunas sustancias orgánicas pueden ser tóxicas para los microorganismos usados en la prueba de la DBO_5 .
4. Valores altos de DQO indican la presencia de sustancias inorgánicas con las cuales el dicromato puede reaccionar.

La proporción entre la DBO_5 (demanda bioquímica de oxígeno en una prueba de 5 días) y la DQO es un indicador del tratamiento biológico. Según Fresenius et al. (1989), los valores de la relación DBO_5/DQO en aguas residuales municipales no tratados oscilan entre 0.3 y 0.8. Generalmente, los procesos de descomposición biológica comienzan y ocurren de manera rápida con proporciones de $DBO_5:DQO$ de 0.5 o mayor. Las proporciones entre 0.2 y 0.5 son susceptibles al tratamiento biológico; sin embargo, la descomposición puede ocurrir de manera más lenta debido a que los microorganismos degradantes necesitan aclimatarse a las aguas residuales.

Si esta relación es menor de 0.3, el residuo puede contener constituyentes tóxicos o se pueden requerir microorganismos aclimatados para su estabilización.

El **azufre** se encuentra en forma natural como ión sulfato en aguas de abastecimiento como en aguas residuales. El azufre es un elemento indispensable para la síntesis de proteínas y por eso se libera cuando ocurre la degradación de las mismas. Los **sulfatos** se reducen biológicamente a sulfuros bajo condiciones anaerobias y pueden formar sulfuro de hidrógeno (H_2S) al combinarse con el hidrógeno. A continuación se muestran las reacciones generales que rigen estos procesos:



Los sulfatos se reducen a sulfuros en los digestores de lodos y pueden alterar el desarrollo normal de los procesos biológicos si la concentración excede los 200mg/l, afortunadamente estas concentraciones no son comunes. El **sulfuro** presenta riesgo de formación de gas sulfhídrico, el que en baja concentración genera olor desagradable y en alta concentración puede ser muy tóxico.

A los **cloruros** se les considera aniones inorgánicos principales en el agua natural y residual. En el agua potable el sabor salado producido por el cloruro es variable y depende de la composición química del agua. Ese sabor es más detectable si el catión predominante en el medio es el sodio, y se nota menos si el catión es calcio o magnesio. La concentración de cloruros es mayor en las aguas residuales ya que el NaCl es muy común en la dieta y pasa inalterado a través del sistema digestivo. Un contenido elevado de cloruro puede dañar las conducciones, estructuras metálicas y perjudicar el crecimiento vegetal.

El **fósforo** es importante en el crecimiento de las algas y otros organismos biológicos. Debido al nocivo crecimiento incontrolado de algas en aguas superficiales, se han realizado grandes esfuerzos para controlar la cantidad de compuestos del fósforo provenientes de descargas de aguas residuales domésticas y de escorrentía natural. Las aguas residuales municipales por ejemplo, pueden contener entre 4 y 12 mg/l de fósforo expresado como compuestos fosforados. Las formas más frecuentes en que se puede encontrar fósforo en soluciones acuosas incluyen ortofosfatos, polifosfatos y fósforo inorgánico. Los ortofosfatos (PO_4^{-3} , HPO_4^{-2} , H_2PO_4 , H_3PO_4 y complejos HPO_4^{-2}) están disponibles para el metabolismo biológico sin que sea necesaria una ruptura posterior.

1.9.3. Parámetros biológicos

Las características biológicas de las aguas residuales son de fundamental importancia en el control de enfermedades causadas por organismos patógenos de origen humano y por el papel activo y fundamental de las bacterias y otros microorganismos dentro de la descomposición y estabilización de la materia orgánica, bien sea en el medio natural o en plantas de tratamiento de aguas residuales.

En los depósitos de agua que proceden de las descargas de animales, existen

microorganismos patógenos. La *Escherichiacoli* en general coliformes, streptococos fecales (*Streptococcus faecales*) y *Clostridium perfringens* son habitantes regulares del intestino grueso.

En las aguas negras hay millones de bacterias como coliformes, esporulados anaerobios (*Proteu ssp.*) y también algunos protozoos patógenos y virus. El predominio de algunos tipos fisiológicos varía durante la digestión de las aguas.

En un digestor en anaerobiosis, inicialmente predominan anaerobios facultativos (*Enterobacter sp.*, *Alcaligene ssp.*, *Escherichia sp.*, *Pseudomona sp.*, etc) a los cuales siguen productores metano anaerobios estrictos, como *Metanobacterium*, *Metanosarcina* y *Metanococcus*. Los productos finales son metano y dióxido de carbono (Opazo, 1991).

Según García y Bacares citado por Valderrama (2005), el tiempo de retención aumenta la eficiencia de remoción en todos los tratamientos biológicos, pero según Van der Steen et al, citado por Valderrama la remoción de coliformes totales y *Escherichia coli* alcanza el 99% el día 6, además que ellos resaltan la eficiencia más alta con plantas acuáticas en relación a las microalgas.

1.9.4. Organismos patógenos

Los organismos patógenos presentes en las aguas residuales pueden provenir de desechos humanos que estén infectados o que sean portadores de una enfermedad determinada. Las principales clases de organismos patógenos que pueden encontrarse en aguas residuales son: bacterias, parásitos (protozoos, helmintos) y virus.

Las **bacterias** se consideran uno de los principales grupos patógenas presentes en aguas residuales, entre ellos tenemos al género *Salmonella*, el cual contiene una gran variedad de especies que pueden causar enfermedades en humanos y animales. La fiebre tifoidea, ocasionada por *Salmonella typhi*, es la enfermedad más grave que puede transmitir este grupo. La enfermedad más comúnmente asociada con el grupo *Salmonella*, llamada salmonellosis, es una de las intoxicaciones alimentarias más comunes causadas por agua y alimentos contaminados. El grupo *Shigella*, uno de los

grupos bacteriales es menos común, es el responsable de una enfermedad intestinal conocida como disentería bacilar o shigellosis.

Entre otras bacterias, aisladas de aguas residuales crudas se encuentran: *Vibrio*, *Mycobacterium*, *Clostridium*, *Leptospira* especies de *Yersinia*.

El *Vibrio cholerae* es el agente causante de la enfermedad del cólera. Los únicos organismos huéspedes del cólera son los humanos y la vía más frecuente de transmisión es a través del agua. La *Mycobacterium tuberculosis* se ha encontrado en aguas residuales municipales, conociéndose casos de personas contagiadas por nadar en aguas contaminadas.

Es frecuente el reporte de casos de gastroenteritis producida por causas desconocidas, aunque en general se atribuye a agentes bacteriales. Una fuente potencial para la propagación de esta enfermedad es la presencia de bacterias Gram negativas en el agua, a pesar de ser catalogadas como no patógenas. En este grupo se incluyen bacterias enteropatógenas como la *Escherichia coli* y algunas especies de *Pseudomonas*, capaces de afectar a niños recién nacidos.

Aunque se ha establecido con certeza que estos organismos causan enfermedades en animales también han sido involucrados como agentes etiológicos en la transmisión de enfermedades humanas de origen hídrico.

Algunas especies de **protozoos** como *Cryptosporidium parvum*, *Cyclospora* y *Giardia lamblia* son de gran interés debido a su impacto sobre individuos con deficiencias en su sistema inmunológico, como es el caso de niños, personas de avanzada edad, individuos con cáncer o aquellas personas víctimas del síndrome de inmunodeficiencia adquirida.

La infección es causada por la ingestión de agua contaminada con ooquistes y quistes. Es importante anotar que existen fuentes de origen diferente al hombre que pueden aportar a las aguas contaminadas organismos como *Cryptosporidium Parvum* la *Giardia lamblia*. Estos protozoos pueden ocasionar síntomas como diarrea severa, dolor estomacal, náuseas y vómito que pueden extenderse por largos períodos de tiempo. Las formas más resistentes del *Cryptosporidium parvum* son los ooquistes y para la

Giardialamblia los quistes.

Los más importantes parásitos **helmínticos** que pueden encontrarse en aguas residuales son las lombrices intestinales, como la lombriz estomacal *Ascarislumbricoides*, la tenia solitaria *Taeniasaginata* y *Taeniasolium*, los gusanos intestinales *Trichuristrichura*, la lombriz intestinal *Ancylostomaduodenales* y el *Necatoramericanus*, y la lombriz filiforme *Strongyloidesstercorales*. La etapa infecciosa de algunos helmintos es el estado adulto o de larva y en otros la etapa infecciosa es el estado de huevo. Los nemátodos son organismos libres en el estado de larva que no presenta ningún riesgo de tipo patógeno para los humanos.

Los huevos y larvas cuyo tamaño oscila entre 10 µm y 100 µm, resisten condiciones ambientales desfavorables y pueden sobrevivir a los tratamientos convencionales de desinfección de aguas residuales, aunque algunos huevos pueden ser removidos mediante procesos convencionales de tratamiento como sedimentación, filtración y lagunas de estabilización.

Existen más de 100 clases diferentes de **virus** entéricos capaces de transmitir algún tipo de infección o enfermedad que son excretados por el hombre. Estos virus se reproducen en el tracto intestinal de personas infectadas y son posteriormente expulsadas en las heces.

Desde el punto de vista de salud humana, los virus entéricos más importantes son enterovirus (polio, eco, coxsackie), virus norwalk, rotavirus, reovirus, calcivirus, adenovirus y virus de hepatitis A. Entre los virus que causan enfermedades diarreicas se ha demostrado que los rotavirus y virus norwalk son los principales patógenos de origen hídrico. Los reovirus y los adenovirus, causantes de enfermedades respiratorias, gastroenteritis e infecciones en los ojos se han logrado aislar a partir de muestras de agua residual.

1.10. NORMAS NACIONALES

La calidad del agua residual depende del uso de las aguas del cuerpo receptor al cual se vierte, o del uso directo de las aguas residuales tratadas.

Los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua según Decreto Supremo 002-2008-MINAM del 31.07.2008 son:

Categoría 1: Poblacional y Recreacional

- ✓ Aguas superficiales dedicadas a la producción de agua potable.
 - A1.- Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección
 - A2.- Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional.
 - A3.- Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento avanzado.
- ✓ Aguas superficiales dedicadas para recreación.
 - B1.- Contacto primario
 - B2.- Contacto secundario

Categoría 2: Actividades Marino Costeras (Agua de mar)

- ✓ Sub categoría 1.- Extracción y cultivo de moluscos bivalvos.
- ✓ Sub categoría 2.- Extracción y cultivo de otras especies hidrobiológicas.
- ✓ Sub categoría 3.- Otras actividades.

Categoría 3: Riego de Vegetales y Bebidas de Animales.

- ✓ Parámetros para riego de vegetales de tallo bajo y tallo alto.
- ✓ Parámetro para riego de vegetales.
- ✓ Parámetro para bebida de animales.

Categoría 4: Conservación del Ambiente Acuático.

- ✓ Lagunas y lagos
- ✓ Ríos
 - Cosa y Sierra
 - Selva
- ✓ Ecosistemas marinos costeros
 - Estuarios
 - Marinos

CAPÍTULO II

DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. ANTECEDENTES DEL PROYECTO

Sobre la base de las conclusiones a las que finalizó el estudio de la tesis “Evaluación del uso de la Planta acuática *Lemna* para determinar la eficiencia remocional de nutrientes a escala reactor del efluente de la laguna Secundaria de la planta CITRAR”⁽¹⁾, al aplicar *Lemna Minor* al efluente de la Laguna Secundaria de CITRAR, la tasa de crecimiento fue de 37.824 Ton/Ha*año (en peso húmedo), una remoción de DQO en 56.10%, de Nitrógeno Total en 13.55%, de Fosforo Total en 25.40% donde el pH fue siempre neutro y con concentraciones menores a 1 mg/l de Oxígeno disuelto.

La tesis “Evaluación de la eficiencia de plantas acuáticas flotantes *Lemna Minor* (Lenteja de agua), *Eichhorna Crassipes*(Jacinto de agua) y *Pistia Stratoides* (Lechuga de agua), para el tratamiento de aguas residuales domésticas”, menciona al Jacinto de agua como la especie más eficiente en la remoción de lodos (91%, a diferencia de los otros tratamientos en un 75%) y esta remoción estuvo asociada a las mismas variables fisicoquímicas (90% en Jacinto de agua y 60% en los diferentes tratamientos). (Ver [3])

La tesis llamada “La introducción de plantas acuáticas como tratamiento terciario de un efluente de Laguna para aguas residuales domésticas”, muestra la reducción de la carga orgánica a niveles que permiten su disposición final o reutilización”. (Ver [4])

2.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.2.1. Identificación del Problema

En el Perú se producen anualmente alrededor de 1,000 millones de m³ de aguas residuales domésticas, de este volumen sólo el 22% es tratado, en Lima sólo es tratada el 9.5%. El objetivo es evacuar el efluente de las plantas de

tratamiento de agua residual doméstico con menos porcentajes de nutrientes directamente en algún cuerpo de agua (río, lago o mar) o usarlo en riego, a un bajo costo. (Ver [1])

2.2.2. Formulación del Problema

Este estudio presenta un método alternativo para mejorar la calidad del efluente de la PTAR en presencia de dos plantas acuáticas o macrofitas de estanque; *Lemna Minor* (Lenteja de agua) y *EichhornaCrassipes* (Jacinto de agua). Al primer helecho se le aplicó condiciones ambientales muy distintas a las aplicadas a las otras dos muestras.

Las variables climáticas que afectan el crecimiento de estas plantas acuáticas son difíciles de manipular, por lo tanto, determinaremos cuales son las variables climáticas y las interacciones que más influyen en la adaptación de estas tres plantas acuáticas.

Estudios previos han demostrado que NaCl en el efluente es un límite resistente al crecimiento de las plantas acuáticas; por ejemplo el límite de sal en el medio acuático que puede absorber la *Lemna Mnor* (una de las plantas acuáticas que se analizó) es de 0.7% y su resistencia a los límites de álcalis es de 0.3%.⁽²⁾

En la mayoría de los casos de tratamiento de aguas residuales mediante plantas acuáticas, los nutrientes como el P seguirá siendo absorbida aun después que el NTK fuera consumido del efluente. (Ver [3])

En esta parte del proyecto se analizaron las plantas acuáticas, donde las condiciones ambientales son las mismas tanto para la *Lemna Minor* como para la *Eichhnia Crassipes* que se analizaron en CITRAR donde fueron expuestos a otras condiciones ambientales y donde además las características fisicoquímicas y bacteriológicas del desagüe son distintas.

Una de las características que poseen estas plantas acuáticas es de formar un colchón sobre la superficie del agua donde no permitirían hacer pasar la luz solar e incluso habría condiciones anaerobias en la masa de agua a tratar. Sin embargo tenemos que observar que estas plantas acuáticas también cumplen

su ciclo de vida de las cuales la absorción se hace una limitante a la capacidad de remoción de nutrientes, para ello se removerá periódicamente las plantas flotantes.

Generalmente estas plantas acuáticas crecen favorablemente sobre una zona sin movimiento, libre de competidores como algas, insectos y enfermedades. Las floraciones de algas compiten por nutrientes y provocan un cambio en la circulación del agua en pH, turbiedad, OD.

La absorción por estas especies puede variar gradualmente a través de la solución nutritiva dependiendo de la concentración de nutrientes en el medio hasta el 3er y/o 8vo día de crecimiento.

2.2.3. Justificación de la investigación

La necesidad de un tratamiento terciario o avanzado se ha hecho necesaria más allá del tratamiento secundario de aguas residuales para los compuestos de NTK y P, metales en solución y DQO soluble.

La inmensa mayoría de estos tratamientos son complejos y pueden representar un porcentaje muy elevado de los costos totales de tratamiento. Los procesos de eliminación de nutrientes, generalmente clasificados como de tratamiento terciario, consisten básicamente en productos químicos-biológicos, físico-químicos, bioquímicos, y los sistemas biológicos.

Estos sistemas han mejorado de modo que han hecho posible que la eliminación de nutrientes sea casi completa. Sin embargo, el costo del tratamiento es cada vez más alto. Recientemente, varias plantas acuáticas se han propuesto para la eliminación de los nutrientes de N y P. La presencia de nitrógeno amoniacal en el efluente de las aguas residuales provoca graves desequilibrios en la naturaleza por ser responsable en parte de la eutrofización de lagos y embalses, y consume el oxígeno disuelto en las aguas, son corrosivos y la demanda de utilizar cloro para una alta desinfección del efluente de la planta de tratamiento secundario.

La concentración de nutrientes en estas tres plantas acuáticas varía mucho con el tipo del efluente de las PTAR, el clima de la región y el tipo de macrófita. Por

estos motivos estudiaremos los distintos comportamientos de las plantas acuáticas para estas variables con el fin de obtener un buen tratamiento de remoción de nutrientes.

2.3. OBJETIVO PRINCIPAL

- ❖ Reducir la contaminación en nuestro ecosistema como: la eutrofización de las fuentes, concentración de contaminantes en los cuerpos de agua, etc. Así contribuimos a la resolución de problemas concretos que afectan a nuestra sociedad.

2.4. OBJETIVOS SECUNDARIOS

- ❖ Mostrar una alternativa diferente de purificación de agua residual doméstica.
- ❖ Determinar las eficiencias o porcentajes de remoción, principalmente de nutrientes de Aguas Residuales Domésticas del Efluente de la Laguna Terciaria; mediante el cultivo de plantas acuáticas *Lemna Minor* (Lenteja de agua) y *Eichhorna Crassipes* (Jacinto de agua) en un sistema de Planta Piloto.
- ❖ Determinar el punto óptimo de crecimiento de las plantas acuáticas bajo condiciones controladas de cosecha; con la finalidad de obtener una producción por unidad de área.
- ❖ Evaluar las mejores condiciones ambientales, características fisicoquímicas y bacteriológicas para una eficiente remoción de los principales contaminantes de las Aguas Residuales Domésticas, mediante la concentración de las capacidades depuradoras de las plantas acuáticas; *Lemna Minor* (Lenteja de agua) y *Eichhorna Crassipes* (Jacinto de agua).

2.5. HIPÓTESIS

Una variante en la investigación sería el área de contacto de las plantas acuáticas, *Azolla Filiculoides*, *Lemna Minor* (Lenteja de agua), *Eichhorna*

Crassipes (Jacinto de agua), con el medio acuático en los estanques, con el propósito de que la masa de agua tenga roce con las raíces de las plantas.

Otras dos variables son el clima y el tipo de efluente utilizado, ya que son aspectos que varían la capacidad de remoción. La temperatura más baja reduce la eficiencia en la capacidad de absorción de nutrientes por plantas acuáticas como el fósforo y el nitrógeno.

La mayor cantidad de fósforo entregada por las aguas residuales domésticas aumenta la tasa de absorción de fósforo por las plantas acuáticas. El mejor crecimiento y la mayor remoción de nutrientes se obtendrá cuando el nivel de P es mayor que el nivel de N.

La lenteja de agua tendría mayor eficiencia en la remoción de nutrientes después del Jacinto de agua; y la *Azolla Filiculoides* tendría la menor eficiencia haciendo constante la temperatura con respecto a las otras plantas acuáticas.

En conclusión se busca que por medio de las tres plantas acuáticas, la eliminación de fósforo sea más alta en un 80% que la eliminación de nitrógeno (tres veces la remoción del nitrógeno), a excepción en la remoción de amonio con un 90%.

En relación al parámetro de la Demanda Bioquímica de Oxígeno, la eficiencia sería de un 60% cultivando homogéneamente a la Lenteja de agua y al Jacinto de agua.

2.6. VARIABLES DEL ESTUDIO

Dado que la presente tesis pretende explicar experimentalmente y en función a teorías las hipótesis planteadas, las variables e indicadores han sido clasificadas en el siguiente orden:

2.6.1. Variables Dependientes

Referido a aquellas características que sufren alteraciones por efecto de las variables independientes. Para el presente estudio las variables dependientes corresponden a:

- Especie de planta acuática
- Remoción de Fósforo (P)
- Remoción de Nitrógeno Amoniacal (NH_3)

2.6.2. Variables Independientes

Referido a aquellos factores cuya modificación origina la alteración de las variables dependientes. Para el presente estudio las variables independientes corresponden a:

- Área ocupada por la planta acuática.
- Características del efluente
- Cloruros
- Turbiedad
- Oxígeno Disuelto (OD)
- Evapotranspiración
- Conductividad

2.6.3. Variables Intervinientes

- Temperatura
- pH

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN UTILIZANDO AZOLLA F.

Inicialmente la investigación previa estaba orientada a evaluar y cuantificar los niveles de rendimiento de la macrófita *Azolla Filiculoides* en un sistema purificación del efluente de la PTAR de lodos activados de Suderburgo, en monocultivos; sin embargo se observó que la viabilidad técnica y las consecuencias de esta aplicación resultó ser no adecuada, por ello se optó a trabajar con muestras extraídas del sistema de lodos activados de esta PTAR.

En el presente capítulo se detallan los procedimientos, materiales y equipos técnicos que se emplearon en los diversos experimentos y poder así alcanzar nuestros objetivos.

3.1.1. Escenario de la Investigación

El proyecto de investigación que se realizó para la eliminación de nutrientes empleando *Azolla Filiculoides* se desarrollaron en la PTAR de la ciudad de Suderburgo (Alemania), y en el Laboratorio de la Universidad de Osfalia encontrándose a 2 km de la PTAR y ubicado en la misma ciudad.

3.1.2. Metodología del Cultivo

La metodología en este capítulo se basó en la utilización del Marco Teórico, que permitió:

- a) Describir la aplicación de nuevas especies de plantas flotantes en los sistemas de tratamientos, desarrollándose actividades adicionales como:
 - Analizar la fisiología de la especie *Azolla filiculoides*.
 - Determinar la capacidad de carga operacional (COP) para la especie *Azolla filiculoides*.

- b) Como tipo de fluido se realizaron tres ensayos de la *Azolla filiculoides*; primero la experimentación del crecimiento por tandas en tinajas, el

segundo a flujo continuo cultivados en tinajas y el tercer experimento se realizó por tandas en acuarios, siendo éstos más pequeños que las tinajas.

- c) Como tipo de medio de cultivo, se empleó el efluente del clarificador de la PTAR de Suderburgo para los dos primeros experimentos; y para el tercero se extrajo agua de la zanja de oxidación del sistema de Aireación I.

3.1.3. Infraestructura de los sistemas

El propósito de este análisis es la verificación de los tiempos de retención hidráulica en base a las mediciones de los caudales, y evaluar la posibilidad de incrementar el número de estanques o si la proyección con la cual están diseñados no afecta la calidad de los procesos de tratamiento. Se aprecia el amplio espacio con que cuenta el sistema teniendo posibilidad de incluir un número de estanques biológicos.

Como se sabe en Suderburgo se realizaron tres sistemas experimentales, siendo la más interesante el sistema “por tandas”. Se ha observado que ciertos roedores han podido ingresar a los estanques por lo que es necesario con cierta frecuencia su respectivo mantenimiento.

3.1.3.1. Sistema Por tandas

El sistema consta de un estanque de tratamiento, con dimensiones (0,30 m² de área) teniendo una capacidad de almacenamiento de sistema 90,60 dm³. La infraestructura del estanque es de plástico.

3.1.3.2. Sistema Continuo

El sistema consta de tres estanques de tratamiento con las mismas dimensiones mencionadas anteriormente, la conducción de las aguas se las realiza con una tubería PVC de 4”, con el 1% de pendiente al interior de cada estanque. Las separaciones entre estanques son de 10 cm, distancia considerada recomendable que permite trabajar con seguridad durante las cosechas y manipular herramientas como baldes para la recolección de biomasa sin dificultad.

El comportamiento de caudal en este sistema continuo fue de 7.3 l/min. Se determinó el **TRH** que para este sistema fluctuó entre 6.2 min, y de acuerdo a Gaibor (2005) el sistema podría haberse diseñado para que los procesos de depuración se generen en 8 días, la disminución del tiempo de retención es debido al incremento del caudal.

3.1.3.3. Sistema Por tandas en acuarios

El sistema consta de seis estanques de tratamiento, con dimensiones (19.5 cm de ancho x 39.0 cm de largo x 19.0 cm de profundidad media) teniendo una capacidad de almacenamiento de sistema 10 L. La infraestructura de estanque fue de vidrio.

3.1.4. Crecimiento de la *Azolla Filiculoides*

3.1.4.1. Ubicación de los Reactores para el Cultivo de la *Azolla*. f.

A. Ubicación del primer y segundo experimento

Las tinajas para el cultivo de la *Azolla* en el primer y segundo experimento que fueron realizadas en la PTAR de Suderburgo, se ubicaron a un lado de la pared perimétrica en dirección este de la PTAR. Esta se ubicó a tres metros del sistema de clarificador y en el perímetro de la PTAR de Suderburgo como se observa en la Figura 3.1. Los análisis se realizaron en el laboratorio de la Universidad de Luneburgo, Campus Suderburgo.



Figura 3. 1: Se señala la ubicación de los reactores utilizados en los dos primeros experimentos en el Año 2009.

B. Ubicación del tercer experimento

Los acuarios para el cultivo de la *Azolla F.* en el tercer experimento fueron ubicados en el laboratorio de la Universidad anfitriona Osfalia. Había que conseguir los recipientes adecuados, se descartaron los recipientes metálicos por ser costosos y además retenían en mayor cantidad la luz solar, lo que elevaría la evapotranspiración en el cultivo de la *Azolla F.* y finalmente se optó por las tinajas de plásticos o de vidrio.

3.1.4.2. Elección de la Planta Acuática *Azolla Filiculoides*

La base científica para el tratamiento de aguas residuales de un sistema de plantas acuáticas es la cooperación entre las plantas y los microorganismos asociados a ellas, pues hay investigaciones que indican una tasa de crecimiento alta de este helecho porque cuando los microorganismos se establecen en las raíces de las plantas, se crea una relación sinérgica entre ambas partes, esto significa una mejor eliminación y degradación de compuestos orgánicos. (Ver [1] y [3])

Las muestras de la planta acuática, *Azolla Filiculoides*, empleadas para esta investigación fueron recolectados de los estanques del invernadero NordoFolkecenter ubicado en el país de Dinamarca (aproximadamente 500 km desde Suderburgo); además este invernáculo utiliza al helecho para generar energía renovable. Los experimentos y estudios de campo de este proyecto se realizaron entre julio y octubre del 2009 en una PTAR de la ciudad de Suderburgo.

Es un helecho de tamaño pequeño que crece de manera natural en lagunas de poca profundidad y flujo lento, crece casi en todas partes del Perú y el mundo, pero abunda más en la región suni peruana (3,400-3,800 msnm). Cuando está joven, su color es verde con ligeras manchas rojas en el borde de sus pequeñas hojas, al envejecer se vuelve completamente roja. (Ver [21])

3.1.4.3. Descripción de las Tinajas y Acuarios de Cultivo

A. Tinajas

Se usaron tinajas o reactores de plástico negro de profundidad 35 cm, de ancho 72 cm y de largo 42 cm haciendo un volumen de 121 litros de capacidad y un área de 30.2 dm² como se muestra en la Figura 3.2. Estos reactores se utilizaron en todos los experimentos que se irán mencionando. En estos experimentos se utilizó el 87.5% de su altura total.

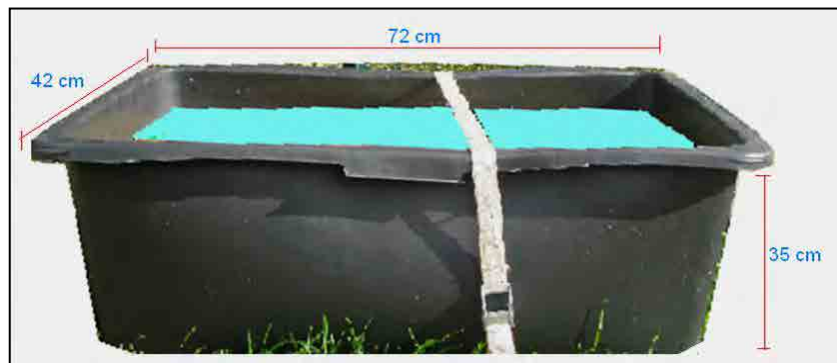


Figura 3. 2: Se muestra el reactor que se uso en los dos primeros experimentos (Año 2009).

B. Acuarios

Se usaron reactores de vidrio de profundidad 19 cm, de ancho 19.5 cm y de largo 39 cm haciendo un volumen de 14.45 litros de capacidad y un área de 7.60 dm² como se muestra en la Figura 3.3. Estos reactores se utilizaron en todos los experimentos que se irán mencionando. En estos experimentos se utilizó el 87.5% de su altura total.

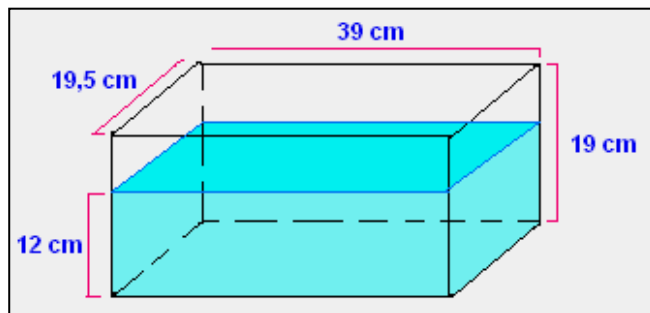


Figura 3. 3: Se muestra el reactor que se utilizó en el tercer experimento (Año 2009).

3.1.4.4. Frecuencia y puntos de medición del Peso de la biomasa

A continuación se muestra la metodología de medición de la biomasa en los tres experimentos realizados.

A. Medición de la Biomasa en el Sistema por Tandas

La medición del peso fresco en este sistema (un reactor) tuvo una frecuencia variable; es decir en verano la evaluación se realizó sólo cada 4 días; en otoño e invierno en 7 días. En cada intento no hubo cosecha o extracción del hehecho, tomando una duración de 13 días en verano y 28 días como promedio en otoño e invierno.

B. Medición de la Biomasa en el Sistema de Flujo Continuo

La medición del peso fresco de todo la planta por estanque, en este sistema (tres reactores en serie), tuvo una frecuencia variable; es decir en verano la cosecha se realizó de 1 a 4 días y en otoño de 7 días, dejando el 50% del área libre en cada estanque. Además se pesó el hehecho que se cosechaba determinándose por diferencia la biomasa que quedaba en cada estanque.

C. Medición de la Biomasa en el Sistema por Tandas en Acuarios

La medición del peso fresco en este sistema (un acuario) tuvo una frecuencia similar; es decir en el primer y segundo intento, la evaluación se realizó cada 9 días. En cada intento no hubo cosecha o extracción del hehecho, tomando una duración de 25 días en el primer intento y 35 días en el segundo intento.



Figura 3. 4: Se muestra las distintas balanzas utilizadas en laboratorio y en campo (Año 2009).

3.1.5. Descripción de los Experimentos realizados

La muestra de agua residual se extrajo del efluente del clarificador de la PTAR-Sudburgo como se muestra en la Figura 3.5, ésta muestra se empleó en el primer y segundo experimento en las épocas de verano, otoño e invierno.



Figura 3. 5: Se muestra la captación para los sistemas por tandas y de flujo continuo (Año 2009).

3.1.5.1. Primer Experimento – Por Tandas

Para la estimación del crecimiento se instaló una tinaja de cultivo en donde se almacenó el efluente del clarificador.

A. Criterios de diseño

Este sistema simula a una laguna pequeña con agua estancada o por tandas para cultivar la *Azolla*.

Dificultades: La principal dificultad fue la presencia de roedores debido a que alrededor de la PTAR existen áreas agrícolas y ganaderas.

B. Equipos y materiales de medición en campo

En la Tabla 3.1 listamos los equipos y materiales que fueron utilizados de forma específica durante el desarrollo del proyecto. Se detallan los materiales, reactivos y equipos empleados en las diferentes etapas de la investigación.

Tabla 3. 1: Detalle de materiales, equipos de muestreo y materiales de siembra (Año 2009).

MATERIALES DE CAMPO		MATERIALES MUESTREO	
Guantes de caucho y quirúrgicos		Recipientes de transporte de especies vegetales	
Mascarillas			
Libretas de campo		Rotulador	
Placa de vidrio		Alcohol industrial y antiséptico	
Un envase de plástico para la muestra		Cinta métrica	
MATERIALES DE SIEMBRA			
<i>Azolla filiculoides</i>			
EQUIPOS			
Oxímetro		Balanza de campo automática	
Conductímetro		Ph	

C. Tiempo de estancamiento en los sistemas "Por Tandas"

El tiempo de estancamiento promedio tomado fue de 7 días, elegido en base a investigaciones recientes. Las mediciones de pH, temperatura; se realizaron regularmente dentro del sistema. Por lo tanto, apoyado en el tiempo de residencia teórico, es posible establecer valores de reducción de los parámetros analizados.



Figura 3. 6: El 1er mes se cultivo sin cubierta en contacto con la lluvia (Año 2009).



Figura 3. 7: A partir del segundo mes se cultivo con cubierta evitando el contacto con la lluvia (Año 2009).

Como se muestra en la Figura 3.6, es un sistema sin flujo discontinuo o estático. En este primer intento (primer mes), no se instaló la placa de vidrio por encima del reactor. La eliminación de nutrientes mediante el crecimiento del helecho en este sistema se llevó a cabo mensualmente haciendo un total de 4 intentos en distintos meses, las diferentes condiciones ambientales para cada mes se muestran en la Tabla 3.2. A partir del segundo mes (Agosto), se instaló la placa de vidrio encima del reactor dejando espacios a los costados para la transferencia de Oxígeno y evitar el contacto con la lluvia.

Tabla 3. 2: Condiciones ambientales mensuales que afectan en la remoción de nutrientes (Año 2009).

Parámetros Ambientales / Mes	Julio	Agosto	Septiembre	Noviembre
Horas de sol al día	6.4	6.4	4.6	2.5
Temperatura media noche(°C)	12	11.7	9.4	4.2
Días de lluvia al mes	10	10	9	10
La temperatura ambiental (°C)	20.6	17	13	10.8
pH promedio	7.18	7.7	7.7	7.4
Precipitación (cm)	4.38	3.01	2.28	2

D. Pruebas realizadas

Las pruebas que se realizaron en campo y laboratorio se hicieron con la finalidad de observar la variación en el tiempo de los parámetros de calidad de agua residual tratada. Estas pruebas no solamente consistieron en hallar el porcentaje de remoción, sino apreciar semanalmente como era la variación de éstos.

Los análisis que se realizaron fueron de Nitrógeno Total, Fósforo Total, DBO₅ (Demanda Bioquímica de Oxígeno), las cuales se midieron cada semana con el fin de investigar si la remoción era rápida o lenta, durante el tiempo de funcionamiento del experimento.

Como en nuestro diseño el periodo de retención fue asumido para siete días (donde asumimos el volumen de 121 litros y un área superficial de 30 dm², y con estos datos se pudo calcular el caudal en la entrada del sistema), esto fue porque hay investigaciones con otras plantas acuáticas, donde tomaban periodos de remoción mayores a 4 días, se buscó poder observar mediante graficas la variación de los diversos parámetros en el tiempo y así poder observar si era factible este periodo de retención.

Las mediciones de nutrientes como el Nitrógeno Total y Fósforo Total fueron los objetivos a alcanzar en esta investigación. Para esta evaluación se buscó el uso positivo para tratar el agua residual, reduciendo los niveles de concentración de nutrientes y disminuyendo el riesgo de la Eutrofización en el cuerpo receptor a donde se vierte el agua tratada. Además los nutrientes como del Nitrógeno Total y Fosforo Total son importantes ya que son alimentos para diversas plantas acuáticas que pueden ser de uso posterior.

La demanda química de oxígeno (DQO) es un indicador de las sustancias orgánicas biodegradables y no biodegradables con una solución de dicromato, algunos compuestos orgánicos como lignina que pueden ser oxidados químicamente, y la concentración es mayor que la DBO₅.



Figura 3. 8: Fotografía del primer experimento en pleno funcionamiento (Año 2009).

E. Frecuencia y puntos de medición de las variables de investigación

Se utilizó un solo reactor desde el 16 de Julio hasta el 13 de Noviembre del 2009 haciendo un total de 4 meses, de tal forma que al final podamos observar el comportamiento de estos con el helecho. La frecuencia de medición se realizó cada semana de todos los parámetros señalados, y el punto de medición se tomó del centro del reactor del medio del cultivo.



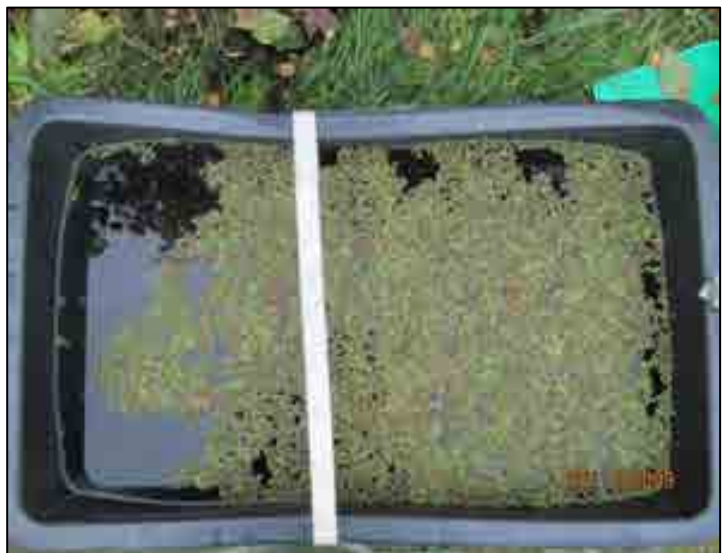
Figura 3. 9: Se señala el cultivo de la Azolla f. al inicio del primer experimento (julio 2009) con un crecimiento favorable de 72.48 g/d.

Figura 3. 10: Se señala el cultivo de la Azolla f. del primer experimento (Agosto 2009) con un crecimiento menor de 9.90 g/d.



Figura 3. 11: Se señala el cultivo de la Azolla f. del primer experimento (Septiembre 2009) con un crecimiento poco favorable de 12.29 g/d.

Figura 3. 12: Se señala el cultivo de la Azolla f. del primer experimento (Octubre 2009) con un crecimiento mucho menor de 7.18 g/d.



3.1.5.2. Segundo Experimento – Flujo Continuo

Para evaluar la capacidad de una laguna de purificación con *Azolla*, se utilizó un experimento para simular una laguna con pequeñas dimensiones. Así, fue posible evaluar las ventajas y desventajas de una laguna de macrófitas considerado como un complemento al tratamiento existente.

A. Criterios de diseño

Se utilizaron tres reactores en serie en un periodo desde 2 de julio al 5 de octubre. Se instalaron los reactores en serie de tal forma que al final podamos observar el comportamiento de estos con las plantas acuáticas, trabajando por sifón mediante una válvula y una pequeña separación para tomar muestras en la captación. Además se instaló un sistema de tuberías de tal manera que casi toda la masa de agua esté en contacto con las plantas acuáticas y satisfacer a las raíces de las plantas acuáticas para su desarrollo y crecimiento.

Para evaluar la capacidad de una laguna de purificación con *Azolla*, se utilizaron lagunas de pequeñas dimensiones con un caudal promedio de 7.3 l / min. Este sistema ha sido de entrada suministrado por el efluente del clarificador para evaluar su funcionamiento. Así, fue posible evaluar las ventajas y desventajas de una laguna de macrófitas considerado como un complemento al tratamiento existente.

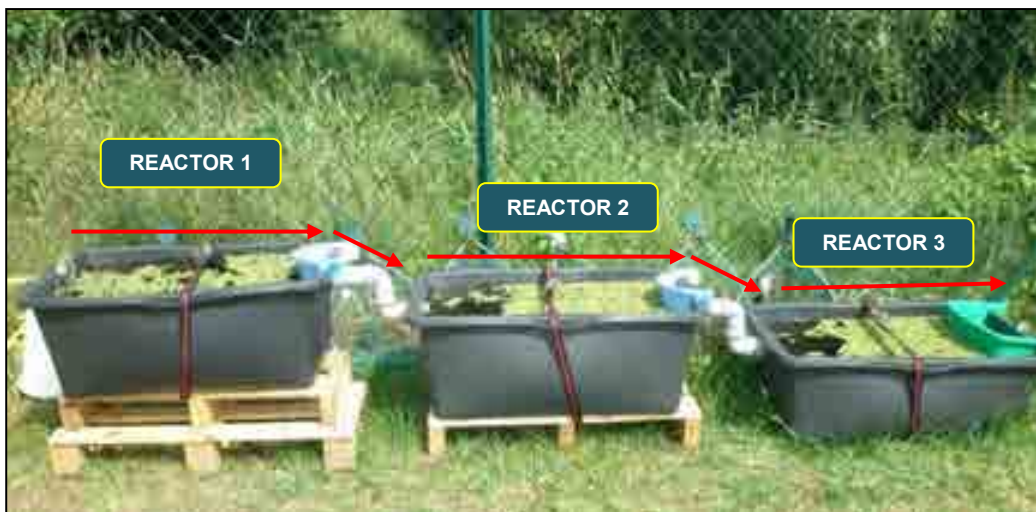


Figura 3. 13: Segundo experimento para la determinación de remoción de nutrientes (Suderburgo- Año 2009).

Las condiciones ambientales para la eliminación de nutrientes sobre el crecimiento de *Azolla filiculoides* en flujo turbulento.

Tabla 3. 3: Condiciones ambientales mensuales que afectan en la remoción de nutrientes (Suderburgo- Año 2009).

Parámetros Ambientales / Mes	Julio	Agosto	Septiembre	Noviembre
Horas de sol al día	6.4	6.4	4.6	2.5
Temperatura media noche(°C)	12	11.7	9.4	4.2
Días de lluvia al mes	10	10	9	10
La temperatura ambiental (°C)	20.6	17	13	10.8
pH promedio	7.18	7.7	7.7	7.4
Precipitación (cm)	4.38	3.01	2.28	2.33

B. Equipos y materiales de medición en campo

En la Tabla 3.4 listamos los equipos y materiales que fueron utilizados de forma específica durante el desarrollo de este experimento. Se detallan los materiales, reactivos y equipos empleados en las diferentes etapas de la investigación.

Tabla 3. 4: Detalle de materiales, equipos de muestreo y materiales de siembra (Suderburgo- Año 2009).

MATERIALES DE CAMPO		MATERIALES MUESTREO	
Guantes de caucho y quirúrgicos	Mascarillas	Recipientes de transporte de especies vegetales	
Libretas de campo	Tres envases de plástico para las muestras	Rotulador	Bancos de madera
Manguera de PVC ½"	Alcohol industrial y antiséptico	Cinta métrica	Tuberías y accesorios de PVC ½"
MATERIALES DE SIEMBRA			
<i>Azolla filiculoides</i>			
EQUIPOS			
Oxímetro	Conductímetro	Balanza de campo automática	Ph

C. Descripción de los reactores de cultivo

La planta piloto se conformó de 3 unidades: la primera fue para regular el caudal de ingreso, y las tres llamadas lagunas con *Azolla* quienes realizaban el tratamiento de agua residual del efluente del clarificador mediante la planta acuática *Azolla*.

Existió desnivel entre los niveles del clarificador y de la planta piloto. Para vencer el desnivel se bombeó agua mediante una bomba de funcionamiento eléctrico, a través de una manguera desde el efluente del clarificador hasta la planta piloto.

D. Frecuencia y puntos de medición de las variables de investigación

La frecuencia de medición se realizó cada semana de todos los parámetros señalados, y los puntos de medición que se tomaron fueron; del afluente del primer reactor; del centro del segundo reactor y del efluente del tercer reactor.

El tiempo de retención promedio de 7 días fue elegido sobre la base de la literatura. Las mediciones de pH, temperatura, turbidez, DBO₅, se realizaron regularmente dentro y fuera del sistema. Por lo tanto, basado en el tiempo de residencia teórico, es posible establecer valores de reducción de los parámetros analizados.

E. Tiempo de retención hidráulica en los sistemas de "Flujo Continuo"

El TRH promedio tomado fue muy pequeño (menor a un día en cada reactor), elegido en un primer intento. En este experimento, pudo conocerse el comportamiento de la *Azolla f.* en un tipo de medio acuático donde crece con mayor eficiencia según la estación (verano u otoño). Las mediciones de pH, temperatura; se realizaron regularmente dentro del sistema.

F. Determinación de la carga en flujo continuo

Se indicará la cantidad de biomasa fresca definido como **COP_A** en g/d para el sistema de flujo continuo con el fin de determinar el periodo óptimo de cosecha de la *Azolla filiculoides*, y para evaluar la capacidad máxima en cuanto a la remoción de nutrientes. Sin embargo en el desarrollo de este experimento se presentaron complicaciones para medir la evaluación en la remoción de nutrientes debido al tiempo de retención al que se trabajó.

➤ **Rendimiento de la Biomasa Fresca**

El rendimiento máximo de biomasa indica la cantidad apropiada para la cosecha en los estanques de tratamiento y de esta manera se mantendrán las densidades adecuadas, disminuyendo la competencia entre individuos de la misma especie por nutrientes, espacio y luz.

En este experimento cada estanque representa el cultivo del helecho que se va cosechando según llegue a tener una cobertura de casi el 100% del área. Con el objetivo de determinar el peso total de la Azolla que cubría en cada estanque durante todo el cultivo, se extraía todo el helecho para luego ser pesado.

A continuación se mostrará para mayor entendimiento la fórmula de obtención de la Biomasa Acumulada:

$$Biomasa\ Total(n + 1) = Biomasa\ actual\ (reactor) + \sum_{n=1}^n (Biomasa\ Cosechada)$$

Donde **n** representa las veces de cosecha de la *Azolla Filiculoides*.

➤ **Rendimiento de la Biomasa Seca**

La producción de biomasa seca indica la cantidad de cosecha en peso seco contenida en los estanques de tratamiento y de esta manera se obtendrán las densidades.

➤ **Carga Operacional de la Azolla Fresca**

La Carga Operacional indica la cantidad apropiada en estado fresco de la Azolla para la cosecha en los estanques de tratamiento y de esta manera se mantendrán densidades adecuadas.

A continuación se mostrará para mayor entendimiento la fórmula de obtención de la COP_A:

$$COP_A = \frac{Cantidad\ de\ Cosecha}{Dia\ en\ que\ se\ cosechó - Día\ de\ la\ última\ Cosecha}$$

➤ **Carga Operacional de la Azolla Seca**

La Carga Operacional indica la cantidad apropiada en estado seco de la Azolla para la cosecha en los estanques de tratamiento.

➤ **Densidad de Peso Húmedo por Superficie**

La Densidad de Peso Húmedo por Superficie indica la cantidad de planta acuática por cm^2 y por día de cultivo. La Densidad de Peso Húmedo **D**, se obtiene de la división de la COP_A crítica entre el área. A continuación se mostrará para mayor entendimiento la fórmula de obtención de la COP_A :

$$\text{Densidad de peso húmedo de la Azolla} = \frac{\text{Carga Operacional Crítica de la Azolla}}{\text{Área superficial del reactor}}$$

$$\text{Cantidad de helecho cosechada por } \text{m}^2 = \text{Densidad en PF} \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2} \times t \text{ días} = \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

La siguiente fórmula muestra el método en la obtención de la relación B/B_a :

$$\text{Relación de la Biomasa en cada Cosecha (B/B}_a) = \frac{\text{Biomasa actual}}{\text{Biomasa anterior}}$$

➤ **Densidad de Peso Seco por Superficie**

El método de Cálculo de la tasa de crecimiento en peso seco de la *Azolla Filiculoides* se determinó de la siguiente manera:

$$\text{Densidad en PS} = \text{Densidad en PF} \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2} / d \times 1000 \times \% \text{ PF} = \frac{\text{g}}{\text{m}^2} / d$$

Nota: PF significa Peso Fresco o con humedad.

PS significa Peso Seco.

G. Fotografías del segundo experimento en pleno funcionamiento



← REACTOR 1

Figura 3. 14: Primer reactor con Azolla del segundo experimento para la determinación de la remoción de nutrientes (Año 2009).

REACTOR 2 →



Figura 3. 15: Segundo reactor con Azolla de la planta piloto para la determinación de la remoción de nutrientes (Año 2009).



← REACTOR 3

Figura 3. 16: Tercer reactor con Azolla de la planta piloto para la determinación de la remoción de nutrientes (Año 2009).

3.1.5.3. Tercer Experimento – Por Tandas en Acuarios

A. Criterios de diseño

Antes de definir al medio que se utilizó para el cultivo de la *Azolla Filiculoides*, se detalla las siguientes muestras que se empleó en este Sistema Por Tandas:

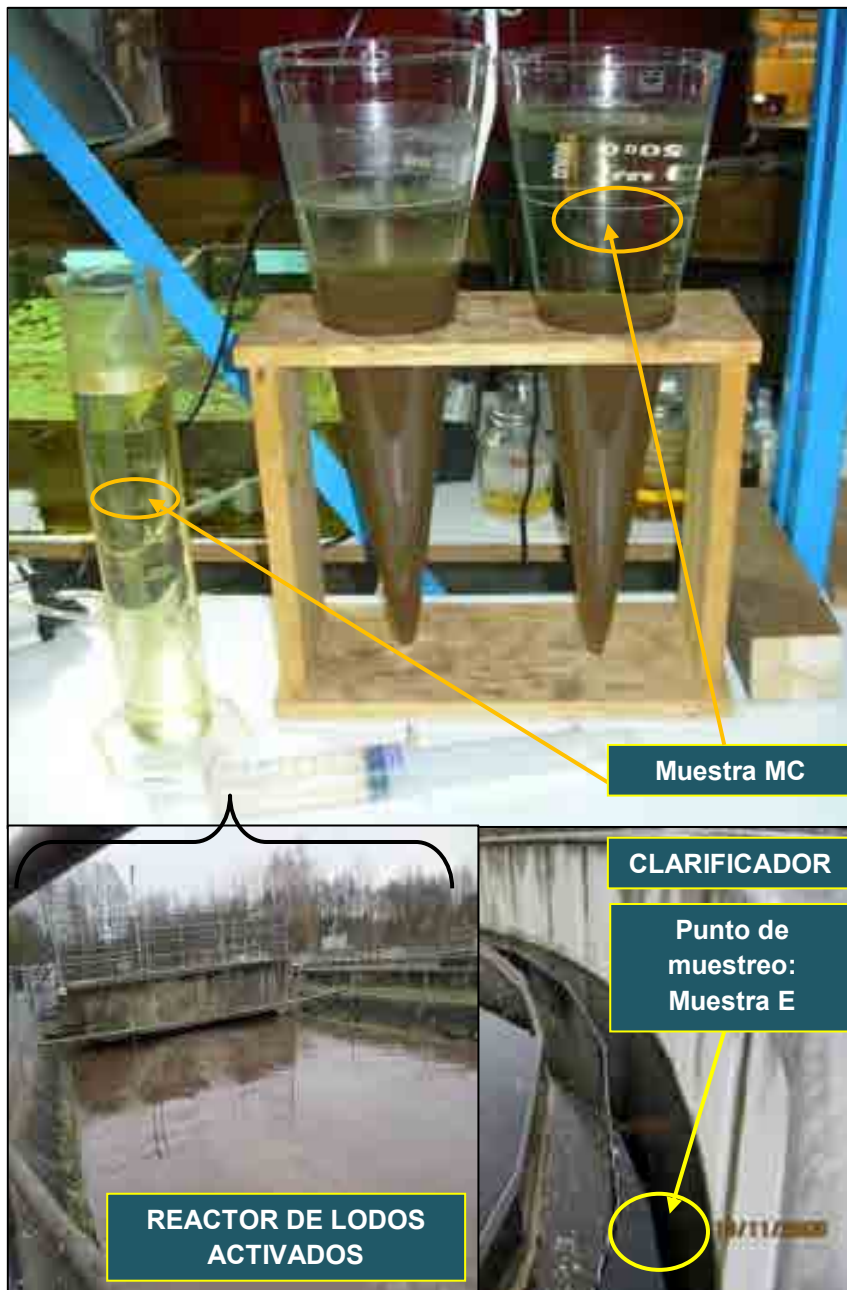


Figura 3. 17: Vista de las muestras que se utilizó en este experimento (Suderburgo-Año 2009).

Muestra clarificada o Solución de nutrientes (MC)

Al principio las muestras de lodos o lodos activados fueron tomadas del sistema de lodos activados de la PTAR-Suderburgo, es decir se escogió este medio de cultivo por tener alto contenido de nutrientes necesarios para el desarrollo y crecimiento de este helecho acuático. Luego esta muestra se lleno en el cono Inhoff obteniéndose dos medios; uno el precipitado del lodo activado o biomasa decantada, y el otro el clarificado siendo esta la muestra MC.

Muestra del efluente del clarificador (E)

Es la muestra del efluente del clarificador de la PTAR de Suderburgo que ha sido utilizado en los anteriores experimentos.

Desde el 19 de agosto hasta el 2 de noviembre, se utilizaron seis acuarios (cada reactor con un volumen de 10 litros) por mes y para cada experimento. El medio acuático es una mezcla de las mencionadas anteriormente, con porcentajes específicos del clarificador (**E**) y de la muestra clarificada (**MC**), este último en un 13% y 15% del volumen total.

Es decir se procedió con dos intentos o experimentos en la cual el contenido para cada intento fue de un 13 y 15% de "**MC**" y el resto de "**E**" con la finalidad de obtener mayor porcentaje de nutrientes.

B. Equipos y materiales de medición en laboratorio

En la Tabla 3.5 listamos los equipos y materiales que fueron utilizados de forma específica durante el desarrollo del sistema con acuarios. Se detallan los materiales, reactivos y equipos empleados en las diferentes etapas de la investigación.

Tabla 3. 5: Detalle de materiales, equipos de muestreo y materiales de siembra (Suderburgo-Año 2009).

MATERIALES DE CAMPO		MATERIALES MUESTREO	
Guantes de caucho y quirúrgicos	Mascarillas	Recipientes de transporte de especies vegetales	
Libretas de campo		Rotulador	
Cinta métrica		Alcohol industrial y antiséptico	
Seis acuarios para las muestras		Cono Inhoff	
MATERIALES DE SIEMBRA: <i>Azolla filiculoides</i>			
EQUIPOS			
Oxímetro		Balanza de campo automática	
Conductímetro		Ph	

C. Pruebas realizadas

Las pruebas que se realizaron en laboratorio se hicieron con la finalidad de observar la variación en el tiempo de los parámetros de calidad de agua residual tratada. Estas pruebas no solamente consistieron en hallar el porcentaje de remoción, sino apreciar semanalmente como era la variación de éstos.

Los análisis que se realizaron fueron de pH, Temperatura, Conductividad, Cloruro, Nitrógeno Total, Amonio, Nitrate, Nitrito, Fósforo Total, Orto fosfato, DQO (Demanda Química de Oxígeno), COT, fluoruro y sulfuro, las cuales se midieron cada semana con el fin de investigar si la remoción era rápida o lenta, durante el tiempo de funcionamiento. Las mediciones de nutrientes como el Nitrógeno Total y Fósforo Total fueron los objetivos a alcanzar en esta investigación. Además los nutrientes como del Nitrógeno Total y Fosforo Total son importantes ya que son alimentos para *Azolla filiculoides*.

Intento 1: En la Tabla 3.6 se observa la manipulación incrementando nutrientes a cada acuario, sin embargo para este intento se tomo el promedio general de los 3 reactores (cada estanque es el promedio de dos estanques).

Tabla 3. 6: Adición de nutrientes en los acuarios del 1er intento (Año 2009).

Solución	Nº Estanques	Solución E (litros)	Solución de nutrientes MC (litros)		
			Inicio	2da semana	4ta semana
A	2	9.5	0.5	0.8	0.3
B	2	9.0	1.0	0.8	0.3
C	2	7.5	2.5	0.5	0.3

Los reactores se instalaron cerca de una ventana de laboratorio, además se usaron focos con más potencia (> 100 watts).

Intento 2: En la Tabla 3.7 se observa la manipulación incrementando nutrientes a cada acuario, sin embargo para este intento se tomó el promedio general de los 2 reactores (cada estanque es el promedio de tres estanques).

Tabla 3. 7: Adición de nutrientes en los acuarios del 2do intento (Año 2009).

Solución	Nº Estanques	Solución E (litros)	Solución de nutrientes MC (litros)
			Inicio
A	1	9.0	1.0
B	2	8.0	2.0

D. Frecuencia y puntos de medición de las variables de investigación

La frecuencia de medición se realizó cada semana de todos los parámetros señalados, y el punto de medición se tomó del centro del reactor del medio del cultivo.



Figura 3. 18: Vista del tercer experimento en pleno funcionamiento, haciendo la medición del pH (Suderburgo-Año 2009).

E. Determinación de la carga Por tandas en Acuarios

La cantidad de biomasa fresca COP_A se evaluó para concentraciones de 13 y 15% (muestras extraídas del reactor de lodos activados) de un volumen de 10 litros, con el que se trabajó en condiciones manipulables, tratando de que exista un equilibrio entre la capacidad de remoción de contaminantes en una sola cosecha. Para cada porcentaje o experimento se evaluaron en 6 acuarios obteniendo un solo valor promedio.

➤ *Producción de Biomasa*

La producción de biomasa indica la cantidad de cosecha en los acuarios de tratamiento y de esta manera se obtendrán las densidades.

➤ **Densidad de Remoción diaria de Fosforo Total**

Procedimiento: A continuación mostraremos las formulas que se utilizaron en cada paso del procedimiento de cálculo.

Paso 1: Cálculo de la Cantidad de Fósforo Total por acuario presente en la *Azolla* antes de ser cultivada.

$$FT \text{ en la Azolla precultivada} = \left(\frac{\text{Peso de la Azolla seca}}{\text{acuario}} \right) \times \left(\frac{FT \text{ en mg}}{Kg \text{ de Azolla seca}} \right)$$

Paso 2: Cálculo de la Cantidad de Fósforo Total por acuario presente en la *Azolla* después de ser cultivada.

$$FT \text{ en la Azolla cosechada} = \left(\frac{\text{Peso de la Azolla seca}}{\text{acuario}} \right) \times \left(\frac{FT \text{ en mg}}{Kg \text{ de Azolla seca}} \right)$$

Paso 3: Cálculo de la Capacidad de Absorción de Fósforo Total por la *Azolla* en cada acuario.

$$\text{Absorción de FT por la Azolla} = FT \text{ Azolla cosechada} - FT \text{ Azolla precultivada}$$

Paso 4: Evaluación de la Capacidad de remoción por la *Azolla* f.

$$\text{Capacidad de remoción de FT (35 días)} = \left(\frac{\text{Absorción de FT}}{\text{acuario}} \right) \div \left(\frac{\text{Área del acuario}}{\text{acuario}} \right)$$

Paso 5: Evaluación de la Densidad de remoción diaria por la *Azolla* f.

$$\text{Densidad de remoción diaria de FT} = \left(\frac{\text{Capacidad de remoción de FT}}{\text{Tiempo de cultivo}} \right)$$

➤ **Depósito Acumulado de Fósforo Total en un Acuario**

El depósito acumulado de Fósforo Total será representado por la Cantidad de Fósforo Total presente en un acuario después de que la *Azolla* haya sido cultivada, en los rizomas y sedimentos; donde se sabe que en el primer día de cultivo solo existían el medio acuático y la planta acuática.

Procedimiento: A continuación mostraremos las formulas que se utilizaron en cada paso del procedimiento de cálculo.

Paso 1: Cálculo de la Capacidad de Absorción de Fósforo Total por los rizomas depositados. Los rizomas se encuentran depositados al fondo de cada acuario.

$$FT \text{ en rizomas por acuario} = \left(\frac{\text{Peso de Rizomas seco}}{\text{acuario}} \right) \times \left(\frac{FT \text{ en Rizomas en mg}}{Kg \text{ de Rizomas seco}} \right)$$

Paso 2: Cálculo de la capacidad de absorción de fósforo por los flóculos depositados.

$$FT \text{ en flóculos por acuario} = \left(\frac{\text{Peso de Flóculos seco}}{\text{acuario}} \right) \times \left(\frac{FT \text{ en Flóculos en mg}}{Kg \text{ de Flóculos seco}} \right)$$

Paso 3: Cálculo de la capacidad de absorción de fósforo en formas distintas al hehecho.

$$\left(\frac{FT \text{ en rizomas y flóculos}}{\text{acuario}} \right) = \left(\frac{FT \text{ en rizomas}}{\text{acuario}} \right) \times \left(\frac{FT \text{ en flóculos}}{\text{acuario}} \right)$$

Paso 4: Cálculo de la capacidad de absorción de fósforo en formas distintas al hehecho.

$$\left(\frac{FT \text{ en rizomas y flóculos}}{\text{acuario}} \right) = \left(\frac{FT \text{ en rizomas}}{\text{acuario}} \right) \times \left(\frac{FT \text{ en flóculos}}{\text{acuario}} \right)$$

Paso 5: Evaluación de la cantidad de fósforo **no removida** por la *Azolla f.*

$$\text{Capacidad de remoción de FT (35 días)} = \left(\frac{\text{Absorción de FT}}{\text{acuario}} \right) \div \left(\frac{\text{Área del acuario}}{\text{acuario}} \right)$$

Paso 6: Evaluación de la Densidad de Fósforo **no removida** por la *Azolla f.*

$$\text{Densidad de remoción diaria de FT} = \left(\frac{\text{Capacidad de remoción de FT}}{\text{Tiempo de cultivo}} \right)$$

➤ **Capacidad de Remoción de Fósforo**

A continuación mostraremos las fórmulas que se utilizaron en cada paso del procedimiento de cálculo.

Paso 1: Cálculo de la Capacidad de remoción total de Fósforo Total.

$$\text{Remoción de FT} = \text{Remoción de FT (Azolla)} + \text{Remoción de FT (sedimentación)}$$

Paso 2: Cálculo del Porcentaje de la Capacidad de remoción por parte de la Azolla.

$$\% \text{ de Remoción por Azolla} = \frac{\text{Remoción de FT por la Azolla}}{\text{Remoción Total de FT}} \times 100\%$$

Paso 3: Cálculo del Porcentaje de la Capacidad de remoción por la sedimentación.

$$\% \text{ de Remoción por Sedimentación} = 100\% - \% \text{ de Remoción por Azolla}$$

3.1.6. Pruebas de Laboratorio

3.1.6.1. Pruebas de Laboratorio con la Biomasa

Una vez cosechado o extraído la planta acuática del sistema, el helecho se utilizó para determinar el peso seco (PS) por gramo de planta acuática fresca (PF); y cantidad de materia orgánica por gramo de peso seco.

A. *Eliminación de humedad de la Azolla*

Para determinar la humedad de la planta acuática, procedemos del siguiente modo:

- Pesamos una cápsula perfectamente limpia y seca.
- Pesamos 5 g de muestra y los depositamos sobre la cápsula previamente pesada.
- Introducimos la cápsula en una estufa a unos 105° C durante media hora.
- Dejamos que se enfríe en un desecador.
- Una vez fría, pesamos la cápsula.
- Introducimos la cápsula nuevamente en la estufa y posteriormente en el desecador, repitiendo el proceso hasta pesada constante.



Figura 3. 19: Muestras de las plantas extraídas de cada acuario, colocadas en vasos de vidrio (Año 2009).



Figura 3. 20: Vista de la balanza electrónica utilizada para la medición de los pesos en cada capsula (Año 2009).



Figura 3. 21: Las seis capsulas con la Azolla filiculoides listas para llevarlas a la estufa (Año 2009).



Figura 3. 22: Vista exterior de la Estufa utilizada a una temperatura de 105°C (Año 2009).



Figura 3. 23: Estufa para una temperatura de 105°C (Año 2009).



Figura 3. 24: Mufla para una temperatura de 550°C (Año 2009).

B. Determinación de materia orgánica (M.O)

El procedimiento a seguir para su determinación es el siguiente:

- Pesamos una cápsula perfectamente limpia y seca.
- Añadimos 5 g de muestra seca a analizar.
- Llevamos a la mufla (550° C aproximadamente) durante una media hora y ponemos la cápsula en un desecador para su enfriamiento.
- Pesamos la cápsula.
- Repetimos el proceso de la mufla y el desecador hasta pesada constante.

La materia orgánica en presencia de oxígeno y a altas temperaturas se oxida descomponiéndose en dióxido de carbono, agua y cenizas. El cálculo de la materia orgánica contenida en la muestra se realiza por diferencia en las pesadas.

C. Fotografías en el microscopio



Figura 3. 25: Microscopio utilizado en el laboratorio de la Universidad de Suderburgo (Año 2009).



Figura 3. 26: Microorganismo encontrado en el helecho *Azolla Filiculoides* (Año 2009).



Figura 3. 27: Microorganismos encontrados en el fondo de cada acuario (Año 2009).

D. Determinación del fósforo de la materia seca (P)

La concentración de fósforo en la cantidad seca de la *Azolla Filiculoides* se midió de acuerdo a la norma DIN 51363-2, norma técnica dada en el año 2003. Se realizó la determinación del contenido de fósforo mediante el análisis de la longitud de onda dispersiva de espectrometría de rayos X.



Figura 3. 28: Vista de un acuario, con tres distintas muestras, *Azolla filiculoides*, rizomas y lodo depositado en cada acuario (Año 2009).

En la Figura 3.28, se puede observar las tres muestras; el helecho flotando sobre la superficie, las rizomas y lodos depositados al fondo de cada acuario; las cuales se analizó a cada una de ellas, para el análisis de fósforo presente en cada componente de un acuario cultivado con *Azolla filiculoides* para este experimento. Para este análisis se utilizó la materia seca de estas tres muestras que se muestran en la figura anterior.



Figura 3. 29: Extracción del medio mediante una bombilla, dejando a las rizomas y al lodo depositado en cada acuario (Año 2009).



Figura 3. 30: Rizomas y lodo depositado mediante la acción de sedimentación, después de retirarse el medio (Año 2009).



Figura 3. 31: Conos Inhoff utilizados para la extracción de los lodos que se depositaron en cada acuario (Año 2009).



Figura 3. 32: Cada cono depositó un volumen promedio de 14 ml de lodo en cada acuario (Año 2009).



Figura 3. 33: Colador utilizado para la extracción de las rizomas del conjunto de biomasa depositado al fondo de cada acuario (Año 2009).



Figura 3. 34: Llevado a la estufa a 105°C con el fin de obtener la materia seca (Año 2009).

3.2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN UTILIZANDO LEMNA M. Y EICHHORNIA C.

3.2.1. Escenario de la Investigación

El proyecto de Investigación para la eliminación de nutrientes empleando ambas plantas acuáticas se realizó en CITRAR, Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Facultad de Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería, ubicado en el distrito del Rímac (Lima).

3.2.2. Metodología en el Cultivo

La metodología se basó en la utilización del Marco Teórico, que permitió:

- a. Describir la aplicación de nuevas técnicas de remoción de nutrientes en los sistemas de tratamientos empleando plantas acuáticas superficiales, desarrollándose las siguientes actividades:
 - Analizar la fisiología de las especies *Eichhornia Crassipes* y *Lemna Minor*.
 - Determinar la capacidad de carga operacional (COP) para ambas especies.
- b. Esta investigación estaba dedicada a evaluar y cuantificar los niveles de rendimiento de las macrófitas *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor* en un sistema de purificación del efluente de la PTAR-CITRAR, en monocultivos (una especie de planta acuática); sin embargo se observó que la viabilidad técnica y las consecuencias de esta aplicación puede ser desfavorable.
- c. Como tipo de flujo se realizaron dos tipos de prueba; en primer lugar, la experimentación a flujo discontinuo o batch; y en segundo lugar, a flujo continuo. En ambos experimentos se usaron acuarios para el tratamiento con *Lemna minor* y *Eichhornia crassipes*.
- d. Como tipo de medio de cultivo, se empleó el efluente de la laguna terciaria para los dos experimentos.
- e. Formas de tratamiento o sistemas similares de tratamiento que podrían ser aplicados a nivel unifamiliar en comunidades rurales.

3.2.3. Crecimiento de las Plantas Acuáticas en Acuarios

3.2.3.1. Ubicación de los acuarios de Cultivo

Los estanques o reactores para el cultivo de las plantas acuáticas fueron ubicados en un estanque (aproximadamente 700 m²) de la PTAR-CITRAR (vacío), entre la laguna terciaria y el humedal de la PTAR situado en Lima-Perú y el desarrollo de la investigación se realizó en su laboratorio respectivo.

3.2.3.2. Descripción de los reactores de cultivo

Se utilizaron reactores de vidrio con las siguientes dimensiones: 40 cm de profundidad, 40 cm de ancho y 90 cm de largo, tal como se muestra en la Figura 3.35. El volumen efectivo de los reactores fue: 126 dm³ para el sistema batch y de 36 dm³ para el sistema continuo. Los reactores se alimentaron sin macrofitos al inicio de los experimentos y no hubo cosecha de plantas.

Las dos especies de macrófitas utilizadas *E. crassipes* y *L. minor* fueron colectadas de los estanques y lagunas de estabilización de CITRAR a 130 m.s.n.m (ref. CISMID) a Temperatura del medio a estudiar entre 40.9 °C a 19.4°C.durante 4 meses que duró la investigación.

Para el experimento, las macrofitas fueron lavadas con agua corriente y colocada en densidades suficientes para cubrir casi totalmente la superficie de los reactores de *L. minor* y de *E.crassipes*.

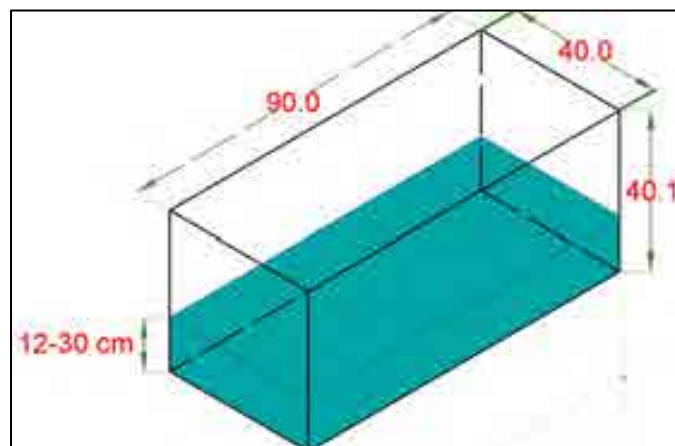


Figura 3. 35: Acuario empleado para los sistemas por tandas y de flujo continuo (CITRAR-Año 2010)

3.2.3.3. Descripción del medio acuático para el cultivo

La muestra de agua residual para este estudio, se extrajo del efluente de la segunda Laguna de estabilización de CITRAR como se muestra en la Figura 3.36, ésta muestra se empleó en el primer y segundo experimento solo en la época de verano.



Figura 3. 36: Se muestra la captación para los sistemas por tandas y de flujo continuo (CITRAR-Año 2010)

Se utilizó el efluente de la segunda laguna de estabilización de un sistema de tratamiento de aguas residuales doméstica de CITRAR, Lima. La investigación se inició con la instalación de los materiales y adaptación de la planta piloto al efluente de la Laguna Terciaria a tratar. El proyecto abarcó desde fines del mes de marzo hasta el mes de junio del año 2010.

Los sistemas empleados para el tratamiento de aguas residuales provenientes del efluente de la laguna terciaria de CITRAR, se trabajaron a escala de laboratorio en las cuales se cultivaron las plantas acuáticas *Lemna Minor* y *Eichhorna Crassipes*.

3.2.4. Infraestructura de los Sistemas

El propósito de este análisis es la verificación de los tiempos de retención hidráulica en base a las mediciones de los caudales con la cual están diseñados

para no afectar la calidad de los procesos de tratamiento.

Se aprecia tres estanques que se utiliza como criaderos de tilapias y el poco espacio con que cuenta el sistema sin poder incrementar el número de estanques como tratamiento biológico.

Como se señaló, se realizaron dos sistemas experimentales, siendo la más interesante el sistema de “flujo continuo”. Se ha observado que ciertos insectos pueden ingresar a los estanques por lo que es necesario el uso de mallas sin perjudicar al desarrollo del sistema.

3.2.4.1. Sistema Por tandas

El sistema consta de un estanque de tratamiento, con dimensiones (0.40 m ancho x 0.90 m largo x 0.10 m profundidad media) teniendo una capacidad de almacenamiento de sistema 0.036 m^3 . La infraestructura del estanque fue de vidrio.

A. Criterios de diseño

Este sistema simula a una laguna pequeña con agua estancada o por Tandas para cultivar la *Lemna*, *Eichhorna* y otro estanque sin planta acuática.

Dificultades: La principal dificultad fue la presencia de insectos y otros efectos ambientales biológicos.

B. Equipos y materiales de medición en campo

En la Tabla 3.8 listamos los equipos y materiales que fueron utilizados de forma específica durante el desarrollo del proyecto. Se detallan los materiales, reactivos y equipos empleados en las diferentes etapas (campo, laboratorio) de la investigación.

Tabla 3. 8: Detalle de materiales, equipos de muestreo y materiales de siembra (CITRAR-Año 2010)

MATERIALES DE CAMPO		MATERIALES MUESTREO	
Guantes de caucho y quirúrgicos		Recipientes de transporte de especies vegetales	
Mascarillas			
Libretas de campo		Rotulador	
Cinta métrica		Alcohol industrial y antiséptico	
Tres acuarios para las muestras			
MATERIALES DE SIEMBRA			
<i>Eichhornia crassipes</i> y <i>Lemna minor</i> .			
EQUIPOS			
Oxímetro		Balanza de campo automática	
Conductímetro		Ph	

C. Tiempo de retención hidráulica en los estanques

El tiempo de retención promedio tomado fue de 13 días, este valor se obtuvo hasta que una de las plantas ocupará el mayor porcentaje de área, en este caso ambas plantas lograron proliferar con mucha rapidez. En investigaciones anteriores se analizaban sólo para 7 días, sin embargo notemos que el periodo de retención depende del área de cultivo.

D. Frecuencia y puntos de medición de las variables de investigación

Las pruebas de los Análisis Físicoquímicos, se dieron inicio el viernes 26 de Marzo y finalizó el jueves 11 de Abril del 2010.

Las pruebas de Campo fueron: Temperatura, PH, Oxígeno Disuelto, Turbiedad se realizaron todos los días a las 13 horas. Las mediciones se realizaron regularmente dentro del sistema.

La medición de Oxígeno Disuelto y Temperatura, fueron monitoreados en las horas más representativas del día. Para realizar estas pruebas se tuvo que llevar el equipo Oxímetro de campo (HATCH).

Las Pruebas en el Laboratorio que fueron medidos con equipos electrónicos el PH y la Turbiedad. Estas mediciones fueron monitoreadas en las horas más representativas del día. Se tuvieron mucha información de estas pruebas, ya que se tuvo un potenciómetro para la medición de PH y un Turbidímetro cerca (Laboratorio de CITRAR).



Figura 3. 37: Medición de Oxígeno Disuelto en los tres estanques (CITRAR-Año 2010)

Solo se desarrollo una sola vez, es decir la frecuencia de medición se realizó diariamente por una semana de todos los parámetros señalados, y el punto de medición se tomó del centro de cada estanque del medio del cultivo.

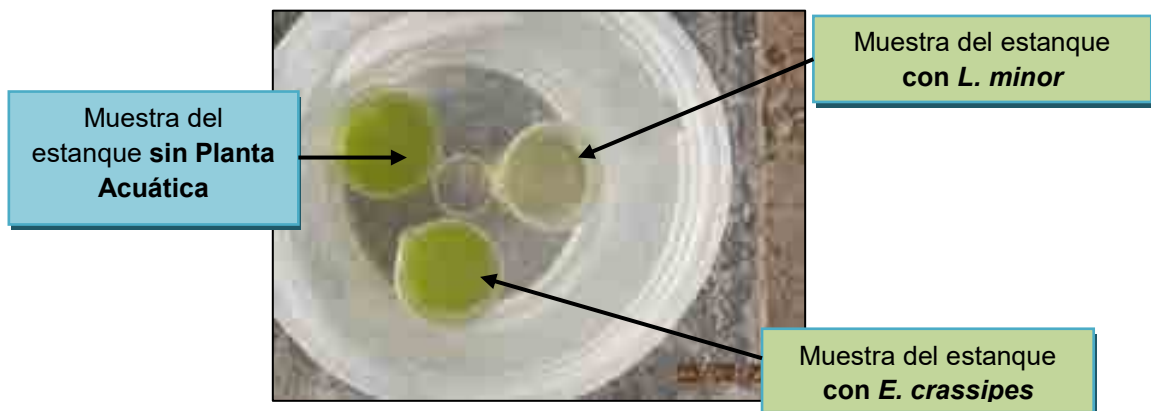


Figura 3. 38: Muestras de los estanques con Lemna, Eichhorna y sin ninguna planta acuática (CITRAR-Año 2010)

E. Medición de la Biomasa en el Sistema Por Tandas

La medición del peso fresco de ambas plantas acuáticas en este sistema (un reactor) se obtuvo al inicio y final de este experimento. Es decir no hubo cosecha o extracción de las plantas acuáticas sino hasta el término del intento, tomando una duración de 7 días tanto para las plantas acuáticas Lenteja de Agua y Jacinto de Agua, como para el reactor Control (sin plantas acuáticas).

F. Métodos del Cálculo para la Evapotranspiración

Las mediciones de la evapotranspiración del cultivo de *Lemna* y *Jacinto* en cada acuario, se realizaron en el sistema “**por tandas**” en el mes de marzo del 2010 por una semana. En estos días hubo mucho sol y sin llovizna, durante ese

tiempo se cubrió de **Lemna y Jacinto**, el área total del espejo de agua en cada acuario. El procedimiento de Cálculo se da de la siguiente manera:

- Se midieron las alturas del agua en cada acuario, entre las horas 13 horas y 16 horas, en las que se especifican en la Tabla N°4.17, Pág. 177.
- Se calculó la evapotranspiración por diferencia de alturas, para luego ser dividido entre el rango de días, de aquí se obtiene un valor de evapotranspiración total para cada acuario.

Es decir, la Evapotranspiración se obtiene de la siguiente manera:

$$\text{Evapotranspiración} = \frac{\text{Altura inicial(cm)} - \text{Altura final(cm)}}{\text{Tiempo (días)}}$$

G. Método del Cálculo de la Tasa de Crecimiento Superficial

El cálculo de la Tasa de Crecimiento de la **Lenteja de Agua y Jacinto de Agua**, se basó en el método de Regresión Lineal; con los datos obtenidos de campo durante el tiempo de prueba; que se plasman en el Capítulo IV de DISCUSION DE RESULTADOS (Ver Figura N° 4.67 , Pág. 174).

La Regresión Lineal fue adoptada para expresar el área de *Lemna* como el de Jacinto que crece por cada día en agua residual, trata donde Y=área de *Lemna* y Jacinto que crece en el espejo de agua del acuario; X= Número de días en que crece un área determinada de la planta acuática, R² es el coeficiente de correlación, y la pendiente de cada recta viene a ser la Tasa de Crecimiento Superficial evaluado en los días de prueba. Por ejemplo **y = 0.1093x + 0.1275**; donde 0.1093 es la Tasa de Crecimiento Superficial, y la Constante 0.1275, es el área inicial de *Lemna Minor* cultivada al inicio, que sería de 0.064m².

3.2.4.2. Sistema Continuo

Para evaluar la capacidad de una laguna de purificación con *Lemna M.* y *Eichhornia C.*, se utilizó un experimento para simular una laguna con pequeñas dimensiones por separado para cada planta acuática.

Así, fue posible evaluar las ventajas y desventajas de una laguna de macrófitas considerado como un complemento al tratamiento existente.

A. Criterios de diseño

Se construirá 2 estanques de vidrio de tal forma que al final podamos observar el comportamiento de estos con las plantas acuáticas, se utilizará el efluente de la laguna terciaria por sifón mediante una válvula y una canastilla en la captación para evitar el ingreso de peces pequeños.

Además se instala un sistema de tuberías de tal manera que casi toda la masa de agua esté en contacto con las plantas acuáticas y satisfacer a las raíces de las plantas acuáticas para su desarrollo y crecimiento.

También se evitará el movimiento de la masa de agua en estos estanques, sin embargo se nota la presencia de otras interferencias como insectos. En este experimento se regulará el caudal de tal manera que exista un tiempo de retención óptimo para las plantas acuáticas, a pesar que el tirante de agua sea pequeño.

B. Forma, partes y dimensiones de los sistemas para cultivo de las plantas acuáticas.

El sistema de flujo continuo tal como se muestra en la Figura 3.39, consta de un "filtro de arena" donde la arena es previamente limpia y el acuario con dimensiones de 10cm de ancho, de largo 20 cm y de alto 10 cm, utilizándose para remover un porcentaje de algas que interfieren en la remoción de nutrientes.

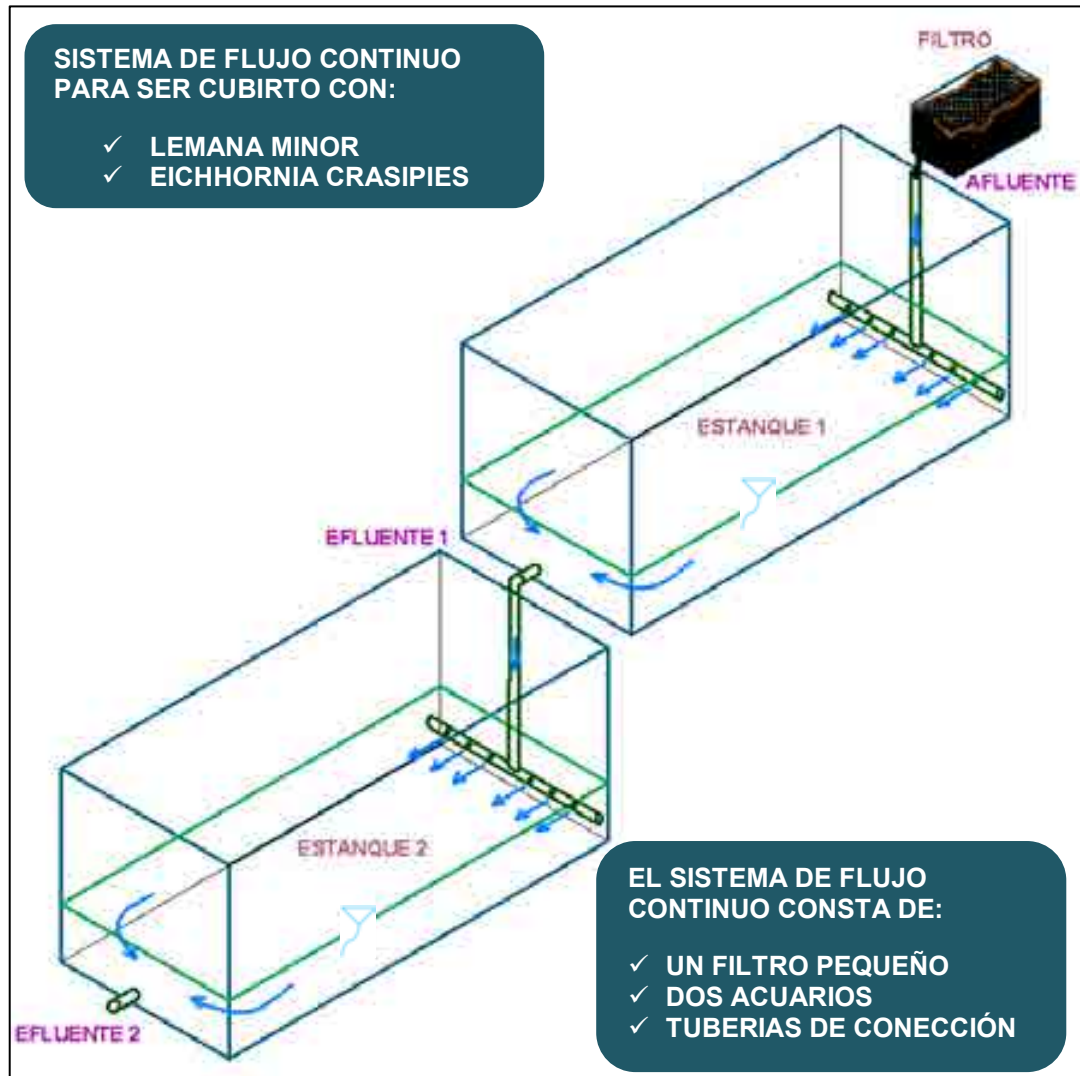


Figura 3. 39: Sistema de flujo continuo que se diseño para el cultivo de la Lenteja de agua y Jacinto en CITRAR-UNI (Año 2010)

El término “filtro de arena” en este caso, se refiere a un área diseñada y construida para contener cierta cantidad de algas a través de la cual, las aguas residuales pasan por el respectivo acuario. El propósito es permitir que ocurra la deposición natural en este sistema, y no en el sistema en evaluación.

Además se utilizaron dos estanques de forma rectangular y sus dimensiones de cada estanque son de largo 90 cm, un ancho de 40 cm y alto de 40cm (con un nivel de agua de 10-12cm).

Consta de accesorios (dos válvulas a la entrada del estanque 1 y salida del estanque 2 y codos); además con tuberías (PVC) de ½” de diámetro que se instalaron en las entradas a los estanques para luego evacuar mediante orificios de diámetros de ½ cm a lo largo del ancho de cada estanque.

Se utilizaron plástico, ladrillos, manguera de PVC en diámetros de ¼” y ½” para la captación del efluente de la segunda Laguna de estabilización, laguna del tipo facultativo, de la PTAR-CITRAR.

C. Medición del caudal en el Sistema de Flujo Continuo

El sistema consta de dos estanques de tratamiento con las mismas dimensiones anteriores, la conducción de las aguas se las realiza con una tubería PVC de 4”, con el 1% de pendiente al interior de cada estanque. Las separaciones entre estanques son de 10 cm, distancia considerada recomendable que permite trabajar con seguridad durante las cosechas y manipular herramientas como baldes para la recolección de biomasa sin dificultad.

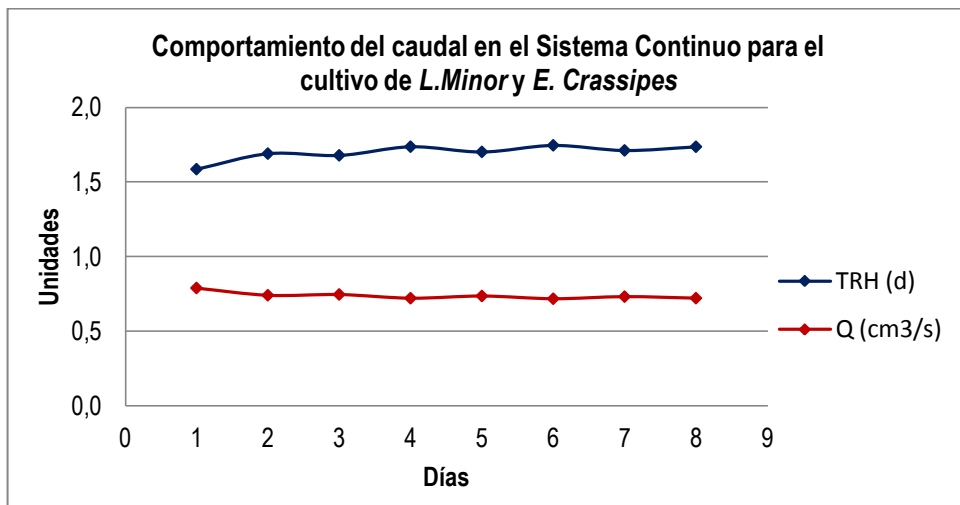


Figura 3. 40: Comportamiento del caudal de ingreso al sistema en CITRAR-UNI (Año 2010)

Interpretación: El comportamiento del caudal medidos diariamente en este sistema continuo fue de 0.73 ml/s. Se determinó el TRH en ambos reactores del sistema fluctuando entre 1.6 y 1.7 días comprobándose un reducido dimensionamiento del sistema experimental.

De acuerdo a Gaibor (2005), recomienda un TRH en procesos de depuración en 8 días. Por lo tanto, se determinó teóricamente para un TRH fluctúe entre 6 y 7 días; el dimensionamiento del reactor habría sido un área de 2m² y 0.2 m de profundidad; es decir incrementando el área en dos veces más y duplicando la profundidad.

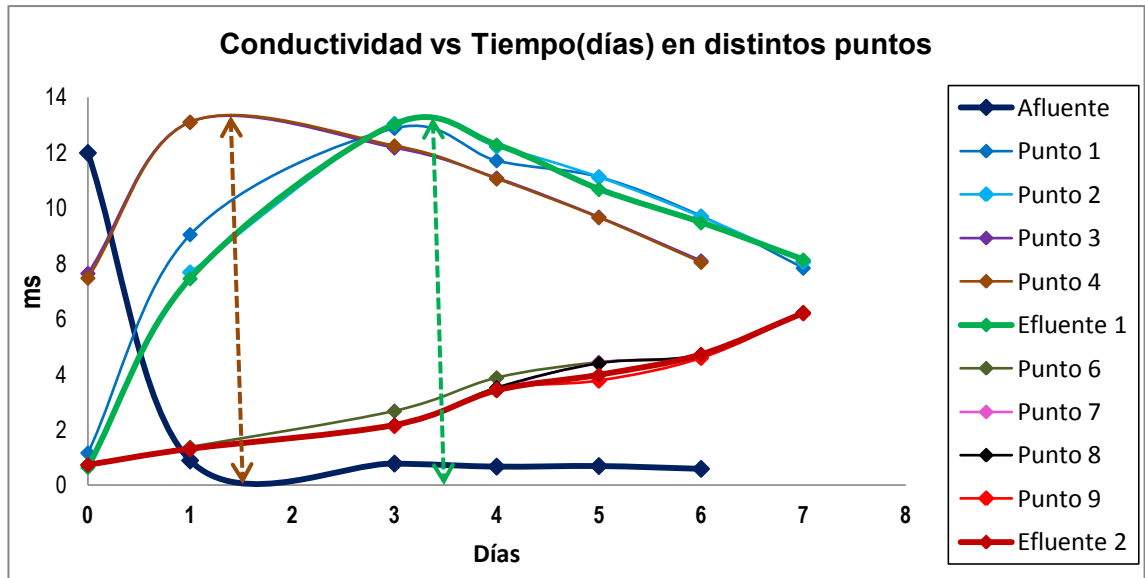


Figura 3. 41: Comportamiento de la conductividad en distintos puntos del sistema utilizando un trazador en CITRAR-UNI (Año 2010)

Interpretación: Esta grafica muestra curvas para cada punto del sistema (desde el afluente hasta el efluente del sistema), que corresponde la conductividad versus los días de muestreo. Es decir cada curva representa el comportamiento de un punto del sistema de Flujo Continuo, en este caso son once puntos desde la entrada pasando por el Efluente 1 hasta llegar al Efluente 2. Sin embargo se observa dos valores promedios máximos como se señalan en la grafica.

Primer Valor: La concentración máxima promedio en los puntos 3 y 4 es 13 ms a los 1.5 días, lo que significa un TRH aproximado de 36 horas en un acuario.

Segundo Valor: Se observa la máxima concentración de los puntos 1, 2 y del Efluente 1; a 13.5 ms en promedio en 3.5 día, indicando un TRH aproximado de 84 horas en cada acuario.

De acuerdo a estos resultados, se tomó un TRH aproximado de 48 horas en cada acuario, para las mediciones de Nitrógeno Amoniacal y Fosforo Total.

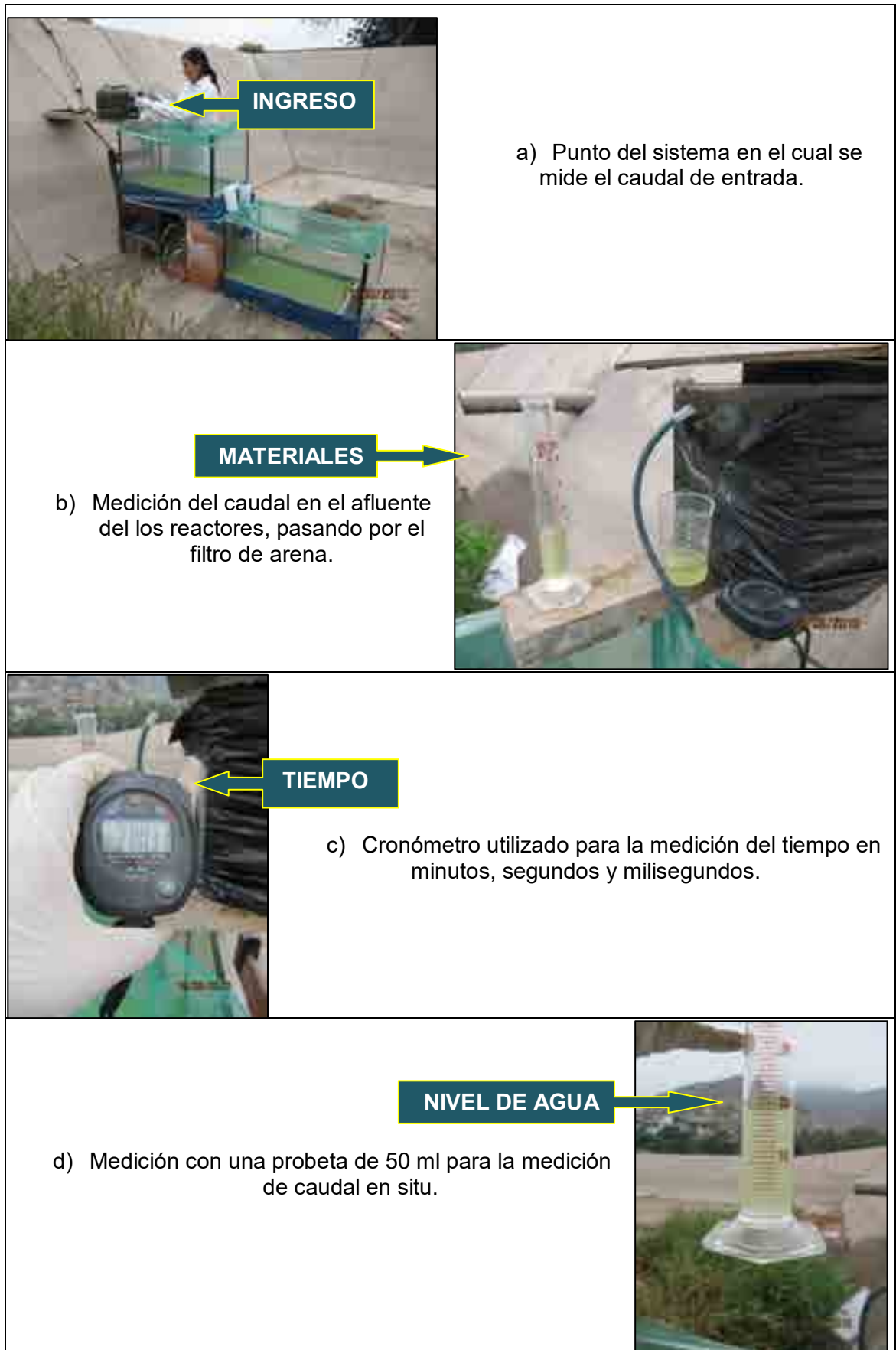


Figura 3. 42: Medición de Caudal en el afluente del sistema de remoción (CITRAR-Año 2010)

D. Equipos y materiales de medición en campo

En la Tabla 3.9 se lista los equipos y materiales que fueron utilizados de forma específica durante el desarrollo de este experimento. Se detallan los materiales, reactivos y equipos empleados en las diferentes etapas (campo, laboratorio) de la investigación.

Tabla 3. 9: Detalle de materiales, equipos de muestreo y materiales de siembra (CITRAR-Año 2010)

MATERIALES DE CAMPO		MATERIALES MUESTREO	
Guantes de caucho y quirúrgicos	Mascarillas	Recipientes de transporte de especies vegetales	
Libretas de campo		Rotulador	
Cinta métrica		Alcohol industrial y antiséptico	
Dos acuarios como estanques		Un acuario como filtro	
MATERIALES DE SIEMBRA			
<i>Eichhornia crassipes</i> y <i>Lemna minor</i> .			
EQUIPOS			
Oxímetro		Balanza de campo automática	
Conductímetro		Ph	

E. Frecuencia de medición de las variables fisicoquímicas y biológicos de investigación

Las Frecuencia de las Pruebas y los Puntos de Muestreo en este sistema de Flujo Continuo se abordaran por su importancia en la investigación.

Las Pruebas de Campo fueron: Temperatura, PH, Conductividad, Turbiedad y Oxígeno Disuelto., se realizaron tres veces al día.

Las mediciones de Temperatura y Oxígeno Disuelto, se monitorearon en situ en las horas más representativas del día, es decir estas pruebas se realizaban transportando el equipo a campo.

Las Pruebas en el Laboratorio medidos con equipos electrónicos fueron el PH, la Conductividad y Turbiedad.

Las mediciones de PH, Turbiedad y Conductividad fueron monitoreadas en las horas más representativas del día. Se obtuvieron mucha información de estas pruebas, ya que se tuvo un Potenciómetro, un Turbidímetro y un Conductímetro cerca al sistema (Laboratorio de CITRAR).

Los parámetros que se determinaron según los métodos HATCH, como Nitrógeno Amoniacal, Orto fosfatos y Fósforo Total se analizaban cada 48 horas exactas en un horario representativo.

El parámetro de la DBO se monitoreó al término del experimento en los puntos que se mostrarán para notar su eficiencia en remoción.

Nota: Las horas tomadas fueron 9:00, 12:00 y 16:00 horas (horas de funcionamiento del Laboratorio de la Facultad de Ingeniería Ambiental) que son horas donde hay cambio de radiación solar y por lo tanto variación de la actividad fotosintética en el agua a tratar, todo esto involucra el grado de tratamiento en horas críticas. Según Madueño, 2009, se toma cuando exista un mayor valor de DQO, en este caso a las 9:00 horas.

F. Pruebas de Laboratorio

Las pruebas de laboratorio se analizaran previamente a que las muestras están debidamente filtradas empleando la centrifugadora del Laboratorio FIA. Los equipos que se emplearon se muestran en el Anexo 1.

1. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

La metodología de determinación de la demanda bioquímica de Oxígeno es el denominado **Método de las Diluciones**.

Los materiales a utilizar fueron:

- ✓ 15 botellas de DBO, con boca esmerilada.
- ✓ 03 pipetas graduadas.
- ✓ 01 matraz erlenmeyer de 500 ml.
- ✓ 01 bureta de 25 ml.

Los equipos utilizados fueron:

- ✓ Incubadora a 20°C.
- ✓ Espectrofotómetro HATCH.

2. Nitrógeno Amoniacal

La metodología utilizada fue el **Método Salicylate**, que consiste de un kit de prueba (viales y reactivos en polvo).

Los aparatos utilizados fueron:

- ✓ Centrifugadora
- ✓ Incubadora a 20°C.
- ✓ Espectrofotómetro (HACH)

Los reactivos utilizados fueron:

- ✓ Agua desionizada(HATCH)
- ✓ Reactivo diluyente (viales HACH)
- ✓ Reactivo Ammonia Salicylate para 5ml de muestra (HACH)
- ✓ Reactivo Ammonia Cyanurate para 5 ml de muestra (HACH)

3. Orto fosfato y Fósforo Total

La metodología utilizada fue el **Método Phos Ver 3 con Acido Persulfate Digestion**, que consiste de un kit de prueba (viales y reactivos en polvo).

Los aparatos utilizados fueron:

- ✓ Centrifugadora
- ✓ Incubadora a 20°C.
- ✓ Reactor DRB 200 a 150°C.
- ✓ Espectrofotómetro HATCH.

Los reactivos utilizados fueron: Set de reactivos para determinación de Fósforo Total

- ✓ Agua desionizada (HACH)
- ✓ Viales de reactivos: Ácido Hidrolizable para muestras de 5ml. (HACH)
- ✓ Solución Hidróxido de sodio 1.54 N (HACH)
- ✓ Reactivo en polvo: Persulfato de potasio (HACH)
- ✓ Reactivo en polvo: PhosVer 3 (HACH)

G. Puntos de medición de las variables fisicoquímicas y biológicos de investigación

Para la toma de muestras se analizaron en tres puntos específicos: a la entrada del sistema (después del pequeño filtro instalado), a la mitad del sistema (a la salida del primer reactor) y por último a la salida del sistema de flujo continuo (efluente del segundo reactor).



a) Toma de muestra del afluente (Punto N°1) luego del filtro de arena.



b) Toma de muestra de la 1ra salida (Punto N°2) luego del 1er reactor.



c) Toma de muestra del efluente (Punto N°2) luego del 2do reactor.

Figura 3. 43: Muestreo en los tres puntos del sistema de tratamiento (CITRAR-Año 2010)

Comentario: La Figura 3.43 muestra los tres puntos donde se extrajeron muestras en botellas limpias para las mediciones en el laboratorio de CITRAR. Para cada muestra se tomó un tiempo de cinco minutos.

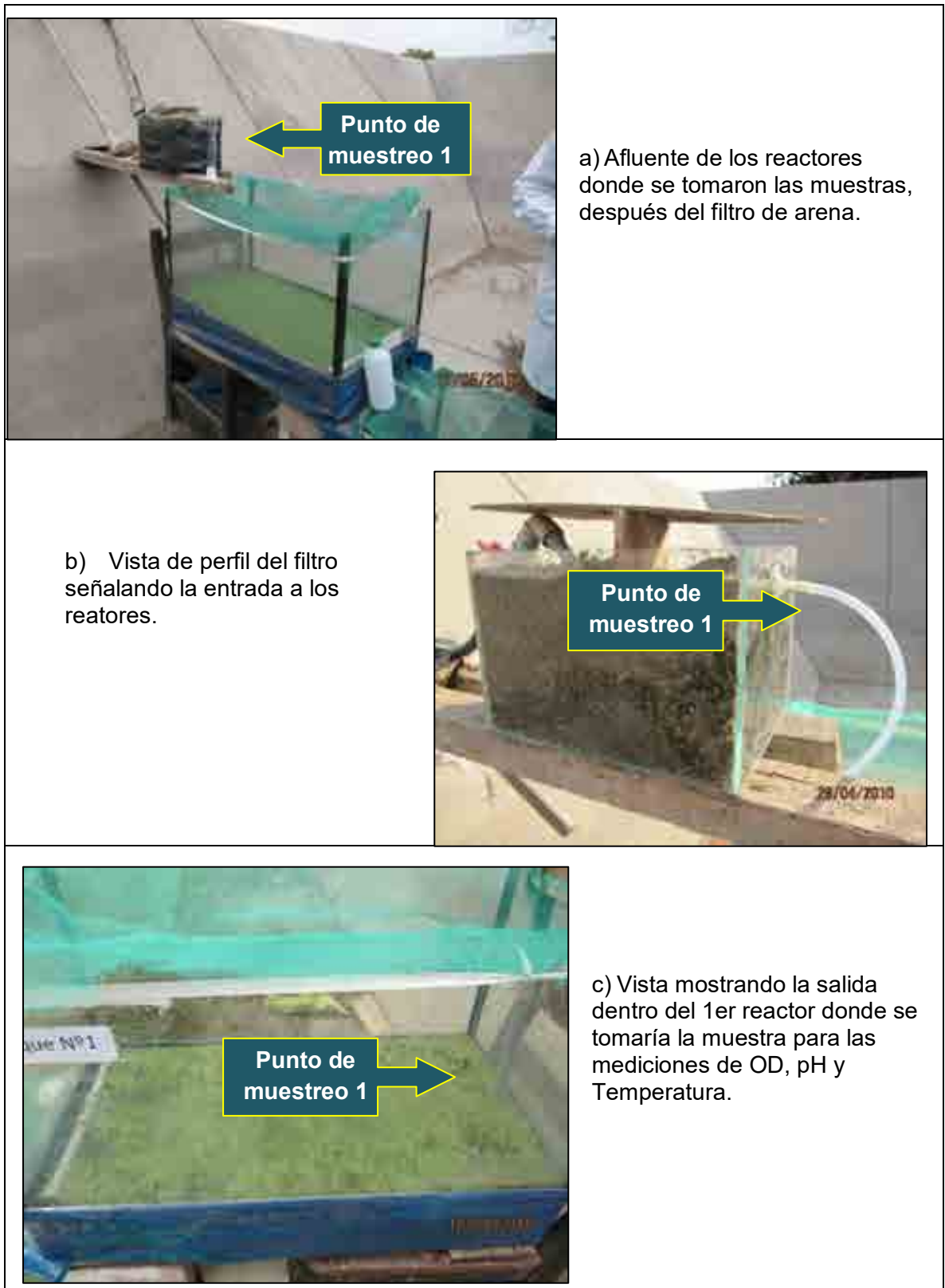


Figura 3. 44: Primer punto de medición del sistema de tratamiento (CITRAR-Año 2010)

Comentario: En la Figura 3.44 se señala: b) El punto de monitoreo para la extracción de la muestra y en c) El punto para las mediciones en situ como la Temperatura y el Oxígeno Disuelto.

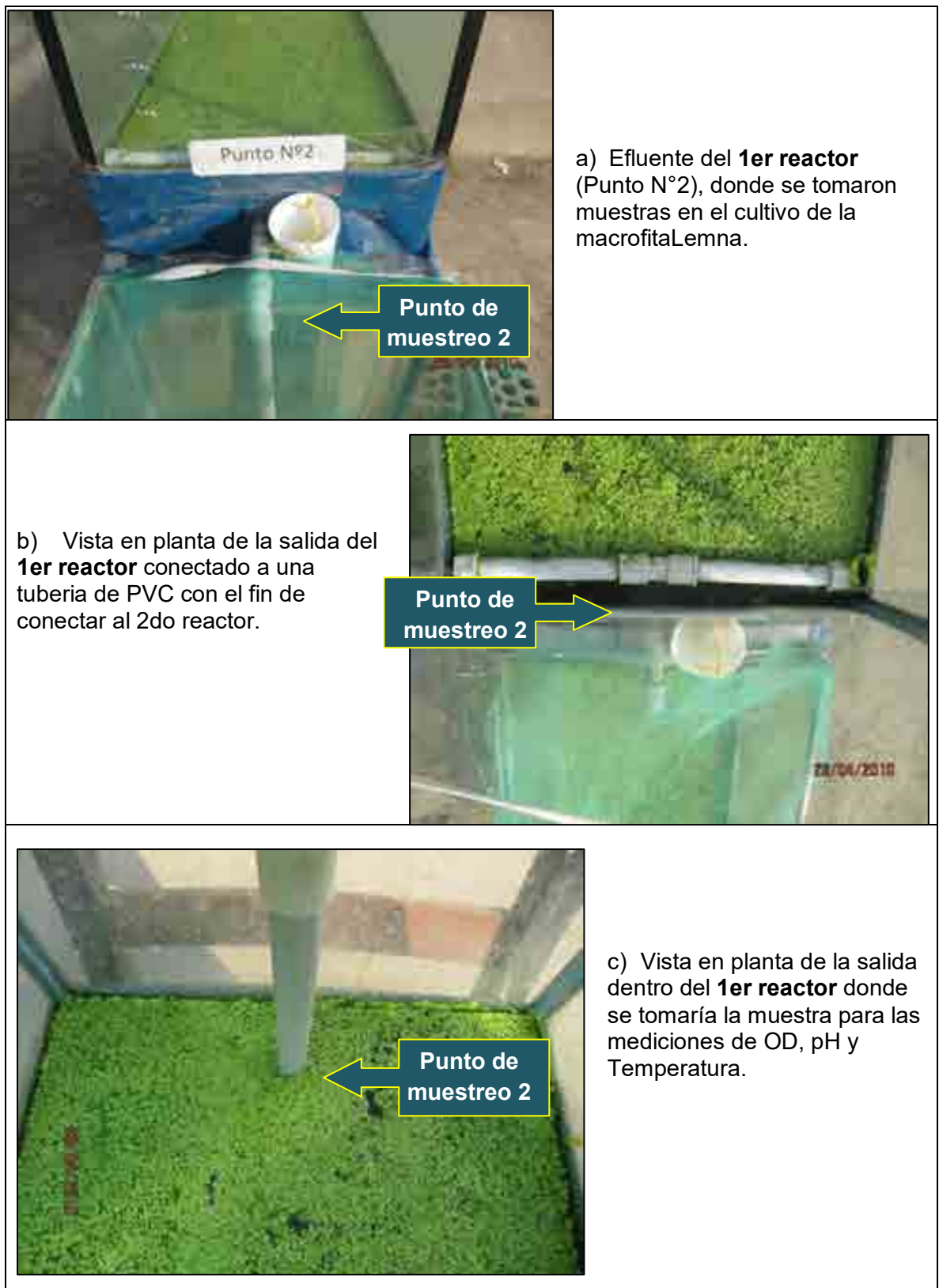


Figura 3. 45: Segundo punto de medición del sistema de tratamiento (CITRAR-Año 2010)

Comentario: En la Figura 3.45 se señala: a) El punto de monitoreo para la extracción de la muestra y en c) El punto para las mediciones en situ como la Temperatura y el Oxígeno Disuelto.



Figura 3. 46: Tercer punto de medición del sistema de tratamiento (CITRAR-Año 2010)

Comentario: En la Figura 3.46 se señala: b) El punto de monitoreo para la extracción de la muestra y en c) El punto para las mediciones en situ como la Temperatura y el Oxígeno Disuelto.

H. Organismos Biológicos que se desarrollaron en el cultivo de la Lemna Minor.

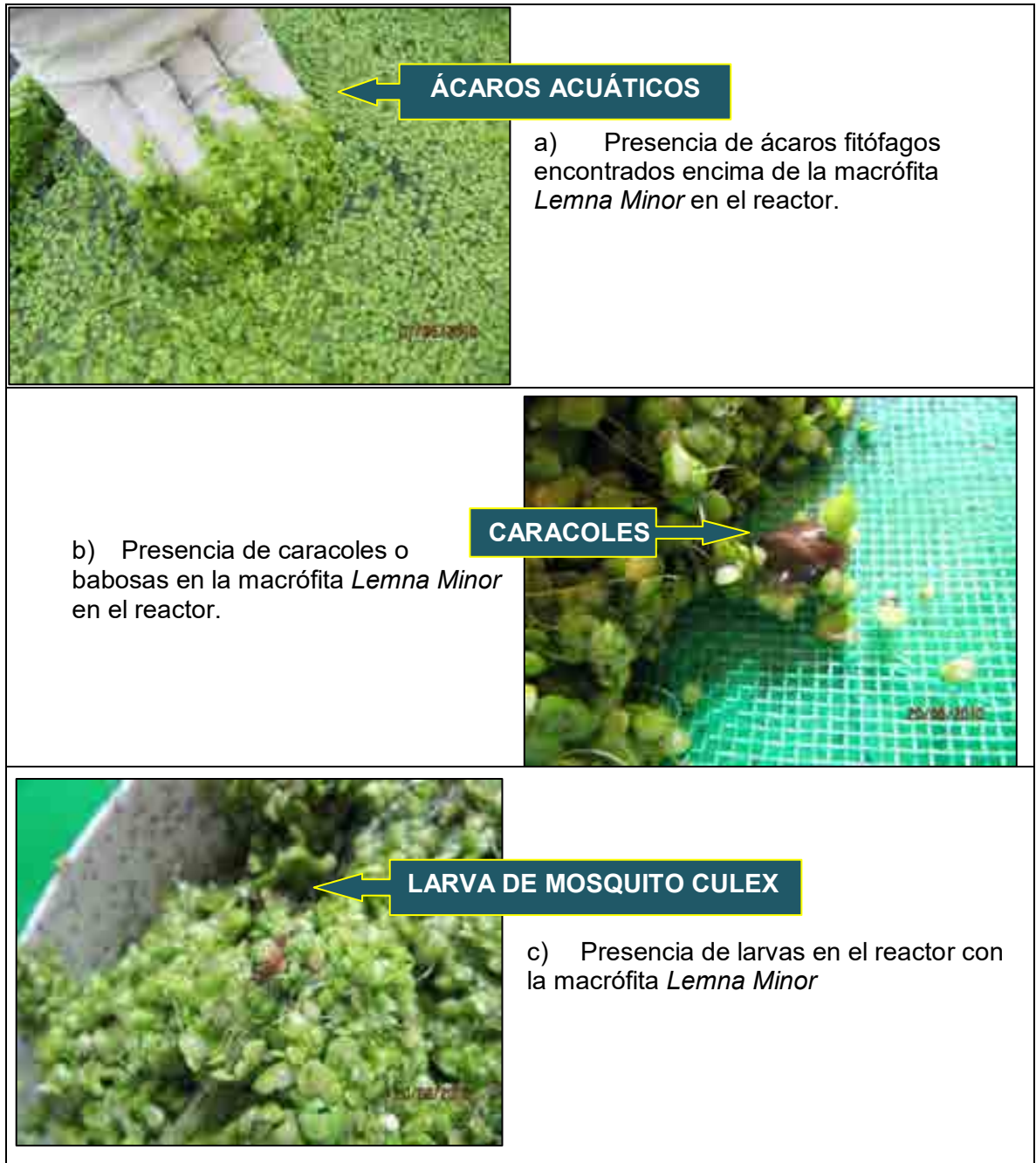


Figura 3. 47: Interferencias de organismos vivos en los reactores con Lemna Minor (CITRAR-Año 2010)

I. Medición de la Biomasa en el Sistema de Flujo Continuo

La medición del peso fresco de toda la planta por estanque, en este sistema (dos reactores en serie), tuvo una frecuencia variable; es decir en verano la cosecha se realizó de 1 a 4 a 7 días, dejando siempre el 100% del área, ocupada en cada estanque.

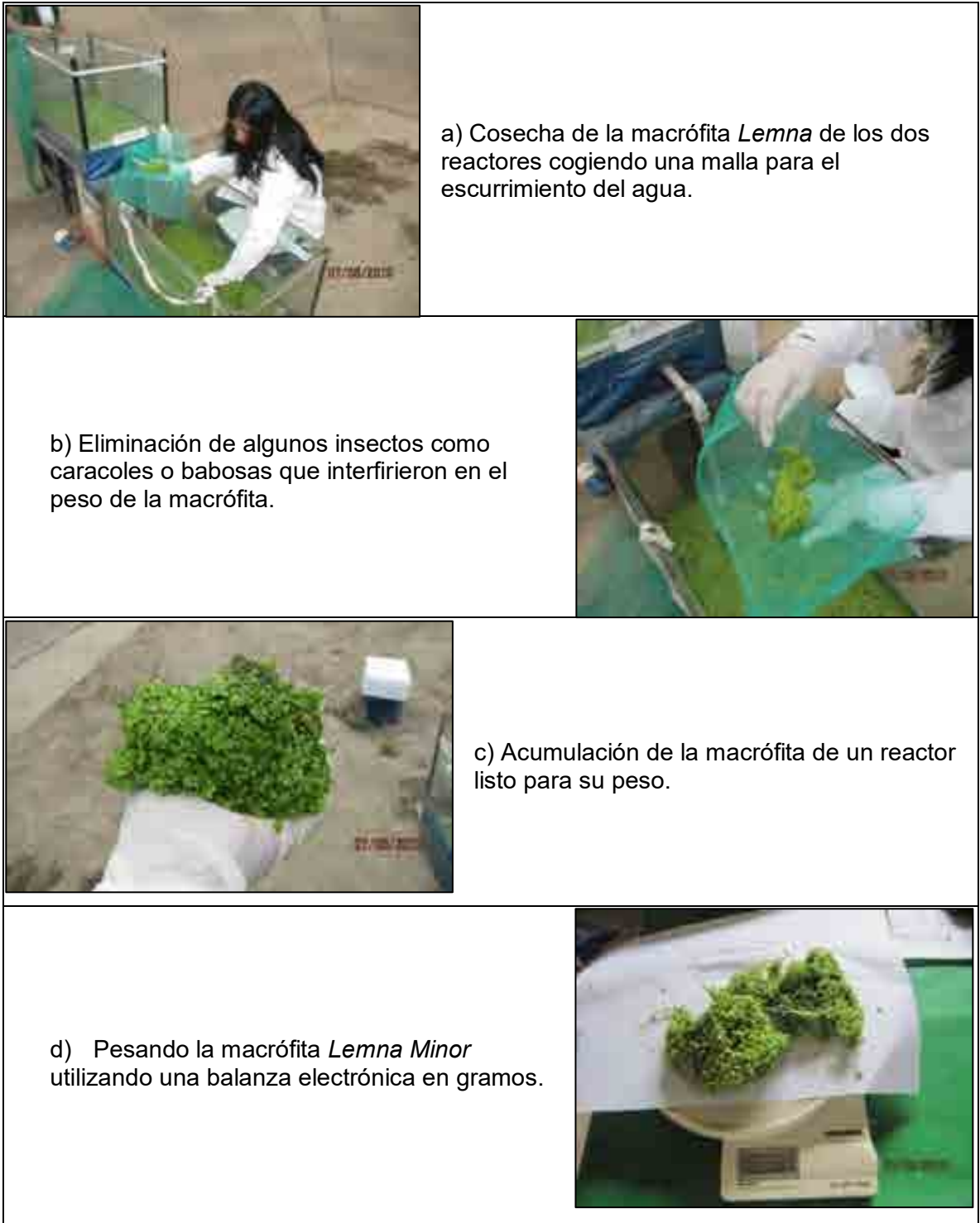


Figura 3. 48: Medición del peso de la macrófita *Lemna Minor* en los reactores (CITRAR-Año 2010)

Comentario: Este mismo procedimiento se realizó para la medición de la planta acuática *Jacinto de Agua*, sin embargo no hubo presencia de insectos.



Figura 3. 49: Observación de la macrofita *Lemna Minor* mediante un microscopio (CITRAR-Año 2010)

Comentario: Se observa la planta acuática *Lemna Minor* notando su morfología; hojas, bulbos y rizomas, por donde absorberán los nutrientes.

J. Densidad de Peso Húmedo por Superficie para la Lenteja de Agua

La Densidad de Peso Húmedo por Superficie indica la cantidad de planta acuática en peso fresco por unidad de área.

Se obtiene de la división de la carga operacional crítica entre el área. La carga operacional promedio fue un dato inicial como se muestra en la Figura 4.74 (pág 187). A continuación se mostrará para mayor entendimiento el método de obtención.

Procedimiento:

COP: Carga Operacional Crítica

Área: Área superficial del reactor

A: Porcentaje de área que ocupaba la planta cosechada en el reactor aproximadamente.

$$D = \frac{COP \times T}{A}$$

K. Tasa de Crecimiento Superficial para la Lenteja de Agua

Para el cálculo de la Tasa Superficial en esta parte de la investigación, se empleó un método a partir de la densidad de peso húmedo y de la producción diaria de la biomasa.

Procedimiento:

D: Densidad de Peso Húmedo por superficie.

TP: Tasa de Producción diaria.

TS: Tasa de Crecimiento Superficial.

$$TP = \frac{\Delta P \text{ (Producción Total)}}{\text{Tiempo de cultivo}}$$

$$TS = \frac{TP \text{ (g/d)}}{D \text{ (g/m}^2\text{)}}$$

L. Densidad de Peso Húmedo por Superficie para el Jacinto de Agua

La Densidad de Peso Húmedo por Superficie indica la cantidad de planta acuática por unidad de superficie.

Otra manera de obtener este valor, mencionada además anteriormente y calculado para la *Lemna Minor* es el método inverso; es decir en esta ocasión, el dato inicial fue la Tasa de Crecimiento Superficial y no la Carga Operacional.

La Densidad de Peso Húmedo **D**, se obtiene de la división de la Tasa de producción en biomasa entre la Tasa Superficial. A continuación se mostrara el procedimiento de este método inverso:

Procedimiento:

TP: Tasa de producción diaria

TS: Tasa de Crecimiento Superficial

D: Densidad de peso húmedo por superficie

$$D = \frac{TP}{TS}$$

M. Carga Operacional para el Jacinto de Agua

La Carga Operacional indica la cantidad apropiada para la cosecha en los estanques de tratamiento y de esta manera se mantendrán densidades adecuadas.

La secuencia del método inverso continúa hasta el cálculo de este parámetro del Jacinto de agua. Se obtiene del producto de la densidad superficial y al área ocupada de la planta acuática cosechada aproximadamente, dividida entre el tiempo entre cosecha y cosecha.

Procedimiento:

D: Densidad de peso húmedo por superficie.

A: Porcentaje de área que ocupaba la planta cosechada en el reactor aproximadamente

Área superficial del reactor

T: Tiempo entre cosecha y cosecha.

COP: Carga Operacional

A continuación se mostrará para mayor entendimiento el método de obtención de la COP:

$$COP = \frac{D \times A}{T}$$

N. Cálculo de la Tasa de Producción Semanal

El cálculo para la obtención de la tasa de producción por semana se realizó mediante un procedimiento en dos pasos para cada experimento de monocultivo cubierto con *Lemna Minor* y *Eichhornia Crassipes*:

Procedimiento:

- 1) En primer lugar, la diferencia obtenida entre la biomasa colocada al inicio y la biomasa acumulada durante todo el tratamiento se muestran en las Tablas. 4.20 y 4.25 según la especie (pág. 185 y 192 respectivamente). Esta diferencia entre el tiempo de cultivo se determinó como la producción diaria.
- 2) Seguidamente se transformó la tasa de producción diaria a una tasa semanal.

TP: Tasa de producción semanal

ΔP : Producción de biomasa

$$\Delta P = \frac{\text{Biomasa inicial}(g) - \text{Biomasa Final}(g)}{\text{Tiempo de Cultivo}} = \frac{g}{\text{días}}$$

$$TP = \Delta P \times 1 \text{ semana} = g/\text{semana}$$

CAPÍTULO IV

DISCUSION DE RESULTADOS

4.1. DISCUSIÓN DE RESULTADOS UTILIZANDO AZOLLA

Se evaluó el comportamiento de los tratamientos con *Azolla filiculoides* en la ciudad de **Suderburgo-Alemania**, de acuerdo a la propuesta de la Asociación anfritiona, la cual consiste en el proceso de depuración de aguas residuales domésticas mediante los llamados “sistema por tandas” y “sistema de flujo continuo”, la cual para su análisis se tomó mayor tiempo en el “sistema por tandas”.

4.1.1. Diagnóstico de los Sistemas de Tratamiento

El diagnóstico del sistema se basó en el análisis de varios factores, el sistema de tratamiento de agua residuales, Holthusen Suderburgo; evaluación de los sistemas del proyecto, caudal y TRH (tiempo de retención hidráulica), con el fin, de obtener un panorama sobre las condiciones del sistema antes de la aplicación de nuevos tratamientos.

Como se ha mencionado la comunidad de **Suderburgo** posee un sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas, al que se ha denominado como sistema de lodos activados, descargándose los efluentes a los lagos Raber y Hardau.

4.1.2. Calidad de las aguas tratadas

Debido a la importancia que tienen los vertidos de estos sistemas a los lagos Rabe y Hardau se comparó con los límites permisibles de la norma EWS; es necesario un diagnostico para conocer la situación actual. El diagnóstico se basó en la caracterización del agua tratada en dos puntos de la Planta de Tratamiento de **Suderburgo**; efluente del clarificador y del reactor de lodos activados, empleándose *Azolla filiculoides* como tratamiento biológico.

4.1.3. Funcionamiento de los Experimentos

Este sistema fue el primero en ser construido en el pueblo de **Sudburgo** donde se aplicó *Azolla filiculoides* para la purificación de las aguas residuales, buscando disminuir el impacto contaminante hacia el lago Rabe y Hardau.

Según los datos recopilados (2009), durante su investigación para el **sistema “por tandas”** se muestra los resultados del análisis de la calidad del efluente del sistema sin problemas en los valores como: el parámetro de pH que se mantiene en un promedio de 7,6 y la conductividad con porcentajes bajos de remoción del 13% (datos en el afluente 1139 $\mu\text{s/cm}$ aumentando a 1291 $\mu\text{s/cm}$ en la salida del sistema), pero hace hincapié en los altos porcentajes de remoción promedio para los parámetros fisicoquímicos como nutrientes de hasta 70%. Para ratificar los porcentajes de remoción obtenidos por los datos anteriores (2009), se realizó el muestreo y análisis de aguas en varios reactores “Por Tandas” del sistema (metodología), con el fin de tener una perspectiva de la remoción de *Azolla filiculoides*, y determinar disminuciones ó incrementos de contaminantes (Tabla 4.1). Además se compararon los datos del efluente del sistema con los límites permisibles de descarga de la norma.

Tabla 4. 1: Diagnóstico de la calidad de las aguas tratadas con *Azolla filiculoides* en el sistema por tandas (Sudburgo-Año 2009).

Estanque	A		B		C		D		Norma EWS
	13		35		28		21		
Días de muestreo	Inicio	Fin	Inicio	Fin	Inicio	Fin	Inicio	Fin	
Parámetros	Inicio	Fin	Inicio	Fin	Inicio	Fin	Inicio	Fin	
1.-pH	7.15	7.4	7.69	8.02	7.51	7.65	7.61	7.97	6,5-10
2.-Temperatura °C	21.1	25.4	19.5	14.2	17.4	8.9	6	7	35
3.-Conductividad $\mu\text{s/cm}$	927	818	842	1137	1648	1920	-	-	-
4.-Nitrógeno Kjeldahl mg/l	2.59	1.82	1.68	4.9	5.25	0	-	-	15
5.-Amonio mgN/l	0.31	0.04	0.23	0.04	0.31	0.04	-	-	100
6.-Nitrato mg/l	9.88	0.13	34.70	30.25	9.75	0.00	-	-	-
7.-Nitrito mgN/l	0.35	0.02	0.71	0.59	0.26	0.08	-	-	5
8.-Orto-Fosfato(*) mg/l	0.91	0.03	1.65	0.02	0.53	0.02	0.32	0.01	-
Orto-Fosfato(**) mg/l	0.30	0.01	0.54	0.01	0.18	0.01	0.10	0.00	-
9.-Fósforo total mg/l	0.22	0.28	1.91	0.20	0.78	0.07	0.78	0.13	2
10.-Cloruro mg/l	155.0	153.0	102.0	154.2	396.9	440.3	-	-	-
11.-Fluoruro mg/l	0.051	0.052	0.128	0	0	0	-	-	-
12.-Sulfato mg/l	49.5	44.6	44.2	58.4	38.6	51.1	-	-	400
13.-DQO mg/l	49.4	51.5	54.2	33.2	18	23.8	-	-	125
14.-COT mg/l	2.59	12.3	9.99	17.15	11.44	16.71	-	-	-

La Tabla 4.1, muestra los resultados de los análisis de aguas, al inicio y fin de los **sistemas “por tandas” A, B, C y D**. Los valores iniciales o las primeras mediciones de cada reactor son comparados con las normas ambientales establecidas en Alemania y se determina su aceptabilidad para descargas en cuerpos de agua dulce.

Según la tabla anterior, la mayoría de los parámetros, para cada toma de muestra, en el punto del efluente son aceptables de acuerdo a la norma EWS (Estatutos de Drenaje). Para los parámetros de nutrientes se señala que el porcentaje de remoción está entre los 12,8% al 100,0%. Dado para estos un rango de aceptabilidad promedio de los reactores del 60,4% al 97,7% utilizando *Azolla filiculoides*. En este caso es una especie que no remueve el porcentaje esperado en el parámetro microbiológico DQO, debido al manejo del sistema en la falta de análisis a realizarse y la baja concentración manteniéndose en un rango entre 18 y 54 mg/l.

4.1.4. Estudio Fisiológico de la *Azolla Filiculoides*

Se consideró analizar las características fisiológicas de esta especie *Azolla filiculoides* y es una especie que ha sido probada como tratamiento secundario y hasta primario en la purificación de aguas residuales domésticas.

La aplicación de los tratamientos con *Azolla filiculoides* se realizó en Suderburgo debido a las oportunidades que se tuvieron en la investigación, facilidad de instalación y la cercanía de las vías de acceso. A continuación se detalla los resultados y el respectivo análisis.

4.1.4.1. Análisis fisiológico de *Azolla filiculoides*

El género *Azolla* sp, corresponde a diminutos helechos acuáticos, que flotan libremente en la superficie del agua y que se hallan diseminados por todas las regiones del trópico como la *Azolla pinnata* y subtropicales como la *Azolla filiculoides* y la *Azolla mexicana* (Espinosa et al . 1979).

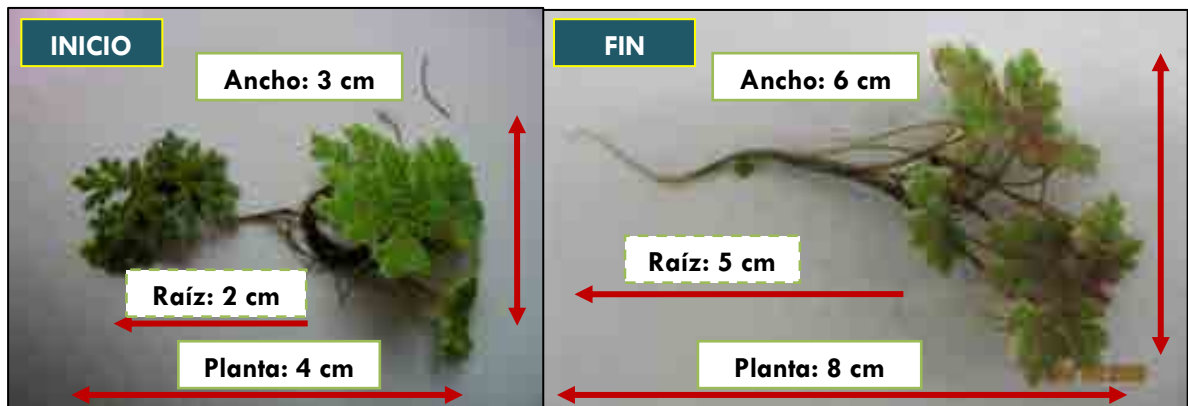


Figura 4. 1: Dimensionamiento en el desarrollo de *Azolla filiculoides* (Sudburgo-Año 2009).

Con los resultados obtenidos en la Figura 4.1, sobre el desarrollo de *Azolla filiculoides* se puede deducir que existe un rango de crecimiento en el tamaño de las plantas que oscila entre 4.0 y 8.0 cm diferencia que se acentúa en el sistema de flujo continuo al inicio (estanque 1) en comparación con el sistema de flujo continuo al final (estanque 3). El análisis del tamaño de las raíces expresa una variación que fluctúa entre 2.0 y 5.0 cm encontrándose que, para el estanque 1 existe el menor tamaño, y su máximo desarrollo alcanza en el estanque 3, lo que significa un incremento del 100%. Al analizar el ancho de las plantas se puede observar que su diámetro varía entre 3.0 y 6.0 cm, presentándose una tendencia a tener mayor expansión en el estanque 3.

De lo anterior se puede especificar que el crecimiento de la planta al inicio es limitado y se atribuye a que esta se encuentra en proceso de adaptación y desarrollando en un medio sobre enriquecido, razón por la cual la planta no amerita gran desarrollo, a diferencia de las plantas al final en donde el agua ya llega sin algunos nutrientes debido al pretratamiento realizado en los estanques 1 y 2, siendo necesario para estas plantas un desarrollo más amplio que permita captar nutrientes a más profundidades y sus hojas también necesitan realizar más fotosíntesis que les permitan formar estructuras a través de la fijación de CO₂. Además se observó que en la especie del último

estanque mantiene condiciones fisiológicas mejores, que en los dos primeros estanques.

En la Figura 4.2 se observa el sistema “Por Tandas” de los cuatro intentos con sus respectivas temporadas en el cultivo de *Azolla filiculoides*, reconociendo que para cada estación la clorofila cambia de color de un verde claro a un verde gris o rojo gris.



Figura 4. 2: Comportamiento en el desarrollo de *Azolla f.* en el sistema por tandas (Suderburgo-Año 2009).

Un aumento de *Azolla filiculoides* se observa en la Figura 4.3. en la temporada de **verano** con un color verde vivo cosechándose cada tres días poder así evitar la eutrofización, es decir que en todos los estanques ocurren remoción de nutrientes, sin embargo no se pudo evaluar debido a un TRH mucho menor en cada estanque de análisis.

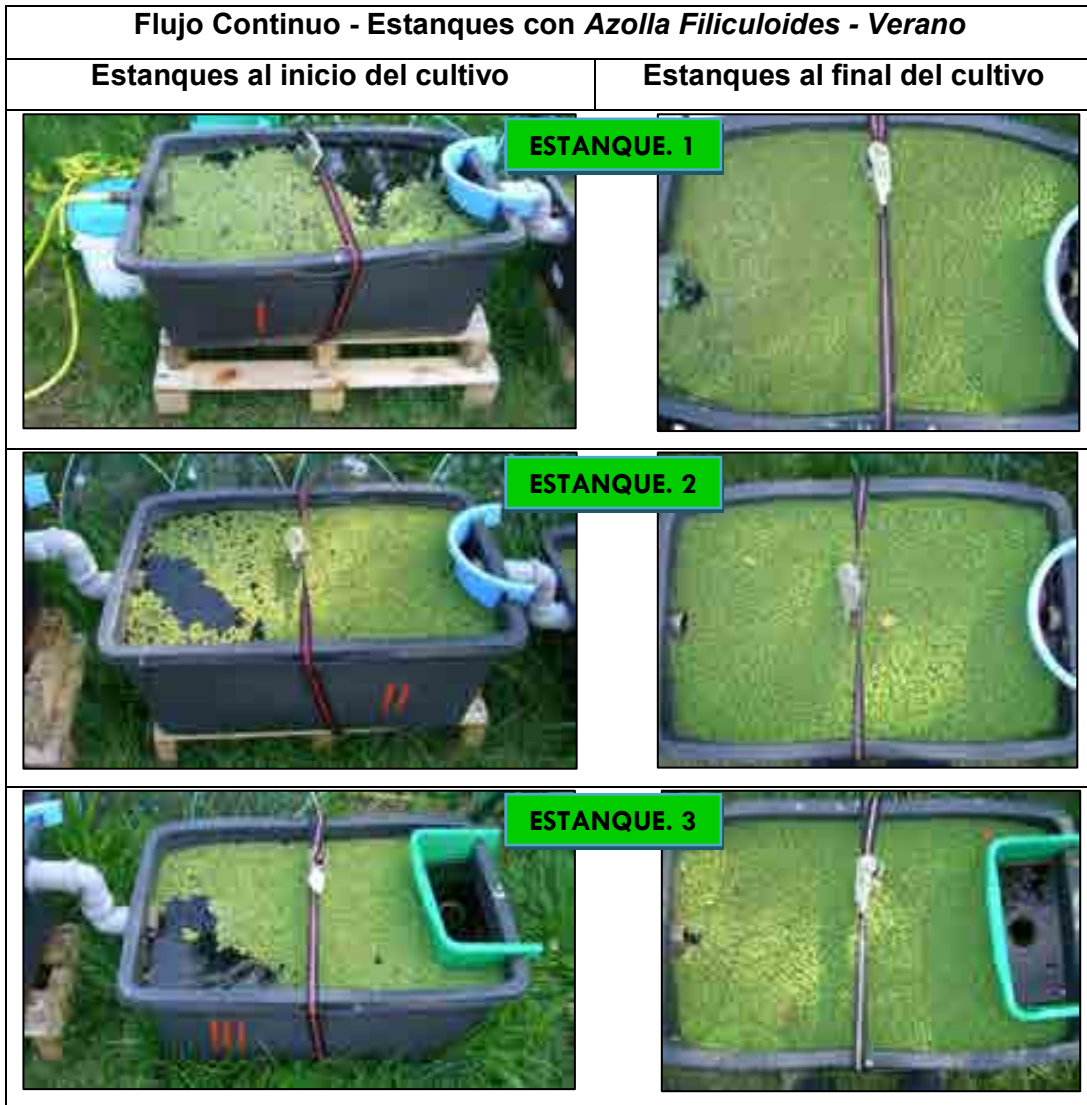


Figura 4. 3: Comportamiento en el desarrollo de *Azolla f.* en el sistema de flujo continuo (Suderburgo-Año 2009).

De igual manera se observa en la Figura 4.4, en la temporada de **otoño** con un color rojizo oscuro cosechándose cada siete días, es decir que en todos los estanques ocurren remoción menor a la anterior en nutrientes, lamentablemente no se pudo cuantificar a causa del TRH.



Figura 4. 4: Comportamiento en el desarrollo de *Azolla f.* en el sistema de flujo continuo (Suderburgo-Año 2009).

Otro sistema por tandas utilizando acuarios se muestra en las Figura 4.5 donde se muestra el desarrollo del primer intento, con una tasa de crecimiento de 0.60 g/d notándose que el área ocupada por esta planta acuática decrece diferencialmente y observándose la acumulación de rizomas en el fondo de los acuarios.

De igual modo en la Figura 4.6 se muestra el desarrollo del segundo intento, con una tasa de crecimiento de 0.93 g/d, observándose un aumento mínimo de 20% del área ocupada inicialmente por la *Azolla filiculoides*.

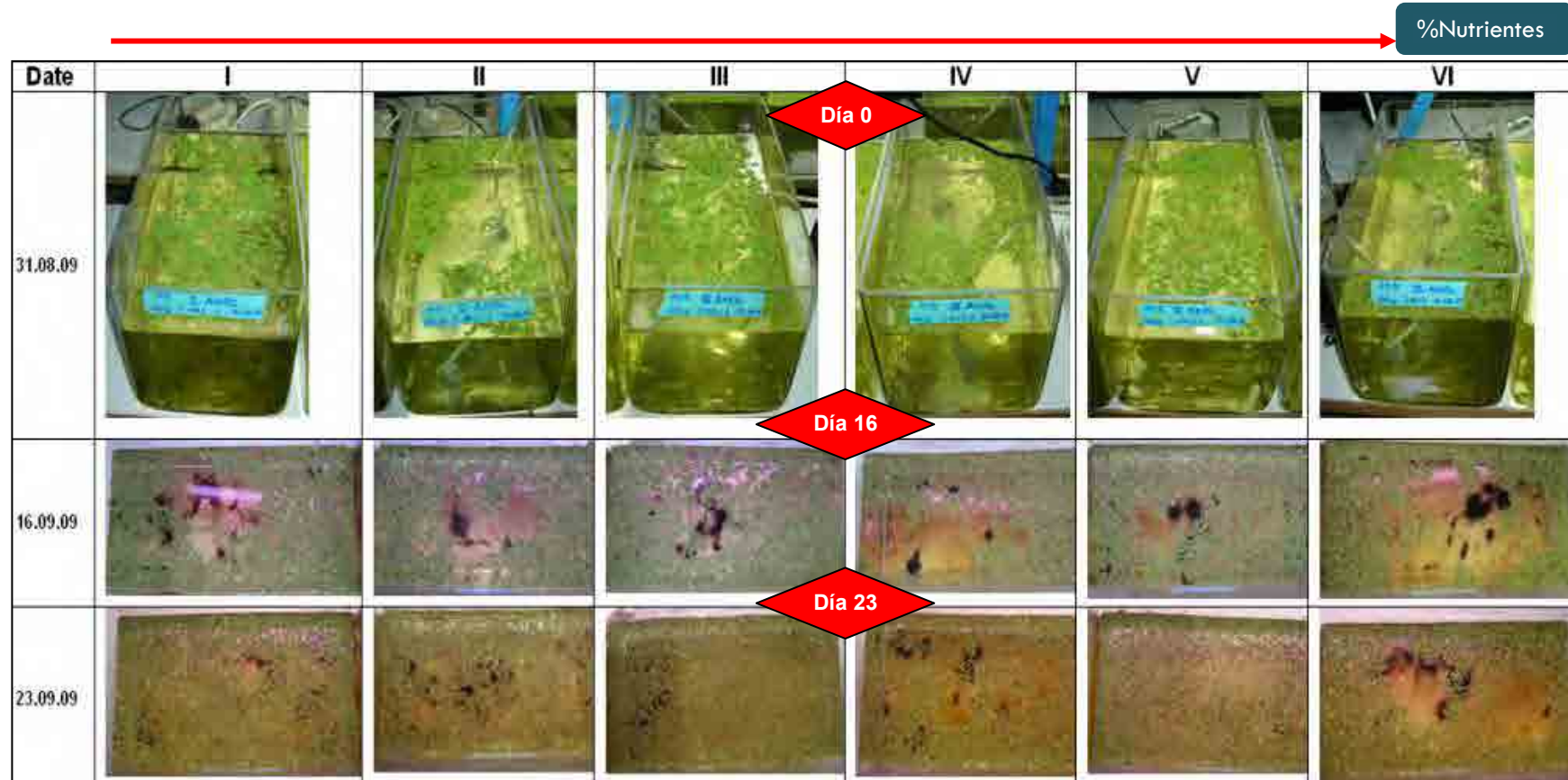


Figura 4. 5: Área ocupada por la Azolla f. en el sistema Por tandas en acuarios del 2do intento con una tasa de crecimiento de un 7.88 g/m²/d (Suderburgo-Año 2009).

		%Nutrientes ←					
Fecha/ Reactor		I	II	III	IV	V	VI
02.10.2009	Día 0						
05.10.2009	Día 3						
12.10.2009	Día 10						
20.10.2009	Día 18						
26.10.2009	Día 24						
03.11.2009	Día 32						

Figura 4. 6: Área ocupada por la Azolla f. en el sistema Por tandas en acuarios del 1er intento con una tasa de crecimiento de un 12.22 g/m²/d (Suderburgo-Año 2009).

En cada estanque se observó un crecimiento minúsculo del helecho, debido al tamaño del estanque y condiciones ambientales a las cuales se expusieron.

A. Requerimientos nutricionales

Según Ly (2005), la concentración de fósforo es esencial en el crecimiento de *Azolla filiculoides*; incidiendo de manera directa en el crecimiento de la planta que puede fijar más nitrógeno; de acuerdo a este estudio la absorción de nitrógeno en forma de nitratos es más eficiente en relación a los nitritos. Para algunos investigadores como Valderrama et al. (2005), *Azolla filiculoides* consume de mejor manera los nitratos que los nitritos, dejando para última instancia la reserva de nitritos, los cuales para ser consumidos necesitan ser transformados a nitratos. Se observó que a medida que disminuyen los nitratos los nitritos en el agua tienden a aumentar.

Ly (2005), en su estudio macrófitas acuáticas flotantes en sistemas integrados de producción animal; comprobó que las plantas a través del proceso de fijación de nitrógeno logran convertir este elemento en amonio, que es una de sus fuentes principales de nitrógeno. En este estudio se pudo justificar esta aseveración ya que la concentración de amonio es relativamente baja en todos los estanques, a esto se aduce las buenas condiciones físicas que presentaron las plantas para adaptarse en este sistema en especial en los estanques dos primeros reactores. Según Suárez (2006), la planta necesita grandes cantidades de fósforo (P) para lograr una acumulación eficiente de nitrógeno (N).

Según Shiomi y Kitoh (2009), la eficiencia de remoción de P ocurre aun después que el N haya sido consumido; y la capacidad de remoción en su estudio fueron bajas para N y altas para P que otras plantas acuáticas. En Alemania, la relación en contenido por la planta, N/P en Julio (verano) es de 11:1 y en Noviembre (otoño) de 8.3:1. Además la tasa de crecimiento y los patrones de absorción de nutrientes con respecto a la temperatura son comparativamente baja en (15-22°C), y alta en (22-30°C).

4.1.5. Análisis Comparativo del Comportamiento de *Azolla Filiculoides*

Durante el estudio de *Azolla filiculoides* para la cual se registran menos investigaciones en Europa. Se ha tomado en cuenta los dos regímenes de lluvias existentes para Alemania, época de verano, otoño e invierno, este análisis ayudó a entender y a manejar de forma adecuada a la especie y planificando sus posibles usos.

Los meses considerados para el estudio fueron julio y agosto (época de verano), setiembre y octubre (época de otoño) noviembre y diciembre (época de invierno).

4.1.5.1. Sistema Por Tandas

La Figura 4.7 muestra el estanque utilizado para el cultivo de *Azolla filiculoides* la cual se experimentarán 4 veces para diferentes épocas.



Figura 4. 7: Estanque con *Azolla Filiculoides* para los sistemas “por tandas” (Sudburgo-Año 2009).

Los resultados de este experimento se aprecian con los parámetros considerados de mayor importancia en el tratamiento de las aguas residuales domésticas.

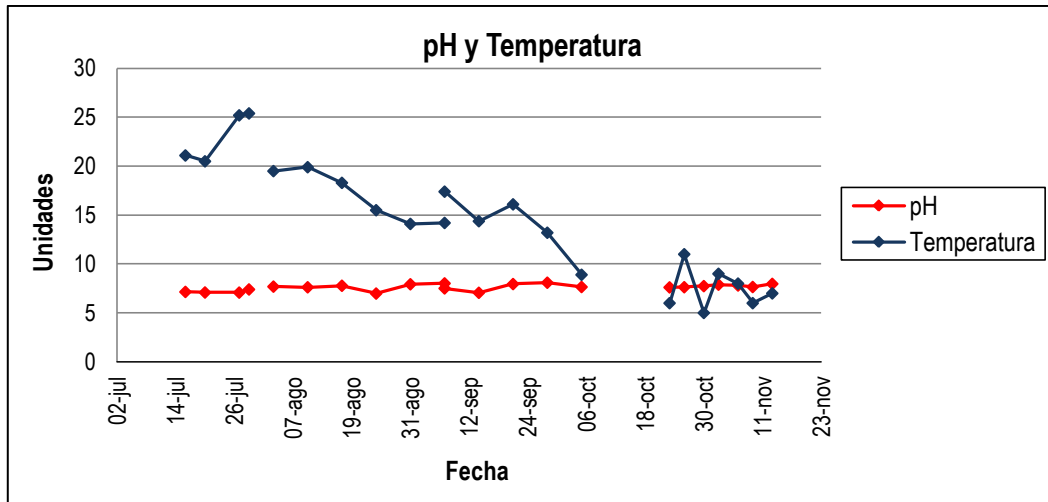


Figura 4. 8: Comportamiento de pH y temperatura en el cultivo de *Azolla f.* (Suderburgo-Año 2009).

Interpretación: La Figura 4.8, muestra el comportamiento de los parámetros de pH y Temperatura evaluados en las diferentes épocas (verano, otoño e invierno). Las gráficas no indican un comportamiento similar en concentración del pH, cuyos valores oscilan entre 7.0 y 8.0 donde se manifiestan ligeros incrementos. Con un promedio de 7.6.

Los elementos inorgánicos comunes en las aguas residuales incluyen cloruro, iones de hidrógeno (que influyen en el pH), y entre los compuestos que causan alcalinidad, nitrógeno, fósforo y azufre. Es necesario mencionar que la descomposición de materia orgánica o de ácidos orgánicos puede también incrementar el nivel de pH en aguas residuales domésticas (Clostre, 2007). Según Valderrama, los niveles de pH pueden alterarse durante el tratamiento de aguas residuales domésticas entre 6.5 y 8.5.

La **temperatura** considerado, uno de los parámetros de gran importancia ya que interviene en los todos los procesos biológicos y fisiológicos que se desempeñan en los sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas. Este parámetro presentó variaciones disminuyendo a lo largo de los meses desde julio (verano) a diciembre (invierno). En la época de verano se presentó un máximo de 25.4°C del medio acuático, y un mínimo de 5°C en la época de invierno.

Este parámetro varía dependiendo de la cantidad de cobertura con la que se encuentre el estanque, incrementando la temperatura del agua cuando existen espacios vacíos especialmente luego de las cosechas.

Según Qing-Yuan (2006), los esporocarpios de la *Azolla filiculoides* pueden normalmente germinar en un promedio diario de temperatura de 20-30°C. Por debajo de 20°C no son favorables. La luz solar es un pre-requisito para la

germinación de la *Azolla*.

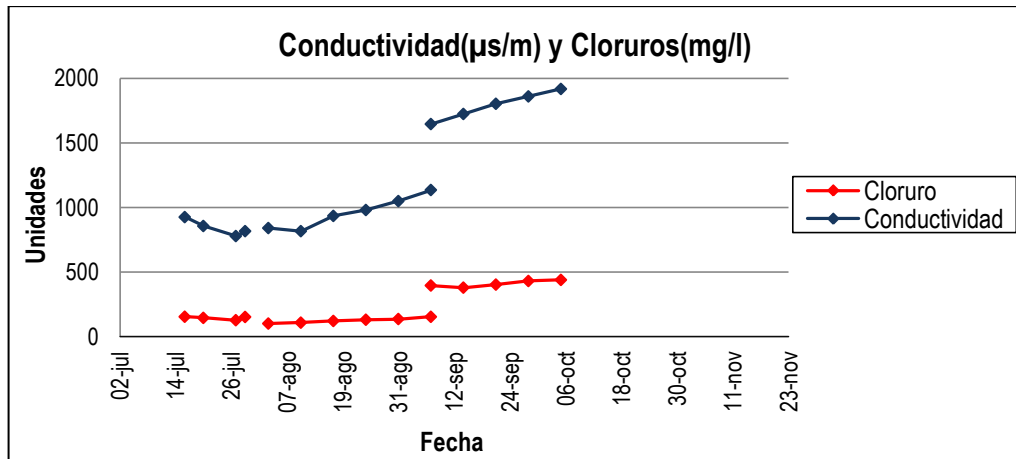


Figura 4. 9: Comportamiento de conductividad y cloruros en el cultivo de *Azolla f.* (Sudburgo-Año 2009).

Interpretación: La Figura 4.9, presenta el comportamiento de la **conductividad** evaluado para las diferentes épocas, desde Julio hasta Octubre.

La conductividad demuestra que las concentraciones de sales en el reactor presenta diferencias marcadas en las diferentes épocas, ingresando concentraciones de 750 µs/cm, siendo el más alta debido a los contenidos de sales en las aguas residuales domésticas y precipitaciones, con una tendencia a aumentar en época de invierno a concentraciones de 1920 µs/cm.

Según Johnson (1986), mediante un estudio realizado en México, usando un medio de solución de nitrógeno, se determinó una tolerancia de salinidad en 50 meq/L NaCl, que no inhibe significativamente a la *Azolla*. Este valor fue comparado con el control (sin agregarle nada de NaCl) utilizando varias especies de *Azolla*.

Se observa que en el segundo y tercer experimento hay un ligero incremento en la concentración de **cloruro** (sal) de un 48 mg/l en, además el promedio del estanque 1, 2 y 3, fueron de 145.5, 126.0 y 410.7 mg/l respectivamente.

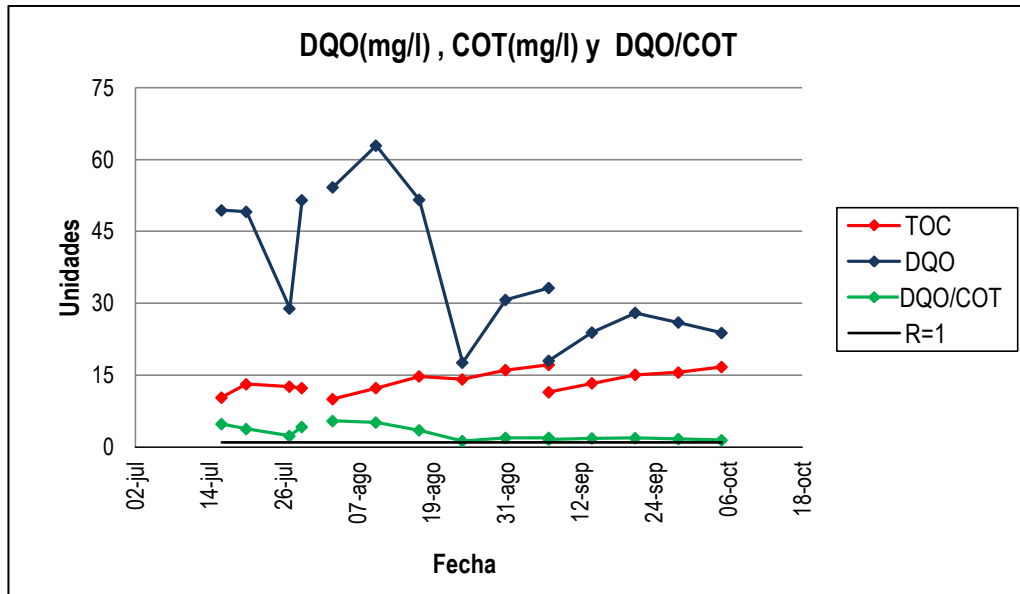


Figura 4. 10: Comportamiento de COT, DQO y DQO/COT en el cultivo de *Azolla f.* (Suderburgo-Año 2009).

Interpretación: La Figura 4.10, muestra un comportamiento removiendo el parámetro de **DQO** del segundo estanque realizado por *Azolla filiculoides*, además existe variaciones poco acentuadas en los otros estanques en las diferentes épocas.

La remoción de **Carbono Orgánico Total (COT)** proporciona información específica acerca del tipo y origen de las cargas orgánicas en el agua residual. Junto con o en combinación con la DQO y la DBO₅, es un parámetro “suma” importante para evaluar la carga orgánica del agua. Dado que los compuestos de carbono orgánico se determinan y especifican en términos de masa de carbono, el COT es una cantidad absoluta exactamente definible y se puede medir de modo directo (unidad: mg C/l).

Las mediciones de COT (mg/l) requieren la medición reglamentada DIN EN 1484, donde se utilizan celdas de un compuesto químico ya establecida del rango 90 a 110 mg/l aplicándose las muestras mediante inyecciones y luego agitándose, muy sencillo de medirse.

La relación **DQO/COT** tiende a disminuir en los estanques 2 y 3, es decir la cantidad biodegradable decrece en ambos estanques. No obstante, esta relación DQO:COT proporciona información importante acerca de la presencia de ciertos compuestos orgánicos (p.ej. alcoholes, proteínas, etc.).

El promedio de la relación en los tres estanques desde las épocas de verano, otoño e invierno son 3.8, 3.2 y 1.7 respectivamente, es decir en verano *Azolla filiculoides* muestra un aumento en la cantidad biodegradable y en invierno muestra que casi totalmente sea biodegradable.

Según Kimm et al, 1999 citado por Valderrama 2005, la remoción de **DBO₅**, **demanda bioquímica de oxígeno**, se debe en estos sistemas tratados con plantas acuáticas a que las raíces densas proporcionan más sitios de adhesión para las colonias bacterianas degradadoras de materia orgánica y actúan como filtros de material particulado.

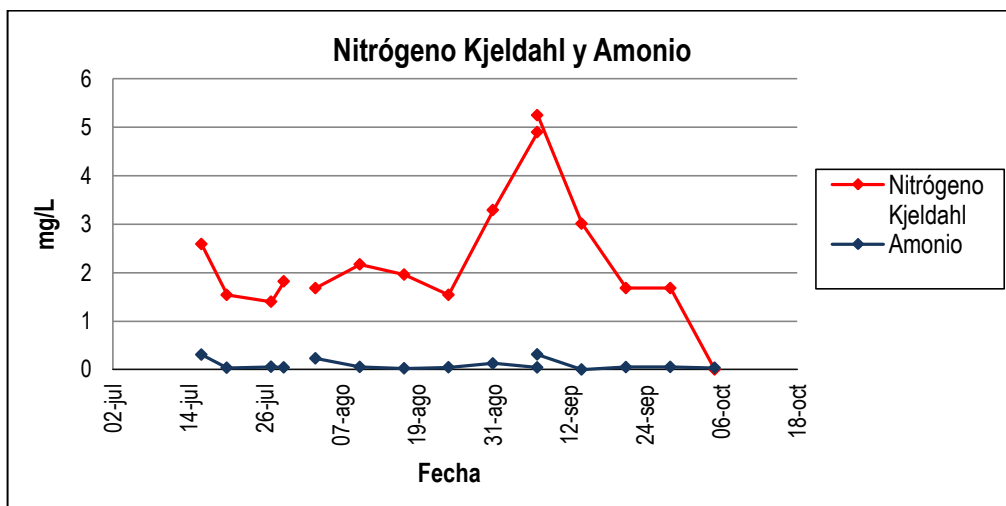


Figura 4. 11: Remoción de *N. amoniacal* (Amonio) y NTK en el cultivo de *Azolla f.* (Sudburgo-Año 2009).

Interpretación: La Figura 4.11, muestra la remoción presentada por *Azolla f.* en parámetros de **Nitrógeno Total de Kjeldahl (NTK)** y parte del N. Amoniacal como **Amonio** donde este disminuye durante el cultivo en cada estanque en las diferentes épocas.

A. filiculoides demuestra una remoción no muy significativa de **Nitrógeno Total de Kjeldahl** en los estanques 1 y 3 en un 30% y 57%. El **Amonio** en los estanques 1, 2 y 3 en un 86%, 81% y 89%, sin embargo las concentraciones al inicio de cada estanque fueron minúsculas.

Según Rodier (2005), el nitrógeno amoniacal existe en solución acuosa tanto en forma de ion amonio como en forma de amoniaco. Para valores de pH superiores a 9.3, predominando el amoniaco, mientras que para valores por

debajo de 9.3 existe un predominio de ion amonio. Los niveles de absorción de nitrógeno son altos debido a la necesidad de las plantas de este bioestimulante para sintetizar proteínas.

Según Shiomi y Kitoh (2009), la capacidad de absorción para un crecimiento óptimo fue estimada de 2mgN/d en bajas niveles de N, y de 5-6 mgN/d en altos niveles de N.

En el **nitrógeno total de Kjeldahl**, los niveles de remoción muestran un comportamiento relativamente igual donde la variación en la remoción no es muy elevada, pero existen mayores ingresos en época de invierno con 5.29 mg/l donde la reducción de la concentración de este parámetro alcanzó a ser nulo. Según la APA (2005), el nitrógeno total de Kjeldahl incluye el nitrógeno orgánico y el Nitrógeno Amoniacal.

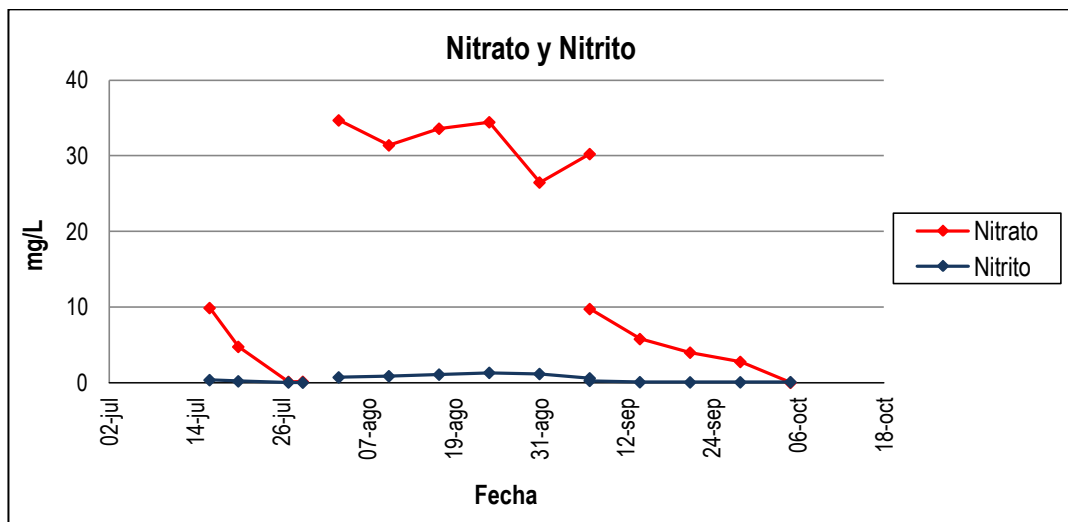


Figura 4. 12: Remoción de nitritos y nitratos en el cultivo de Azolla f. (Sudburgo-Año 2009).

Interpretación: El comportamiento de la remoción en nitritos y nitratos se ve reflejado en la Figura 4.12, donde se aprecian las altas concentraciones de **nitratos** al inicio para todos los estanques, con concentraciones de 9.88 y 34.70 y 9.75 mg/l con remociones fuertes en el estanque 1 y 3 disminuyendo hasta 0.13, 30.25 y 0.00 mg/l respectivamente con remociones de 99%, 13% y 100%. Según la APA (2005), la concentración de nitratos en aguas residuales tratadas puede variar desde 2 a 30 mg/l de N (nitrógeno), dependiendo del grado de nitrificación y desnitrificación del tratamiento.

Para época de verano los **nitritos** presenta una remoción de 0.02 mg/l al final

con un inicial de 0.35 mg/l, es decir hasta el 95% de remoción; en época de otoño se puede observar incrementos que van de 0.71 mg/l a 0.59 mg/l es decir un incremento solo del 17%; y en época de invierno se observa una remoción del 69% presentando al inicio 0.26 mg/l a 0.08 mg/l. Sin embargo para todos los estanques se observa bajas concentraciones de nitritos.

El nitrógeno en forma de **nitrito**, rara vez su concentración excede 1 mg/l en agua residual y 0.1 mg/l en agua superficial o subterránea. A pesar de estar presente en concentraciones tan bajas, los nitritos son de gran importancia en aguas residuales o aguas contaminadas porque son altamente tóxicos para muchos peces y otras especies acuáticas.

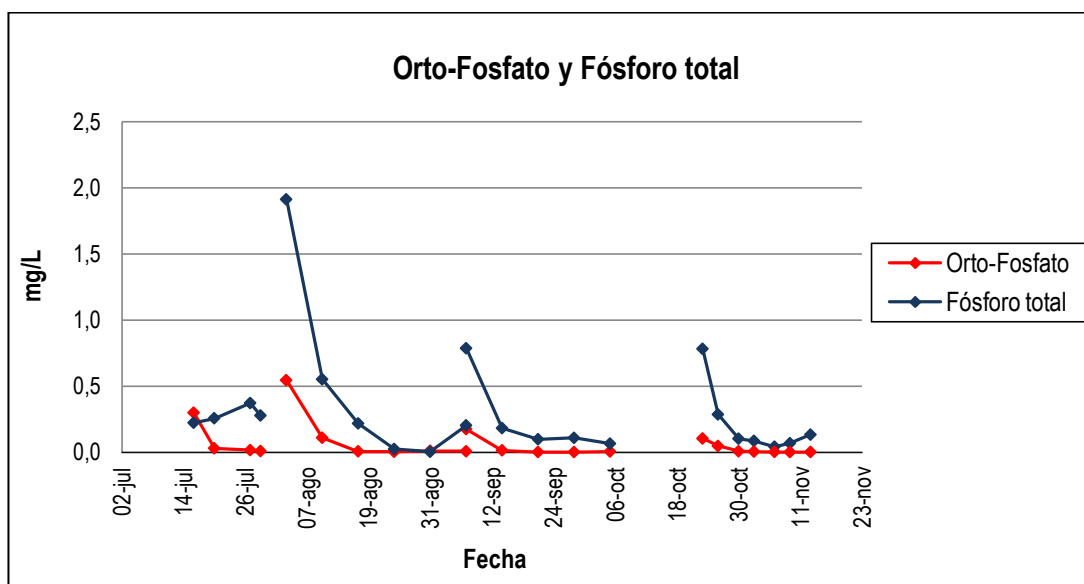


Figura 4. 13: Remoción de fósforo total y fosfatos en el cultivo de Azolla f. (Suderburgo-Año 2009).

Interpretación: La remoción de fósforo total y fosfatos se ve reflejada en la Figura 4.13, donde se presentan comportamientos similares en la remoción de estos parámetros.

En todas las épocas mencionadas las concentraciones de **Orto-fosfato** son más bajas con ingresos de 0.28 en promedio alcanzando remociones hasta 0.01 mg/l. En comparación con las épocas, disminuye la concentración al inicio de cada estanque a medida que la temperatura disminuye a razón de 0.37 y 0.07 mg/l entre los estanques 2, 3 y 4.

Según Rodier (2005), las aguas residuales domiciliarias pueden contener entre 4

y 12 mg/l de fósforo expresado como P. Entre las causas del incremento se presentan las posibilidades de que la especie no consume estos nutrientes o necesite transformarlos en otros compuestos para su mejor absorción.

En los estanques 2; el valor del **fósforo total** al inicio fluctúa de 1.91 mg/l disminuyendo a 0.20 removiéndose en un 89%. Para los periodos de otoño e invierno se observa que el valor promedio al inicio es de 0.78 mg/l disminuyendo con 0.10 mg/l.

Según Shiomi y Kitoh (2006), la Azolla puede absorber completamente P a bajas concentraciones durante 6 días de crecimiento.

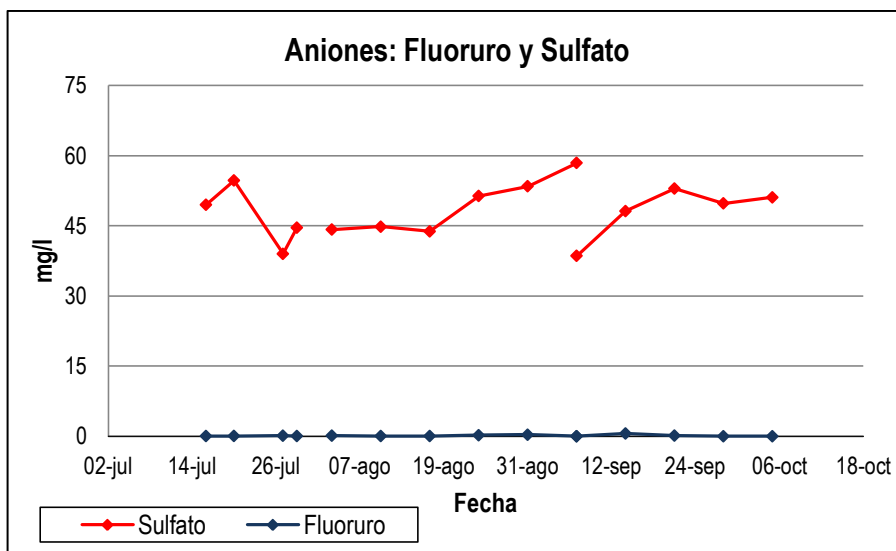


Figura 4. 14: Comportamiento de Fluoruro y sulfato en el cultivo de *Azolla f.* (Suderburgo-Año 2009).

Interpretación: En la Figura 4.14 se puede definir una tendencia creciente del anión **Fluoruro** (F^-), sin embargo se puede observar que la concentración no es tan significativa ya que como máximo se obtuvo un 0.59 mg/l. Con respecto a este parámetro, aún no se ha investigado el efecto adverso a altas concentraciones, en la reproducción de *Azolla filiculoides*.

Se observa que el sulfato tiene un comportamiento creciente para los estanques 2 y 3 desde un 44.20, 38.59 mg/l hasta 58.45 y 51.07 mg/l respectivamente.

4.1.5.2. Sistema de Flujo Continuo

La Figura 4.15 muestra el sistema de estanques utilizado para el cultivo de *Azolla filiculoides* la cual se experimentarán una vez en la época de verano.



Figura 4. 15: Estanques con *Azolla Filiculoides* para los sistemas “de flujo continuo” (Suderburgo-Año 2009).

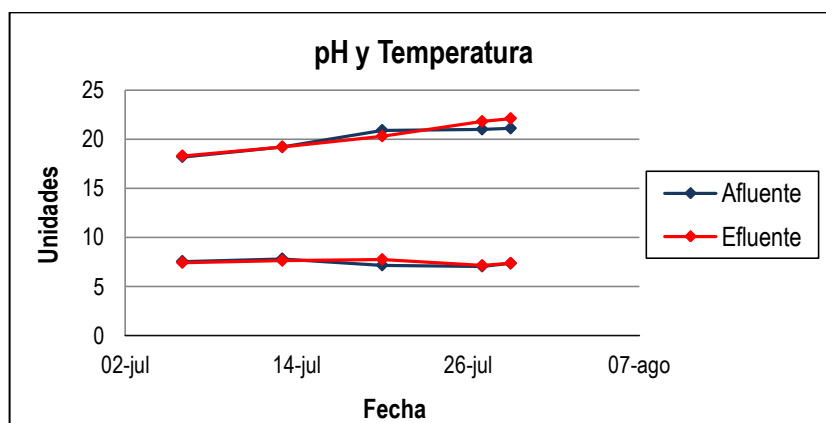


Figura 4. 16: Comportamiento de pH y temperatura en el cultivo de *Azolla f.* (Suderburgo-Año 2009).

Interpretación: La Figura 4.16, muestra el comportamiento de los parámetros de pH y Temperatura evaluados en La época de verano. Las gráficas indican un comportamiento diferente en concentración del pH, cuyos valores oscilan entre 7

y 8 donde se manifiestan ligeros descensos.

Los elementos inorgánicos comunes en las aguas residuales incluyen cloruro, iones de hidrógeno (que influyen en el pH), y entre los compuestos que causan alcalinidad, nitrógeno, fósforo y azufre. Es necesario mencionar que la descomposición de materia orgánica o de ácidos orgánicos puede también incrementar el nivel de pH en aguas residuales domésticas (Clostre, 2007). Según Valderrama, los niveles de pH pueden alterarse durante el tratamiento de aguas residuales domésticas entre 6.5 y 8.5. Las plantas acuáticas como *Lemna M.* y *Eichhornia C.* presentan niveles cercanos a la neutralidad, no presenta variaciones como las algas que al realizar fotosíntesis en proceso que remueve el CO₂ y altera el equilibrio Buffer ácido carbónico-carbonatos, elevando el pH.

La **temperatura** considerado uno de los parámetros de gran importancia ya que interviene en los todos los procesos biológicos y fisiológicos que se desempeñan en los sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas.

Este parámetro presentó variaciones sin embargo, en época seca se presentó una disminución en el afluente y efluente de 18.2 a 22.1°C.

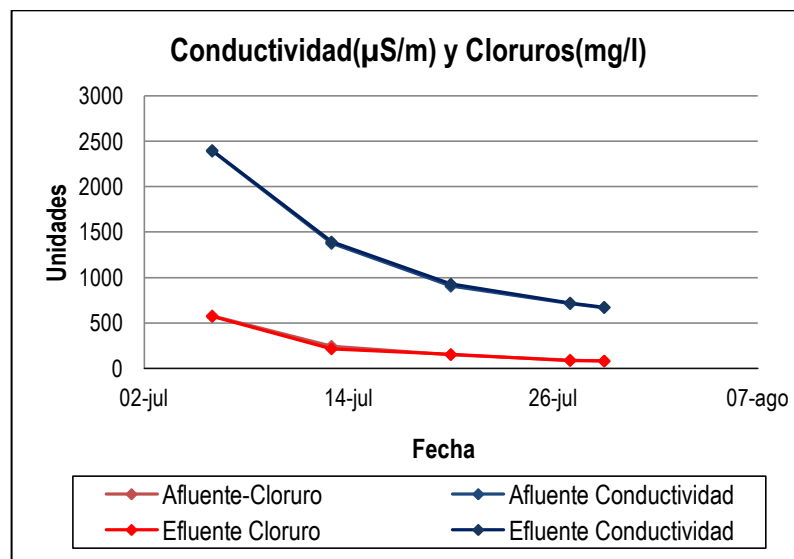


Figura 4. 17: Remoción de conductividad y cloruros en el cultivo de *Azolla f.* (Sudburgo-Año 2009).

Interpretación: La Figura 4.17, presenta el comportamiento de conductividad y

cloruros evaluados para la época de verano, los cloruros muestran un comportamiento relativamente similar al ingreso y salida. Ingresan en verano con valores promedios semejantes de 579 mg/l hasta un 78 mg/l sin observar alguna remoción en su desarrollo.

La conductividad demuestra que las concentraciones de sales en el afluente no presentan diferencias marcadas con respecto al efluente en verano, ingresando concentraciones desde 2400 $\mu\text{s}/\text{m}$ a un 668 $\mu\text{s}/\text{m}$, siendo alta debido a los contenidos de sales en las aguas residuales domésticas.

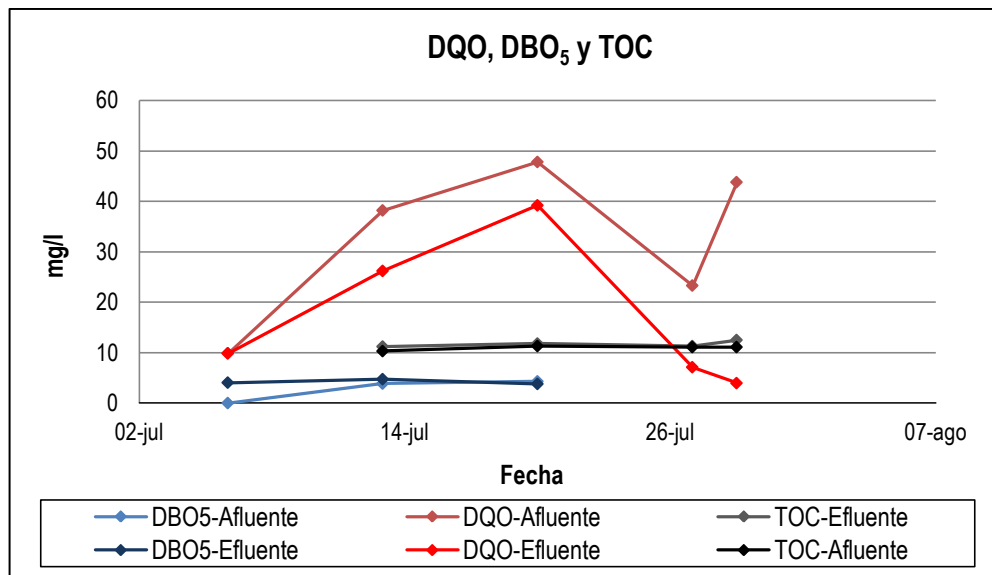


Figura 4. 18: Comportamiento de DQO, DBO₅ y COT en el cultivo de *Azolla f.* (Sudburgo-Año 2009).

Interpretación: La Figura 4.18, muestra el comportamiento en la remoción de **DBO₅** y **DQO**, realizado por *Azolla Ficuloides*, existe una variación no muy acentuada entre el afluente y efluente en verano, la remoción más eficiente durante la época fue de DQO con un ingreso promedio de 38.3 mg/l y removiendo hasta 19.1 mg/l donde la remoción fue de 52.5%.

La demanda química de oxígeno (**DQO**) es un indicador de las sustancias orgánicas biodegradables y no biodegradables con una solución de dicromato, algunos compuestos orgánicos como lignina pueden ser oxidados químicamente, y la concentración es mayor que la DBO como lo demuestra la Fig. 4.18. Se observa que la concentración de **DQO** del afluente y efluente varía desde un 9.9 mg/l a un 43.5 mg/l en un semana, notándose en la siguiente semana un

descenso de hasta 23.9 mg/l.

Para el tratamiento de aguas residuales, la ración **DQO/COT** de 1:1 es el ideal. Esto significa que toda la materia orgánica presente en el agua se descompone en un sistema de tratamiento biológico aeróbico en 5 días o menos.

La comparación de la **DBO₅** entre afluentes y los efluentes de las aguas residuales tratados permite medir la efectividad de sistema de tratamiento para estabilizar las sustancias orgánicas. Según Kimm et al , 1999 citado por Valderrama 2005, la remoción de DBO₅ se debe en estos sistemas tratados con plantas acuáticas a que las raíces densas proporcionan más sitios de adhesión para las colonias bacterianas degradadoras de materia orgánica y actúan como filtros de material particulado.

Según Ghobrial y Siam (1998), la *Azolla filiculoides* puede remover DBO₅ para diferentes concentraciones de agua residual doméstica de 20%, 40% y 60%, obteniéndose una remoción de 84%, 90% y 74% respectivamente.

Se observa que la **DBO₅** es menor de los 5 mg/l en el afluente y efluente, llegando a una concentración casi nula y con un promedio de 4.2 mg/l.

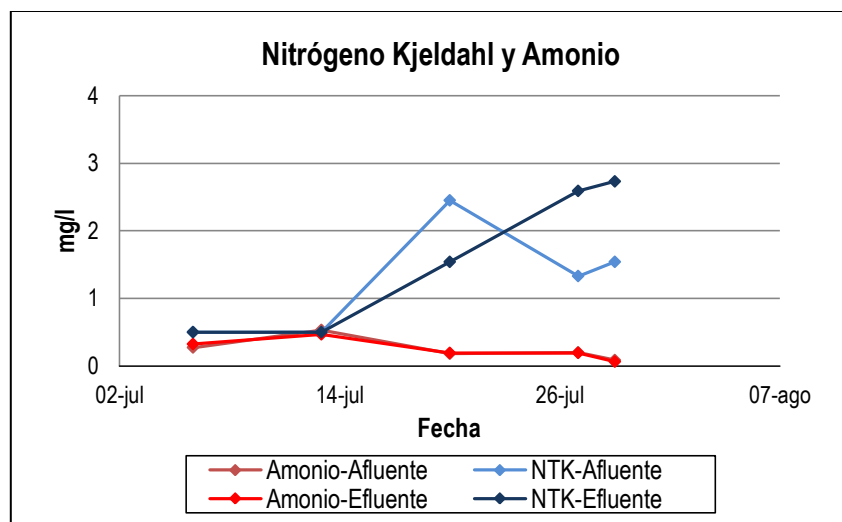


Figura 4. 19: Comportamiento de *N. amoniacal* (Amonio) y NTK en el cultivo de *Azolla f.* (Suderburgo-Año 2009).

Interpretación: La Figura 4.19, muestra una baja remoción presentada por *Azolla f.* en parámetros de Nitrógeno Total de Kjeldahl (**NTK**) entre el ingreso y salida durante la época de verano; lo que no demuestra niveles de absorción de nitrógeno altos debido a la necesidad de las plantas de este bioestimulante

para sintetizar proteínas. Según la APA (2005), el nitrógeno total de Kjeldahl incluye el nitrógeno orgánico y el nitrógeno amoniacal.

Azolla filiculoides no demuestra una remoción significativa en **Amonio** por lo que se muestra un comportamiento similar entre el ingreso y salida notándose un ligero decaimiento en su concentración. Según Rodier (2005), para valores por debajo de 9.3 mg/l existe un predominio de ion amonio.

Una de las razones sería las menores concentraciones de ambos parámetros en y debido al poco TRH con la que se desarrollo.

Según Ghobrial y Siam (1998), la remoción de N Amoniacal fluctúa de 20.6% hasta casi completar la remoción de la carga inicial, para diferentes concentraciones de agua residual (20%-60%), mientras que el N orgánico fue casi totalmente removido. Sin embargo, las remociones en el control (sin plantas) fueron, en N Amoniacal de 16% y de N Orgánico de un 15%.

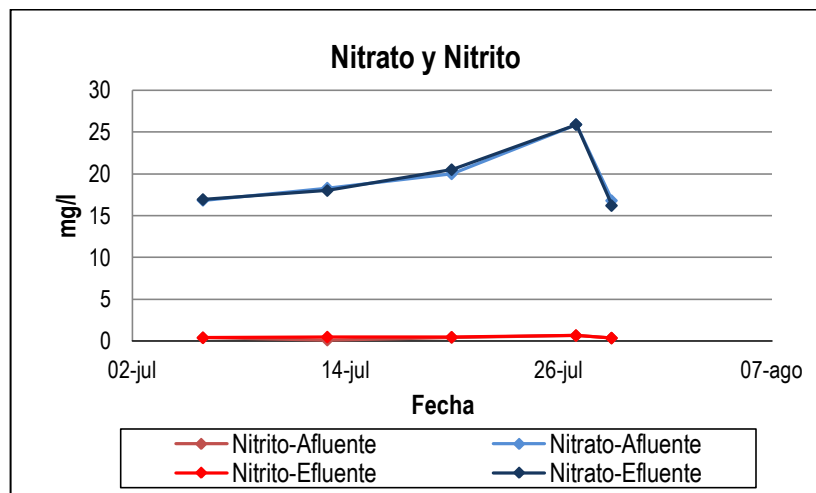


Figura 4. 20: Comportamiento de nitritos y nitratos en el cultivo de *Azolla f.* (Suderburgo-Año 2009).

Interpretación: No se observa un comportamiento de la remoción en **nitritos** y **nitrato** que se ve reflejado en la Figura 4.20, donde se aprecian las altas concentraciones de nitratos y nitritos con concentraciones de 16.9 mg/l a 25.9 mg/l y aumenta en un 53% desde el inicio al final. Según la APA (2005), la concentración de nitratos en aguas residuales tratadas puede variar desde 2 a 30 mg/l de N (nitrógeno), dependiendo del grado de nitrificación y desnitrificación del tratamiento.

El nitrógeno en forma de **nitrito**, rara vez su concentración excede 1 mg/l en agua residual. A pesar de estar presente en concentraciones tan bajas, los nitritos son de gran importancia en aguas residuales porque son altamente tóxicos para muchos peces y otras especies acuáticas.

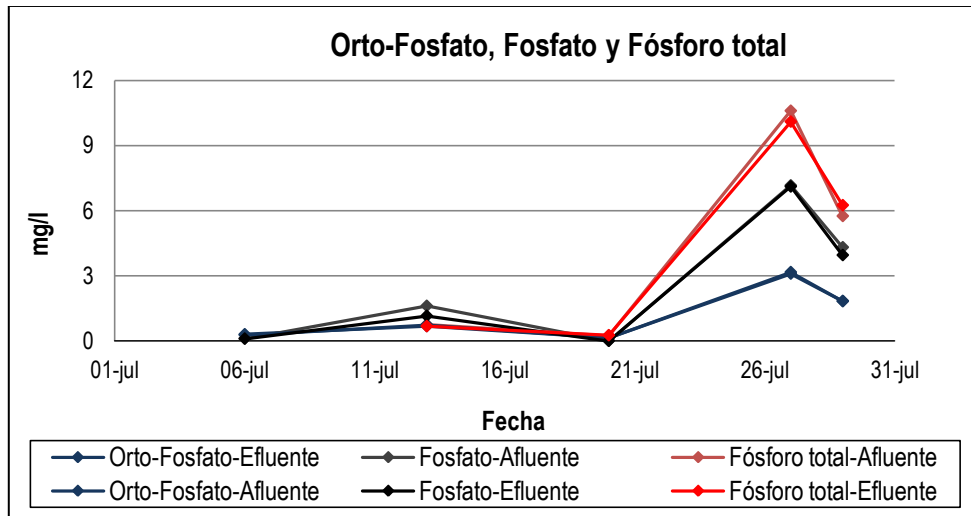


Figura 4. 21: Comportamiento de Orto-Fosfato, Fosfato y Fósforo total en el cultivo de Azolla f. (Sudburgo-Año 2009).

Interpretación: El comportamiento de **fósforo total** y **fosfatos** se ve reflejado en la Fig. 4.21, donde no se muestra remoción de estos parámetros. En esta época de verano se muestra la relación entre fosforo total y orto fosfatos que varía desde 1.00 a 3.41. Además la relación entre fosforo total y fosfatos varía entre 0.46 a 1.58.

Existe un aumento de **Orto fosfato** desde 0.14 mg/l hasta un máximo de 3.16 mg/l con un decaimiento y un promedio total de 1.22 mg/l. Se muestra un aumento de **fosforo total** desde 0.25 mg/l hasta un máximo de 10.35 mg/l, y un decaimiento desde este día con promedio total de 4.33 mg/l. La cantidad de **fosfatos** se asemeja a la cantidad de fosforo total evaluado en el grafico anterior desde 7.2 mg/l a un 0.1 mg/l con promedio de 3.2 mg/l.

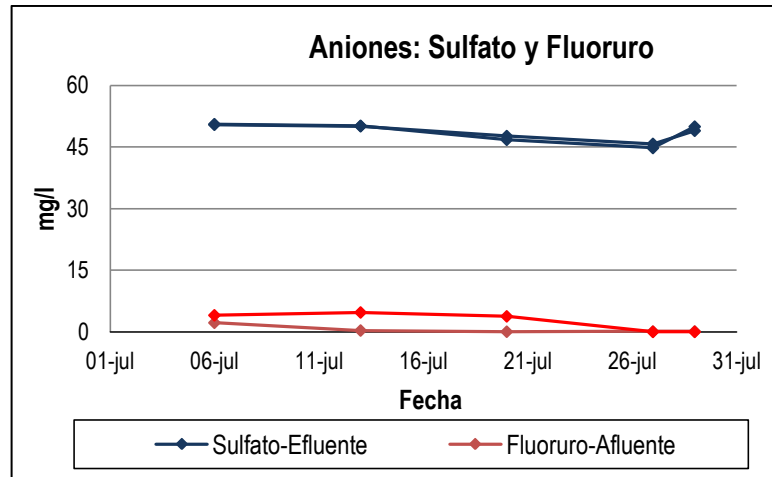


Figura 4. 22: Comportamiento de Fluoruro y sulfato en el cultivo de *Azolla Filiculoides* (Suderburgo-Año 2009).

Interpretación: Se muestra en la Figura 4.22, los comportamientos de los iones **sulfato** y **fluoruro** con concentraciones promedio de 48.6 mg/l y 0.57 mg/l respectivamente. A estos niveles de concentraciones no hubo efecto negativo en el crecimiento de la planta acuática.

Se muestra en la Figura 4.23, altas concentraciones de **metales en solución** como Sodio en un 322.25 mg/l, de Calcio en 35.43 mg/l y de Potasio en un 28.50 mg/l. Además en la Tabla 4.2 se observa concentraciones no significantes de metales en solución de la muestra empleada para los sistemas por tandas y de flujo continuo.

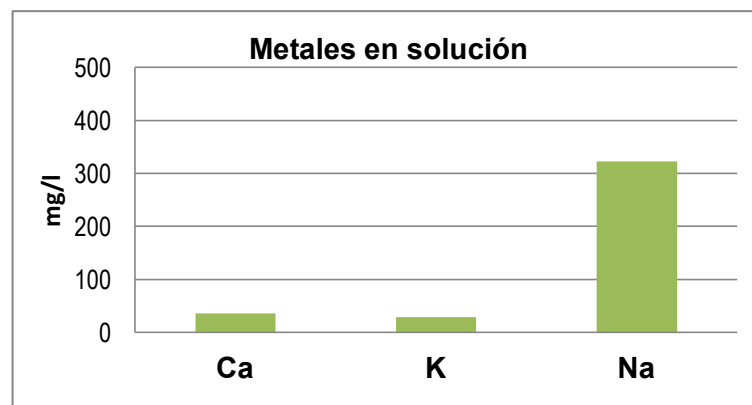


Figura 4. 23: Evaluación de concentraciones de cationes en solución, en el cultivo de *Azolla* (Suderburgo-Año 2009).

Interpretación: Las sustancias inorgánicas que se muestran en el rango de 0 a 0.07 mg/l cumplen con la norma alemana mencionada en el cuadro. Según Jain

(2004), en la India, las plantas acuáticas flotantes adultas *Azolla* y *Lemna* pueden remover metales pesados; la *Azolla* absorbe metales desde: Pb>Cd>Cu>Mn>Fe>Ni>Zn>Co. En comparación con la *Lemna Minor*, la *Azolla* puede absorber un 12% más en promedio de estos metales.

Según Perters (2006), la remoción de elementos inorgánicos evaluado en países en desarrollo muestra un importante comportamiento de la *Azolla-Anabaena*. El efecto de Mg fue estudiado en concentraciones de 0.0, 15.0, 30.0 y 50.0 ppm, mostrando un óptimo crecimiento y fijación del N₂ hasta un 30 ppm de Mg. La absorción de N por la *Azolla* y el peso seco de esta decrecen con altos niveles de Mg. Una deficiencia de Ca en el medio acuático, causa un color pardo oscuro de las frondas en los lóbulos centrales con un incremento en pigmentos de antocianina después de 6 a 7 días. La planta cambia a un color amarillento con frondas reducidas cuando hay deficiencias de potasio, siendo esta misma característica cuando hay deficiencias de P.

Según Scharpenseel y Kunth(2006), a causa de que el Cu es tóxico para el desarrollo de algas, cuando este sobrepasa la concentración óptima como un elemento nutricional (máximo 2.00 ppm en solución de nutrientes), la planta *Azolla* empieza a deteriorarse y degradándose la simbiote *Anabaena*.

Tabla 4. 2: Resumen de concentraciones de metales en solución con bajas concentraciones en el cultivo de *Azolla f.* (Suderburgo-Año 2009).

Rango	≤0.07 mg/l	≤0.3 mg/l	≤6.0 mg/l
		≥0.1 mg/l	≥2.0 mg/l
Metales en solución	Antimonio, Arsénico 193, Arsénico 197, Bismuto, Cadmio, Cobalto, Cobre-327, Cobre-324, Cromo, Estroncio, Hierro, Manganeseo, Níquel, Plomo, Zinc y Tungsteno.	Bario, Boro y Fósforo.	Magnesio y Silicio.

4.1.5.3. Sistema por Tandas en Acuarios

La Figura 4.24 muestra los seis estanques utilizados para el cultivo de *Azolla filiculoides* la cual se experimentarán con condiciones ambientales manipulables.

En este pre estudio, se tomó el promedio del porcentaje de nutrientes presentes

en cada acuario; es decir para el intento 1, el valor promedio fue de 13% en nutrientes y 15% para el intento 2.

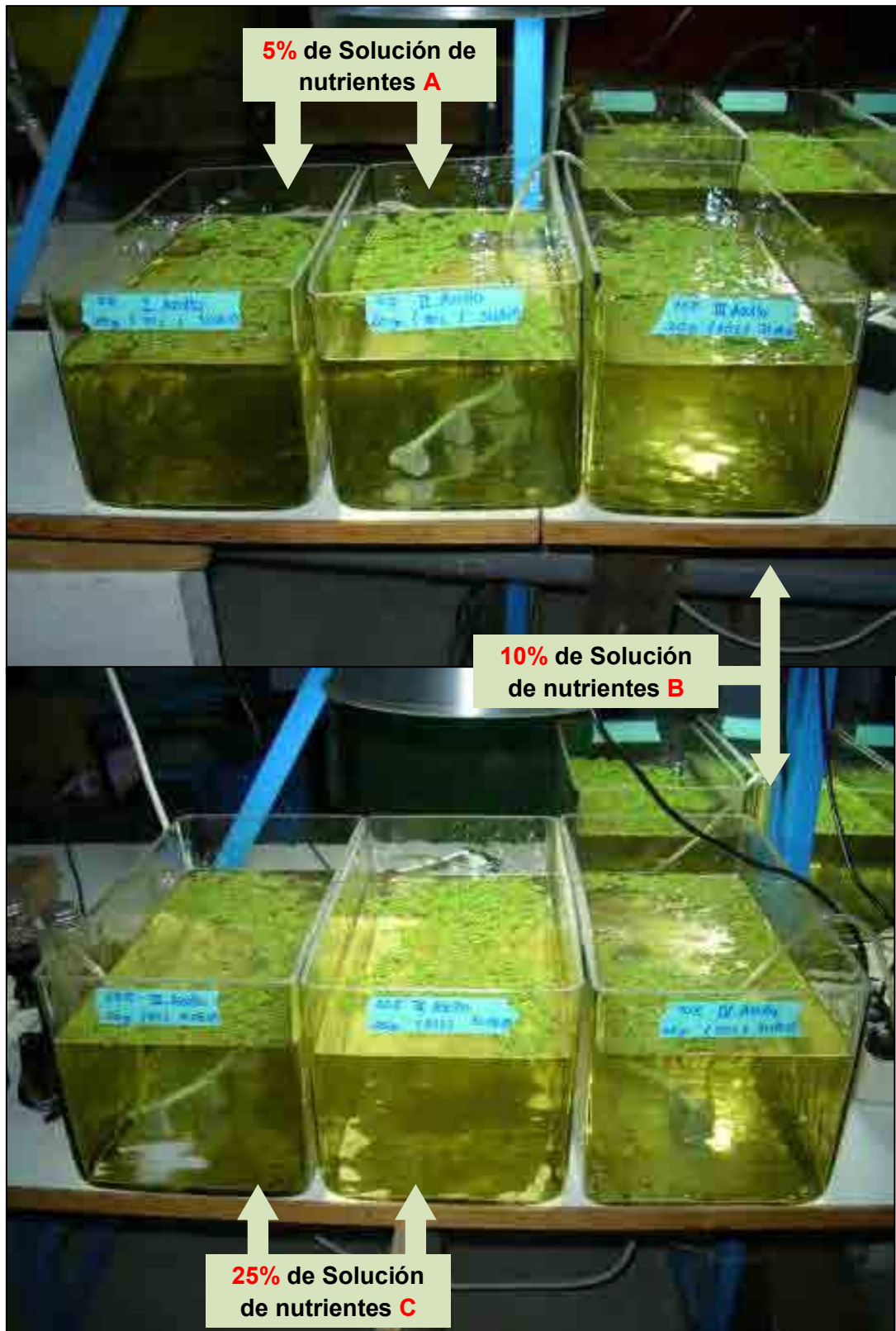


Figura 4. 24: Estanques con *Azolla Filiculoides* para el sist. en acuarios “por tandas” del 1er intento-13% en Solución de nutrientes (Suderburgo-Año 2009).

Comentario: Es el inicio del intento, observándose 5% de nutrientes presentes para 2 acuarios (A), para los 2 siguientes un 10% (B) y los dos últimos un 25% (C).



Figura 4. 25: Estanques con *Azolla Filiculoides* para el sist. en acuarios "por tandas" del 2do intento-15% en Solución de nutrientes (Sudburgo-Año 2009).

Comentario: Es el final del intento, observándose un 10% de nutrientes presentes en cada acuario, para tres de estos (A) y para los tres siguientes existió un 20% de nutrientes (B).

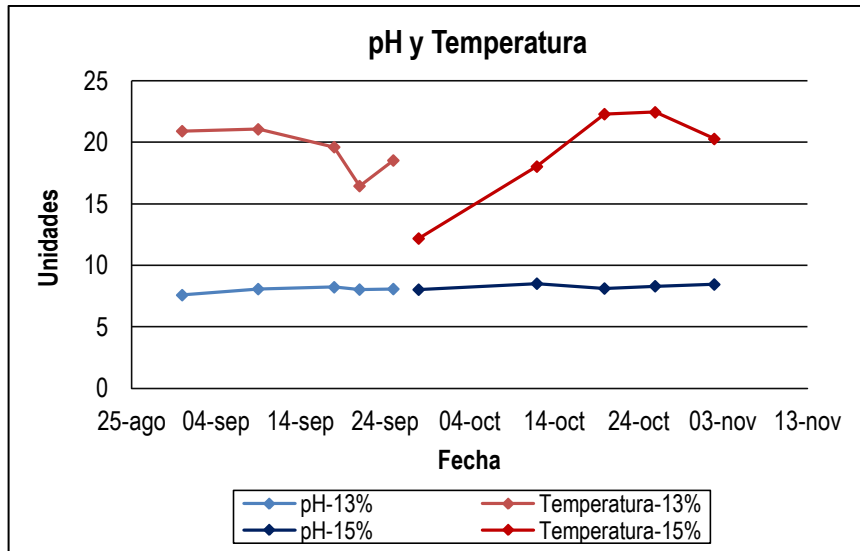


Figura 4. 26: Comportamiento de pH y temperatura en el cultivo de *Azolla f.* (Suderburgo-Año 2009).

Interpretación: La Figura 4.26, muestra el comportamiento de los parámetros de pH y Temperatura evaluados a diferentes concentraciones de sólidos suspendidos extraídos de los lodos activados.

Las gráficas no indican un comportamiento similar en concentración del pH, cuyos valores oscilan entre 7 a 8.2, y con promedio de 7.8 para ambos intentos donde se manifiestan ligeros incrementos.

Los elementos inorgánicos comunes en las aguas residuales incluyen cloruro, iones de hidrógeno (que influyen en el pH), y entre los compuestos que causan alcalinidad, nitrógeno, fósforo y azufre. Es necesario mencionar que la descomposición de materia orgánica o de ácidos orgánicos puede también incrementar el nivel de pH en aguas residuales domésticas (Clostre, 2007). Según Valderrama, los niveles de pH pueden alterarse durante el tratamiento de aguas residuales domésticas entre 6.5 y 8.5. Las plantas acuáticas como *Lemna crassipes* presentan niveles cercanos a la neutralidad, no presenta variaciones como las algas que al realizar fotosíntesis en proceso que remueve el CO₂ y altera el equilibrio Buffer ácido carbónico-carbonatos, elevando el pH.

La **temperatura** considerado uno de los parámetros de gran importancia ya que interviene en los todos los procesos biológicos y fisiológicos que se desempeñan en los sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas. Este parámetro se pudo manipular presentando variaciones debido a la energía luminosa que se instalaron. En primer y segundo intento se presentaron variaciones de temperatura entre 16.5°C a 21.1°C y de 12.2 a 22.5°C respectivamente.

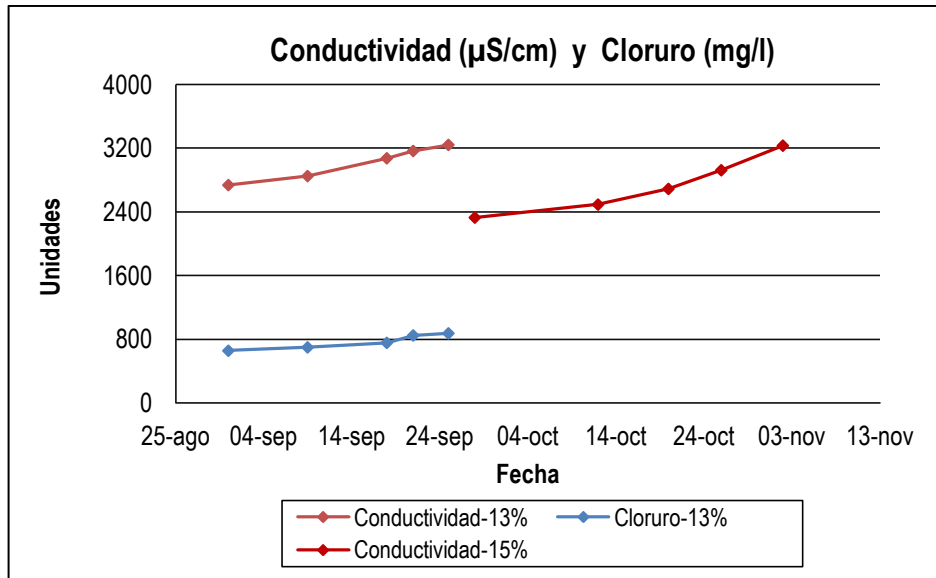


Figura 4. 27: Comportamiento de conductividad y cloruros en el cultivo de *Azolla f.* (Sudburgo-Año 2009).

Interpretación: La Figura 4.27, presenta el comportamiento de **conductividad** y **cloruros** evaluados para los dos intentos, los cloruros muestran un comportamiento relativamente similar.

Para el primer intento se observa un comportamiento con un ligero incremento de **cloruro** con valores de 657.5 a 875.80 mg/l y además presenta un aumento en un 53%

La **conductividad** demuestra que las concentraciones de sales al inicio no presentan diferencias marcadas en los dos intentos, sin embargo se muestra un ligero incremento con concentraciones desde 2,738.3 µs/cm y 2,330.0 µs/cm, siendo alta debido a los contenidos de sales en las aguas residuales domésticas, con una tendencia a aumentar al final a concentraciones de 3,243.3 µs/cm y 3,233.3 µs/cm.

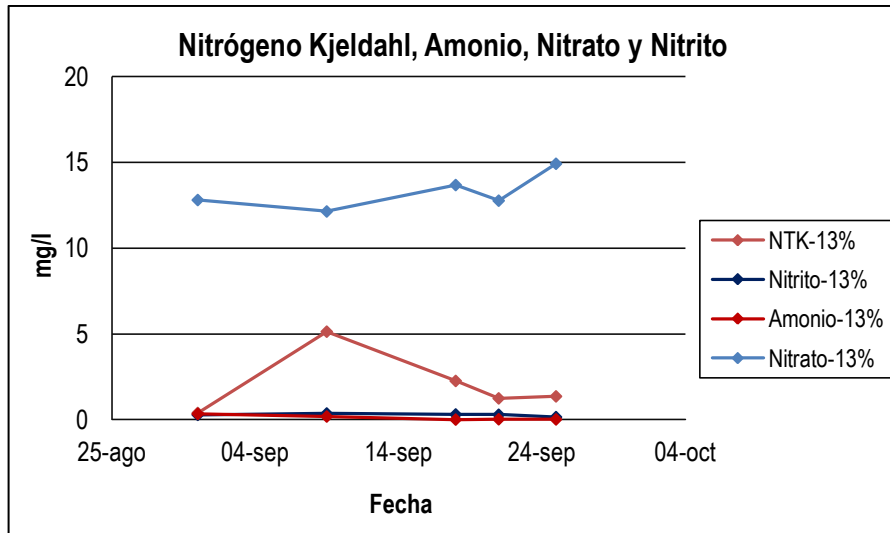


Figura 4. 28: Comportamiento de Amonio, NTK, Nitritos y Nitratos en el cultivo de *Azolla f.* (Suderburgo-Año 2009).

Interpretación: La Figura 4.28, muestra el comportamiento presentada por *Azolla filiculoides* en parámetros de Nitrógeno Total de Kjeldahl (NTK), N Amoniacal (Amonio), Nitritos y **Nitrato**, donde esta última es incrementada ligeramente durante su desarrollo a los estanques en un intento. Según la APA (2005), la concentración de nitratos en aguas residuales tratadas puede variar desde 2 a 30 mg/l de N (nitrógeno), dependiendo del grado de nitrificación y desnitrificación del tratamiento.

Azolla filiculoides demuestra una sola remoción y no muy elevada en **NTK** donde la segunda medición fluctúa entre 5.14 mg/l y 1.37 mg/l alcanzando remociones de 3.77 mg/l en un 73.4%. Según la APA (2005), el nitrógeno total de Kjeldahl incluye el nitrógeno orgánico y el nitrógeno amoniacal, es decir se observa mayor concentración en nitrógeno orgánico.

Los comportamientos mostrados en **Amonio** y **nitritos** no son significantes en este intento. Según Rodier (2005), para valores por debajo de 9.3 existe un predominio de ion amonio sin observarse en los resultados. Los niveles de absorción de nitrógeno son altos debido a la necesidad de las plantas de este bioestimulante para sintetizar proteínas, sin embargo el área ocupada por *Azolla* fue pequeña.

Para este intento el **Amonio** no fue significativo variando desde un 0.34 mg/l a

un 0.02 mg/l, es decir existió un descenso de 0.32 mg/l con una remoción de hasta 93.4%. De igual manera los **nitritos** presentan remociones de 0.21 mg/l al inicio con 0.37 mg/l, es decir hasta el 73.0% de remoción. El nitrógeno en forma de nitrito, rara vez su concentración excede 1 mg/l en agua residual.

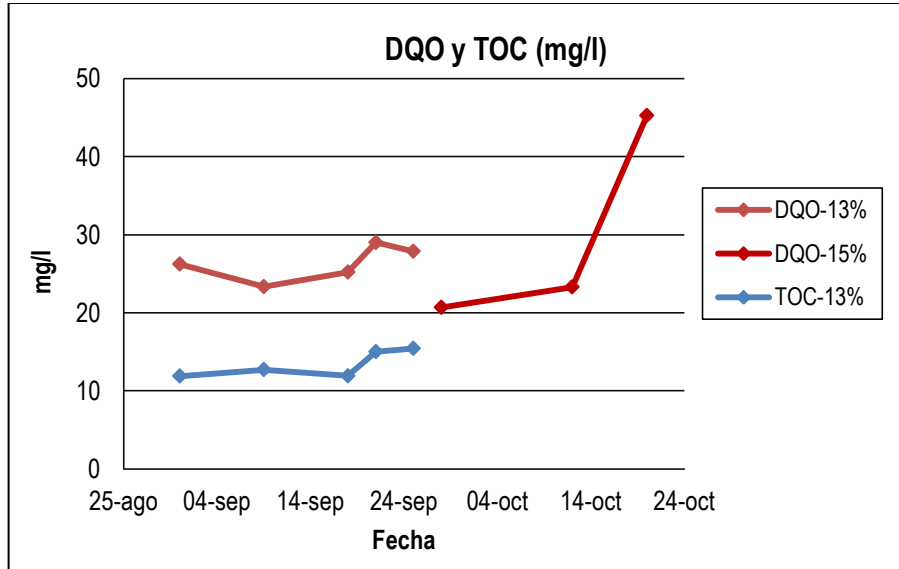


Figura 4. 29: Comportamiento de DQO y COT en el cultivo de *Azolla f.* (Suderburgo-Año 2009).

Interpretación: La Figura 4.29, muestra el comportamiento del DQO y COT, realizado por *Azolla filiculoides*, existe una variación en el parámetro de **DQO** para las dos intentos, sin presentar remoción alguna por lo contrario se muestra un ligero aumento para el primer intento de 23.3 a 27.9 mg/l, para el segundo intento fluctúan de 20.7 a 45.3 mg/l.

La demanda química de oxígeno (**DQO**) es un indicador de las sustancias orgánicas biodegradables y no biodegradables con una solución de dicromato, algunos compuestos orgánicos como lignina pueden ser oxidados químicamente. La relación **DQO/COT** tiende a variar ligeramente en este intento desde 1.81 a 2.20 con un promedio de 1.98, es decir *Azolla filiculoides* muestra un aumento en la cantidad biodegradable.

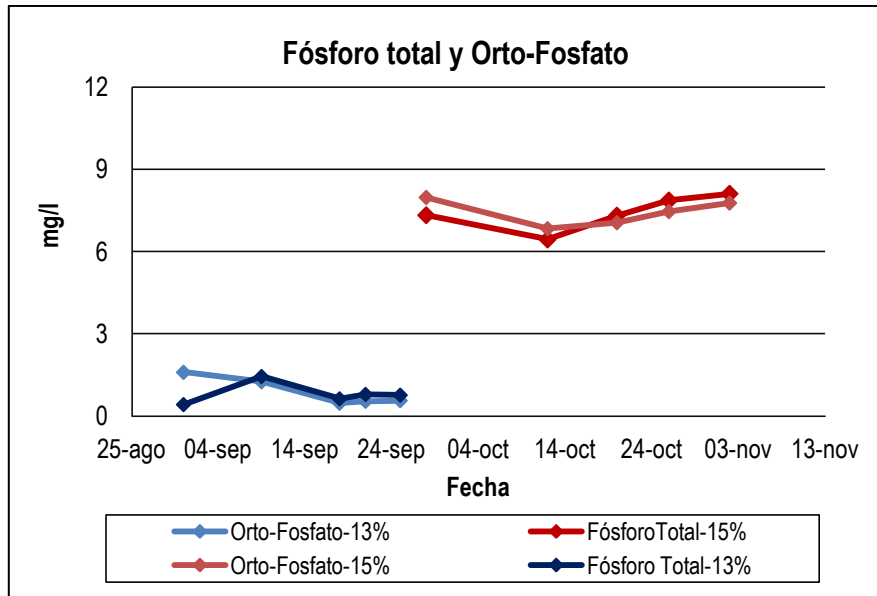


Figura 4. 30: Comportamiento de Orto-Fosfato y Fósforo total (Sudburgo-Año 2009).

Interpretación: La remoción de **fósforo total** y **orto fosfatos** se ve reflejada en la Figura 4.30, donde el comportamiento en la remoción de estos parámetros presenta algunas irregularidades presenciando ninguna disminución como se espera en este tipo de tratamientos.

Los comportamientos de los parámetros de **orto fosfatos** y **fósforo total** son similares para cada intento, es decir la cantidad de fósforo total en realidad representa solo de fosfatos presentes. Se observa concentraciones más altas en el segundo intento.

Según Rodier (2005), las aguas residuales domiciliarias pueden contener entre 4 y 12 mg/l de fósforo expresado como P. Entre las causas del equilibrio se presentan las posibilidades de que la especie no consume estos nutrientes o necesite transformarlos en otros compuestos para su mejor absorción.

Según Ghobrial y Siam (1998), la *Azolla Filiculoides* puede remover hasta un 80% de P en diferentes concentraciones de agua residual en el medio de cultivo (20%, 40% y 60%).

Los valores promedios del **fósforo total** en primer y segundo intento es de 0.80 mg/l y 7.40 mg/l respectivamente. En la grafica se observa los valores promedios del **orto fosfatos** en primer y segundo intento es de 0.90 mg/l y 7.44 mg/l respectivamente.

El fósforo es un nutriente esencial para el crecimiento de plantas y cuando se encuentran en exceso en los efluentes tratados y descargados a las aguas superficiales, pueden causar un crecimiento excesivo de algas.

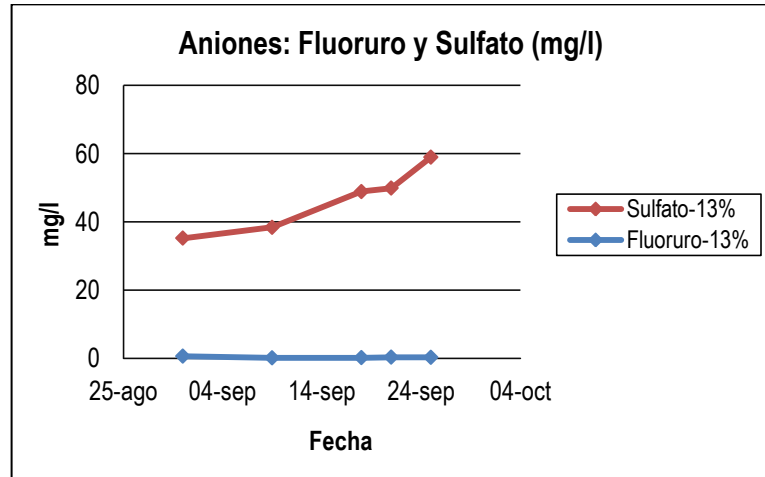


Figura 4. 31: Comportamiento de Fluoruro y sulfato en el cultivo de *Azolla f.* (Suderburgo-Año 2009).

Interpretación: Se muestra los comportamientos de las concentraciones de iones **sulfato** y **fluoruro** en la Figura 4.31 con una concentración promedio de fluoruro de 0.30 mg/l y un incremento del sulfato fluctuando desde 35.2 mg/l hasta 58.9 mg/l, es decir un aumento de 67.36%.

4.1.6. Comportamiento de la Biomasa

Las velocidades de crecimiento de *Azolla filiculoides* dependen de la concentración de nutrientes, es decir, de la caracterización del efluente; del espacio físico que se disponga para ocupar durante su proceso de desarrollo; y del medio ambiente al cual está en contacto.

Por lo tanto se determinó la **COP_A** (Carga Operacional de la Azolla) por cada estanque, iniciando con una cobertura de siembra de la mitad del espacio, en cada uno de los estanques ya sea para los sistemas Por Tandas como para el sistema de Flujo Continuo.

4.1.6.1. Determinación de la carga en sistemas por Tandas

La cantidad de biomasa fresca se ha definido como **COP_A** en g/d, con la que se pudo trabajar en condiciones específicas, tratando de que exista un equilibrio

entre la capacidad de remoción de contaminantes y las cosechas en un área determinada por la especie.

A. Producción de Biomasa

La producción de biomasa indica la cantidad de cosecha en los estanques de tratamiento y de esta manera se obtendrán las densidades.

Tabla 4. 3: Resumen del Cálculo de la Producción de la Biomasa en estado fresco (Suderburgo-Año 2009).

Cálculo de la Producción de biomasa fresca					
Parámetro	Unidad	Estanque 1	Estanque 2	Estanque 3	Estanque 4
Pi=Peso inicial	g	190	230	100	100
Pf=Peso final	g	1132.24	620	450	259
Pf / Pi	-	6:1	2.7:1	4.5:1	2.6:1
ΔP=Producción de biomasa	g	942	390	350	159
Días transcurridos	d	13	35	28	21

Comentario: La tabla muestra en la primera columna los parámetros, en la segunda columna las unidades y en las siguientes los resultados de la Azolla fresca. La Producción de la biomasa **ΔP**, se obtiene de la diferencia de los pesos al final con los pesos al inicio. El comportamiento de la biomasa en cada estanque fue analizado por los periodos mostrados en la última fila.

Tabla 4. 4: Resumen de resultados obtenidos en el Producción de la biomasa de la Azolla (Suderburgo-Año 2009).

Cálculo de la Tasa de Producción en biomasa de Azolla				
Estanque	Estación		Biomasa fresca (g/d)	Biomasa seca (g/d)
	Inicio	Fin		
Estanque 1	Verano	Verano	72.48	4.20
Estanque 2	Verano	Otoño	9.90	0.57
Estanque 3	Otoño	Invierno	12.29	0.71
Estanque 4	Otoño	Invierno	7.18	0.31

Comentario: La tabla muestra en la primera columna los estanques en diferentes temporadas como se señala en la segunda columna; y en las dos últimas, los resultados de las tasas de producción de la *Azolla Filiculoides*.

B. Rendimiento de la Biomasa Fresca

En este experimento cada estanque representa el cultivo del mismo helecho en un periodo de tiempo. Con el objetivo de determinar el peso total de la Azolla que cubría en cada estanque durante todo el cultivo, se extraía todo el helecho para luego ser pesado.

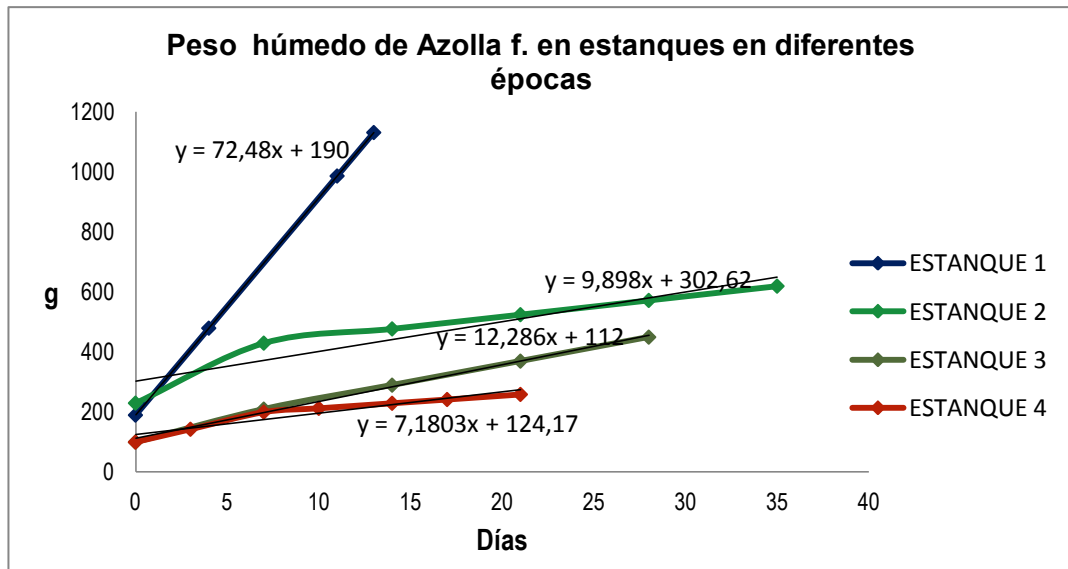


Figura 4. 32: Comportamiento del Peso húmedo en el cultivo de *Azolla filiculoides* (Suderburgo-Año 2009).

Interpretación: Las curvas representan el comportamiento de la biomasa fresca que se cultivó diariamente en cada estanque, desarrollándose la Azolla en distintas condiciones ambientales. Mediante estas curvas se obtuvo las pendientes de las rectas aproximadas, lo cual significaría la cantidad de biomasa fresca que se produce cada día.

Se puede observar en la Figura 4.32 para los estanques (distintas épocas desde verano hasta inicios de invierno) inclinaciones crecientes, donde la primera curva (**verano-Estanque 1**) muestra el peso final en 5.96 veces el peso inicial en solo 13 días obteniendo una pendiente notoria o COP_A en 72.48 g/d.

Se muestra además que a partir del Estanque 2, las gráficas empiezan a tener tendencias menos crecientes que el anterior, en la gráfica (**entre verano y otoño-Estanque 2**), la planta *Azolla Filiculoides* llegó a pesar 2.70 veces el peso inicial en 35 días siendo la pendiente de la curva o COP_A en 9.90 g/d, es decir, la

diferencia entre el primer y segundo estanque llego a ser de 62.58 g/d, concluyendo que solo en verano se puede lograr la mayor eficiencia en su uso.

Seguidamente en las dos últimas gráfica (**entre otoño e invierno-Estanques 3 y Estanque 4**) se muestran tendencias poco crecientes con pendientes o COP_A de 12.29 y 7.18 g/d donde además se observa que llega a ser 4.50 veces el peso inicial húmedo en 28 días y 2.59 veces en 21 días respectivamente.

Es decir, la producción para 13 días en las épocas desde verano a invierno va decreciendo desde 942.24 a 93.34 g de *Azolla filiculoides* húmedo.

Además se puede notar que en **verano**, en solo 3 días de crecimiento llega hasta duplicar su peso en el estanque 1, sin embargo se necesitarían para este objetivo 12 días y 11 días de crecimiento en **otoño** (promedio del estanque 2 y 3) e **inicios de invierno** (estanque 4) respectivamente. Es decir, en esta última se nota cierta contradicción porque a menor temperatura la eficiencia en su crecimiento debería disminuir.

C. Rendimiento de la Biomasa Seca

Con el fin de determinar el peso seco de la Azolla que cubría en cada estanque durante todo el cultivo, se utilizó el método de Eliminación de humedad.

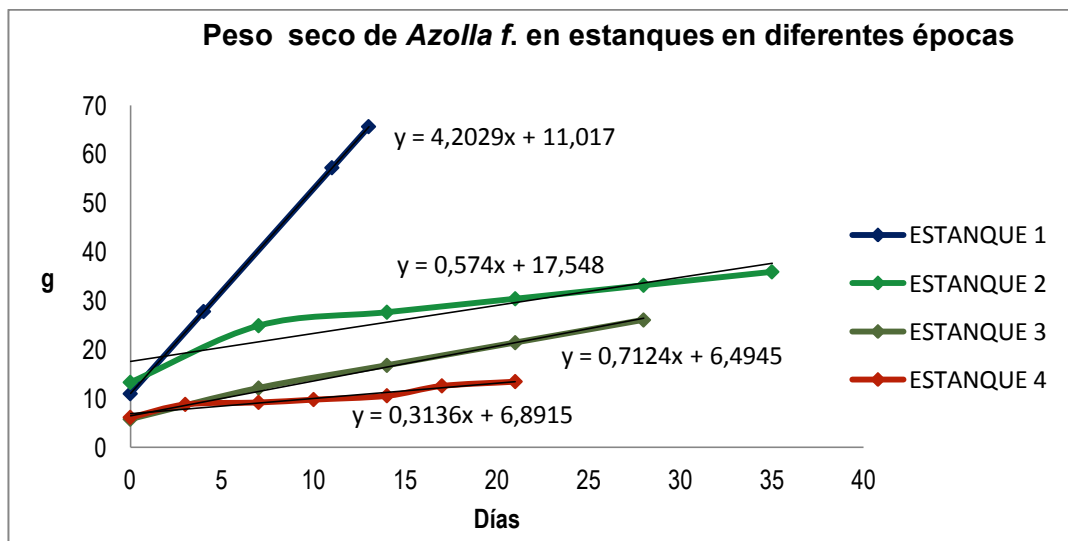


Figura 4. 33: Comportamiento del Peso seco en el cultivo de *Azolla filiculoides* (Sudburgo-Año 2009).

Interpretación: Las curvas representan el comportamiento de la biomasa seca que se cultivó diariamente en cada estanque, desarrollándose la *Azolla* en distintas condiciones ambientales. Mediante estas curvas se obtuvo las pendientes de las rectas aproximadas, lo cual significaría la cantidad de biomasa seca que se produce cada día.

Comparando las Figura 4.32 y 4.33 se puede observar que el porcentaje de materia seca del helecho *Azolla filiculoides* fluctúan de verano a invierno desde 5.80% a 5.24% del peso total de la planta con agua. Un complemento a esta información fue la obtención del porcentaje en materia orgánica y carbonatos que varía desde un 0.73% en verano a un 0.82% en invierno del peso total de la *Azolla filiculoides* fresca.

Además en la Figura 4.33 se muestra la tendencia creciente de la *Azolla filiculoides* en peso seco para las distintas épocas desde verano hasta inicios de invierno, donde la primera gráfica (**verano-Estanque 1**) muestra la relación máxima de 5.96 veces su peso inicial en solo 13 días obteniéndose un COP_A en 4.20 g PS/d.

Se muestra en la gráfica (**entre verano y otoño-Estanque 2**) una relación de 2.70 veces el peso inicial en 35 días resultando un COP_A de 0.57 g/d, es decir la diferencia entre el primer y segundo estanque llego a ser de 3.63 g/d.

En las dos últimas gráfica (**entre otoño e invierno-Estanque 3 y Estanque 4**) se muestran tendencias poco crecientes con COP_A de 0.71 y 0.31 g/d donde además se observa que llegan a ser 4.50 veces del peso seco inicial en 28 días y 2.18 veces en 21 días respectivamente.

Es decir, la producción para 13 días en las épocas desde verano a invierno va decreciendo desde 54.64 g a 4.08 g de la *Azolla filiculoides* fresca.

De igual manera se puede notar que en **verano**, solo 3 días de crecimiento llega hasta duplicar su peso seco en el estanque 1, sin embargo se necesitarían 12 días y 17 días de crecimiento en **otoño** (promedio del estanque 2 y 3) e inicios de invierno (estanque 4) respectivamente.

4.1.6.2. Determinación de la carga en flujo continuo

A. Rendimiento de la Biomasa Fresca

Según Ghobrial y Siam (1998), con altas concentraciones agua residual doméstica puede ser tratada mediante *Azolla filiculoides*. Siendo una óptima concentración un 60% y así obtener una máxima cosecha de la planta.

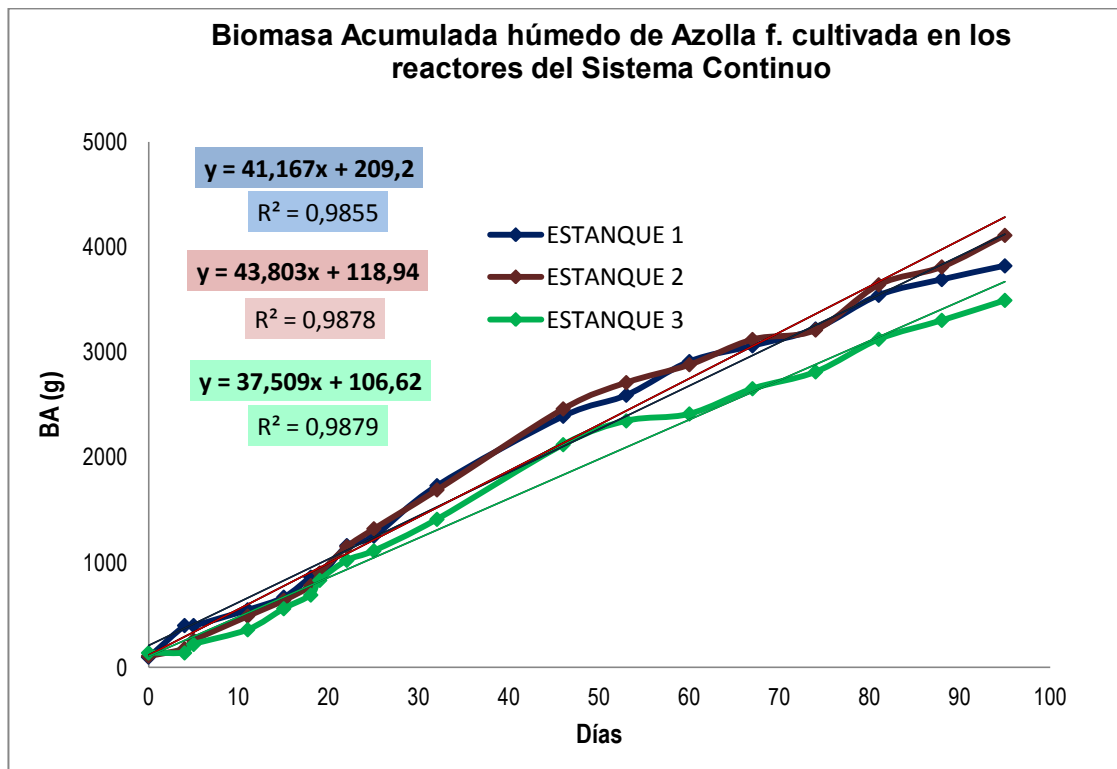


Figura 4. 34: Comportamiento de la Biomasa de *Azolla filiculoides* durante 95 días desde verano a otoño (Sudburgo-Año 2009).

Interpretación: Se muestra en cada Reactor, los resultados de la Biomasa acumulada que se produce durante los 95 días. De acuerdo a la fórmula anterior, BA se obtiene de la suma del peso actual con la sumatoria de los pesos de las cosechas anteriores.

Las gráficas muestran tendencias lineales similares como se observa en la Figura 4.34, sin embargo los estanques 1 y 2 muestran comportamientos muy cercanos, significando mayor eficiencia de la *Azolla filiculoides* en los dos primeros estanques.

Aproximadamente la capacidad de carga en el **estanque 2** fue de 43.8 g/d, siendo mayor en 2.6 g/d del estanque 1 y en 6.3 g/d del estanque 3, que representa el 6% y 14% del estanque 2 respectivamente.

Se podría afirmar que, el helecho fresco para su mayor crecimiento y reproducción necesita de un medio y otros factores externos inmóviles, por lo que en el estanque 2 no hubo considerable movimiento y se mostró un crecimiento más acelerado que en los otros estanques.

En la Figura 4.34, se puede apreciar que el coeficiente de determinación es de un 99% en las funciones lineales, significando una dependencia casi al 100% de la cantidad en peso de *Azolla filiculoides* respecto al número de días, en este periodo de tiempo de 95 días transcurridos.

B. Rendimiento de la Biomasa Seca

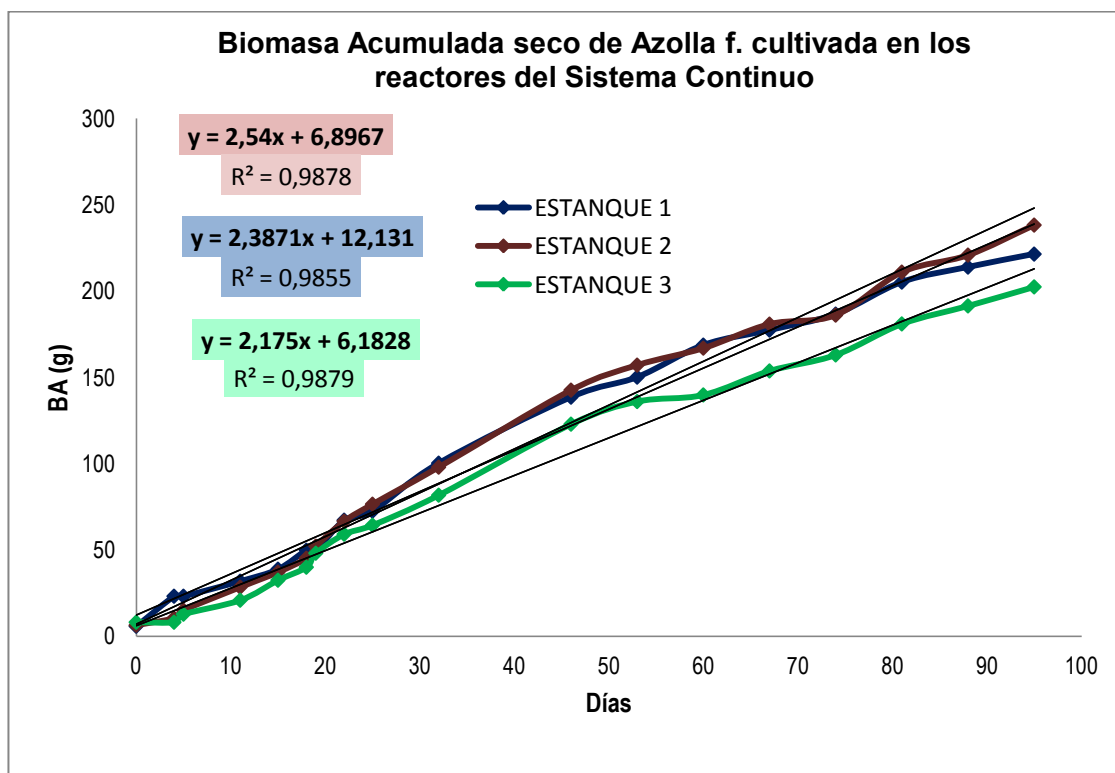


Figura 4. 35: Comportamiento de la cosecha en materia seca de *Azolla filiculoides* (Suderburgo-Año 2009).

Interpretación: Se muestra en cada Reactor, los resultados de la Biomasa acumulada seca que se produce durante los 95 días. Al igual que en el caso de

la *Azolla* fresca se obtuvo los valores de BA, resultado de la suma del peso seco actual con la sumatoria de los pesos secos de las cosechas anteriores.

Las gráficas muestran tendencias lineales similares como se muestra en la Figura 4.35, sin embargo, los estanques 1 y 2 muestran comportamientos de la *Azolla filiculoides* igualmente muy cercanas.

Comparando la Figura 3.34 y conociendo el porcentaje de **materia seca** del helecho de un 5.80%, se puede deducir curvas relativamente congruentes al comportamiento de la remoción de contaminantes en el medio en el cual se cultivó; además de este valor porcentual, la cantidad de **materia orgánica** fue de 12.84%.

Aproximadamente la capacidad de carga de materia seca en el estanque 2 fue de 2.54 g/d, siendo mayor en 0.15 g/d del estanque 2 y en 0.36 g/d del estanque 3.

Luego de haber obtenido el área de cada estanque de 0.30 m², se dividió el tiempo del experimento con el fin de diferenciar comportamientos en dos estaciones, en **verano** constituyendo 22 días y los siguientes días haciendo un total de 70 días en **otoño**.

C. Carga Operacional de la *Azolla* Fresca

La tasa de cosecha en peso (**con humedad**) presentó comportamientos similares en cada estanque dejando en cada cosecha o extracción en un 50% del área total evitando así una contaminación por falta de oxígeno.

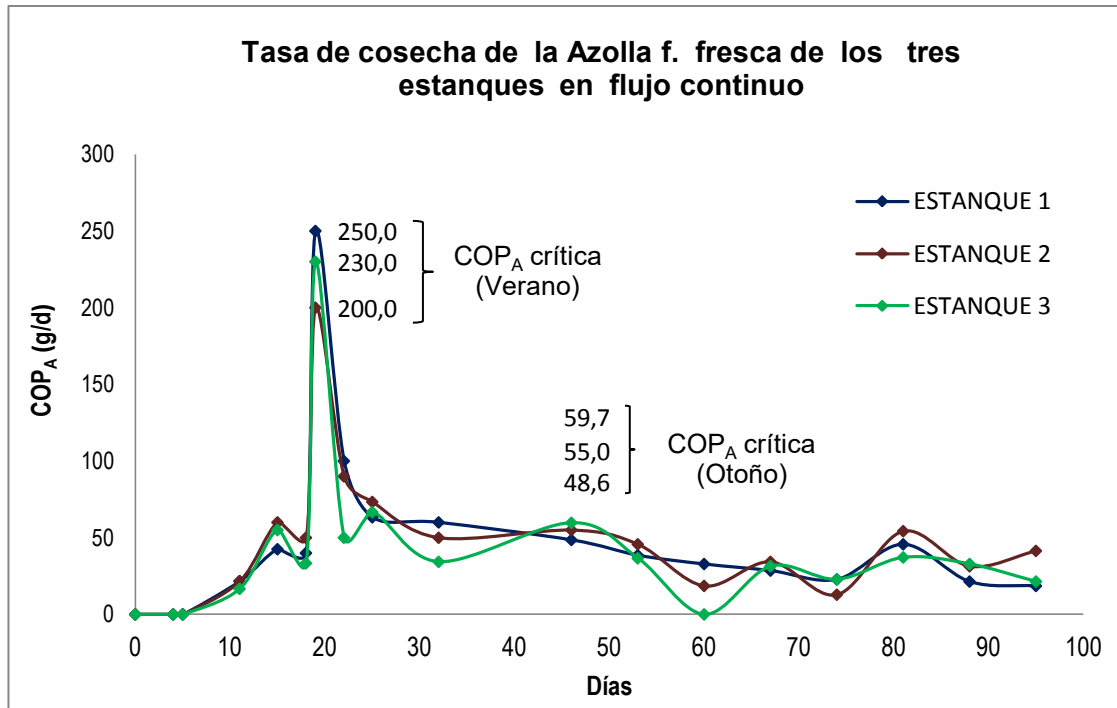


Figura 4. 36: Comportamiento de la Carga Operacional con *Azolla filiculoides* fresca (Suderburgo-Año 2009).

Interpretación: Las curvas muestran el Comportamiento de los COP_A a lo largo de los 95 días en los tres reactores. La Carga Operacional COP_A, se obtiene de la división de la cantidad extraída con el número de días entre cosechas (diferencia del día de cultivo menos el día de cosecha anterior).

La Figura 4.36 muestra que en el **estanque 1** la tasa máxima de cosecha o COP_A fue de 250 g/d, es decir, el crecimiento se desarrolló eficientemente en este estanque mientras que en los estanques 2 y 3 las tasas COP_A fueron de 200 y 230 gramos/d respectivamente.

Se muestra además que en los primeros días de cultivo no hubo cosecha ya que no llegaba a ocupar el 100% del área del estanque, es decir la *Azolla filiculoides* estaba recientemente adecuándose al medio instalado necesitando 11 días aproximadamente después de ser colocada en los estanques.

El promedio de la tasa de cosecha en los estanques 1, 2 y 3 a partir del día 11 de su colocación son de 55.6, 55.9 y 48.5 gramos/d respectivamente, tomando el valor máximo para el estanque 1, donde se mantiene la afirmación anterior.

D. Carga Operacional de la Azolla Seca

El crecimiento en biomasa de *Azolla f.* fue analizado durante 95 días con intervalos de 4 días entre cada medición en verano (primeros 22 días) y 8 días en otoño (últimos 70 días) como promedios.

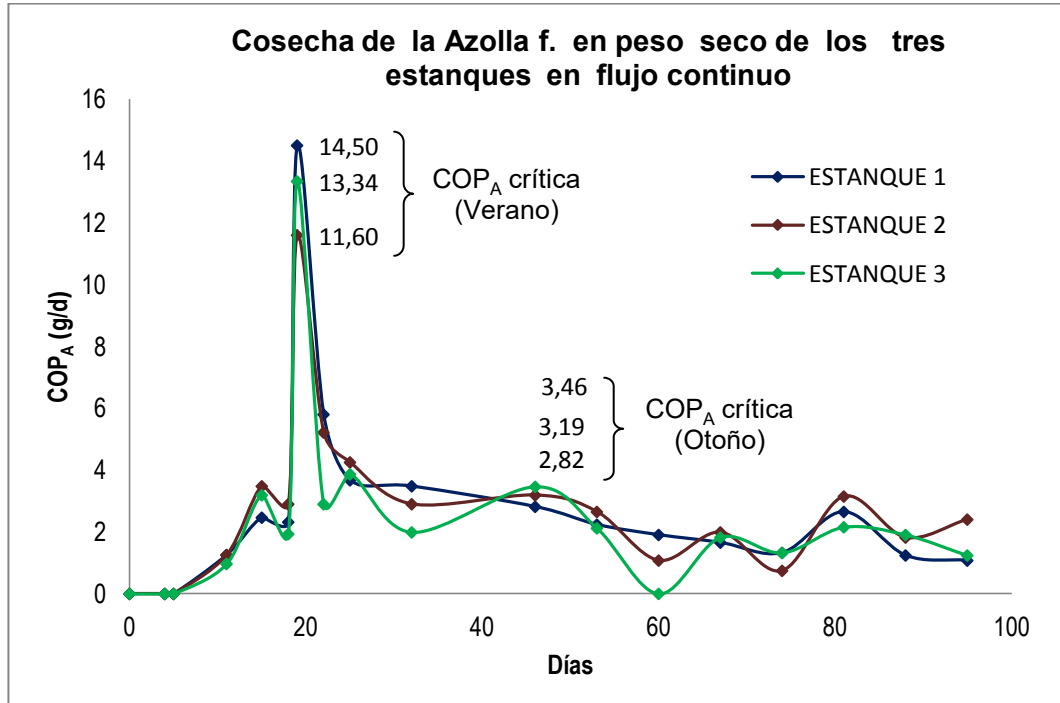


Figura 4. 37: Comportamiento de la Carga Operacional con *Azolla filiculoides* en peso seco (Suderburgo-Año 2009).

Interpretación: La Carga Operacional indica la cantidad apropiada en estado seco de la *Azolla* para la cosecha en los estanques de tratamiento y de esta manera se mantendrán densidades adecuadas.

De igual modo la tasa de cosecha en peso seco (**sin humedad**) presentó comportamientos similares en cada uno de los estanques donde el 5.80% de la *Azolla filiculoides* representa la materia seca.

La Figura 4.37 muestra que en el **estanque 1** la tasa máxima de cosecha fue de 14.50 g/d, es decir el crecimiento se desarrolló eficientemente en este estanque por lo que en los estanques 2 y 3 las tasas fueron de 11.60 y 13.34 g/d respectivamente.

El promedio de la tasa de cosecha en los estanques 1, 2 y 3 a partir del día 11

de su colocación son de 3.20, 3.20 y 2.80 g/d respectivamente, tomando el valor máximo para el estanque 1, donde se mantiene la afirmación anterior.

Habiendo definido COP_A , en flujo continuo señalaremos la producción acumulado de *Azolla f.* hasta el día 95, es decir incluyendo el helecho extraído entre verano y otoño, mostrándose el comportamiento del crecimiento del helecho.

E. Densidad de Peso Húmedo por Superficie

Tabla 4. 5: Resumen del Cálculo de la Densidad de Peso Húmedo por Superficie de la *Azolla F.* en la estación de Verano (Sudburgo-Año 2009).

Verano: Cálculo de la Densidad de Peso Húmedo por Superficie				
Parámetro	Unidad	Reactor I	Reactor II	Reactor II
A=Área	m ²	0.30	0.30	0.30
COP _A Crítica	g/d	250	200	230
D=Densidad de Peso Húmedo	g/m ² /d	827.81	662.25	761.59
D=Densidad de Peso Húmedo	Kg/m²/d	0.83	0.66	0.76
Promedio D	Kg/m ² /d	0.75		

Tabla 4. 6: Resumen del Cálculo de la Densidad de Peso Húmedo por Superficie de la *Azolla F.* en la estación de Otoño (Sudburgo-Año 2009).

Otoño: Cálculo de la Densidad de Peso Húmedo por Superficie				
Parámetro	Unidad	Reactor I	Reactor II	Reactor II
A=Área	m ²	0.30	0.30	0.30
COP _A Crítica	g/d	48.6	55.0	59.7
D=Densidad de Peso Húmedo	g/m ² /d	160.93	182.12	197.68
D=Densidad de Peso Húmedo	Kg/m²/d	0.16	0.18	0.20
Promedio D	Kg/m ² /d	0.18		

Comentario: Las tablas muestran en la primera columna los parámetros; en la segunda columna, las unidades y en las tres últimas los resultados de los reactores cubiertos con *Azolla filiculoides*.

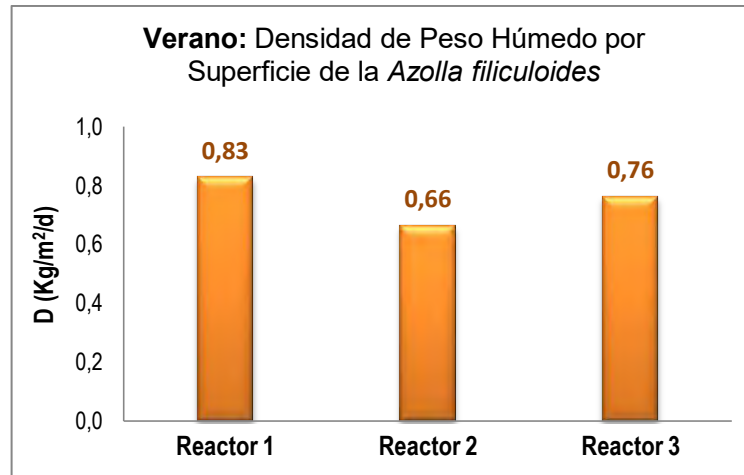


Figura 4. 38: Comportamiento de la tasa de crecimiento en peso húmedo en la época de verano (Sudburgo-Año 2009).

Interpretación: En esta Figura se muestran las densidades de Peso húmedo por superficie en los reactores cubiertos con *Azolla Filiculoides* cultivados en la temporada de **verano**. De acuerdo a la grafica, la cantidad de biomasa por superficie en el 1er Reactor llegó a 0.83 Kg/m²/d mientras que el 2do Reactor mostro una densidad de 0.66 kg/m²/d.

El tiempo promedio de cultivo en **verano** (entre la colocación y cosecha de la *Azolla filiculoides* evitando su sobrepoblación en cada reactor) se determinó en 4 días; obteniendo un promedio de 3 Kg en 1m² entre cada cosecha.

$$\text{Cantidad de helecho cosechada po } m^2 = \text{Densidad en PF } \frac{Kg}{m^2} \times 4 \text{ días} = 3 \frac{kg}{m^2}$$

Nota: PF significa Peso Fresco o con humedad. (D promedio =0.75Kg/m²/d)
Conforme a lo citado anteriormente, en **verano** cada 4 días la *Azolla filiculoides* llega a alcanzar niveles de crecimiento que casi duplican su peso ($B/Ba = 1.79$ como valor promedio) y un área de cobertura llega al 100%, significando la máxima cantidad con la que se pueden realizar las labores de cosecha y depuración de forma adecuada para los tres estanques.

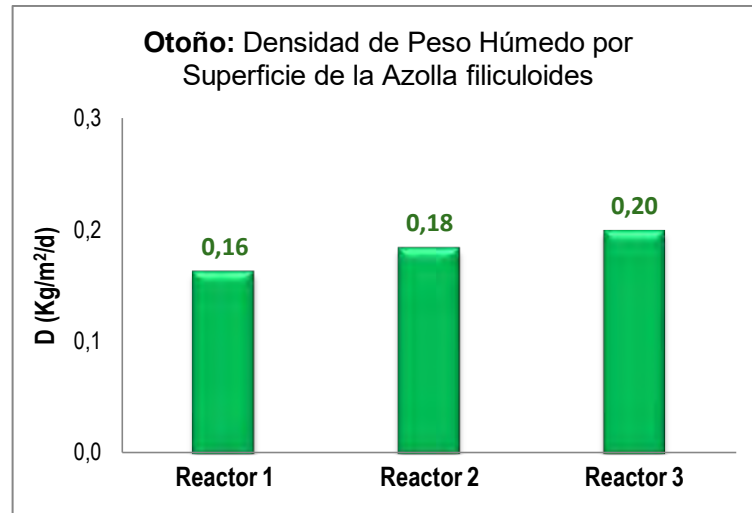


Figura 4. 39: Comportamiento de la tasa de crecimiento en peso húmedo en la época de otoño (Sudburgo-Año 2009).

Interpretación: En esta Figura se muestran las densidades de Peso húmedo por superficie en los reactores cubiertos con *Azolla Filiculoides* cultivados en la temporada de **otoño**. Como se observa en la grafica, el reactor 3 presenta mayor tasa de crecimiento en un 0.20 Kg/m²/d.

El tiempo promedio de cultivo en **otoño** se determinó para 8 días; así obtendríamos un promedio de 1.44 Kg/m².

$$\text{Cantidad de helecho cosechada po m}^2 = \text{Densidad en PF} \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2} \times 8 \text{ días} = 1.44 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Nota: PF significa Peso Fresco o con humedad. (D promedio =0.18 Kg/m²/d).

En **otoño** cada 8 días la especie llega a alcanzar niveles de crecimiento que casi cuadruplican su peso ($B/Ba= 3.84$ como valor promedio) y alcanza una cobertura del 100%, notándose pérdidas de la calidad en el aspecto físico de la planta con una disminución de clorofila en las hojas y bulbos debido a la baja temperatura y a que la competencia por captar luz del sol para la fotosíntesis es más fuerte.

F. Densidad de Peso Seco por Superficie

El método de Cálculo de la tasa de crecimiento en peso seco de la *Azolla Filiculoides* se determino de la siguiente manera:

- Temporada de **verano**:

$$\text{Densidad en PS} = \text{Densidad en PF} \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2} / \text{d} \times 1000 \times 5.80\% = 43.52 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} / \text{d}$$

Donde en verano la Densidad en PF es 0.75Kg/m²/d de la Tabla.

Mediante esta fórmula se determinó la tasa de crecimiento promedio en materia seca fue de 43.52 g/m²/d, lo que significa que diariamente aparece sobre la superficie del agua casi 44 gramos en 1m² extrayendo previamente la humedad.

- Temporada de **otoño**:

$$\text{Densidad en PS} = \text{Densidad en PF} \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2} / \text{d} \times 1000 \times 4.96\% = 8.94 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} / \text{d}$$

Donde en otoño la Densidad en PF es 0.18 Kg/m²/d de la Tabla.

De la misma manera se calculó la tasa de crecimiento promedio en materia seca en 8.94 g/m²/d, lo que significa que diariamente aparece sobre la superficie del agua casi 9 gramos en 1m² después de ser extraído la humedad.

Nota: PF significa Peso Fresco o con humedad.

PS significa Peso Seco.

G. Valores promedios de peso alcanzado por Azolla f.

En **verano**, el aporte en biomasa fresca llegó a un valor promedio de 151.5 g/m²/d y la producción a un valor promedio de 9 veces su peso inicial, promedios considerando de los tres estanques y según las observaciones de campo, la especie presenta buenas condiciones y aun no mostraban competencias ni plantas muertas.

En **otoño**, el aporte en biomasa fresca llegó a un valor promedio de 121.44 g/m²/d y la producción a un valor promedio de 3 veces su peso inicial, promedios evaluado y considerando los tres estanques, sin embargo se complica la labor de cosecha y el manipuleo afectando a la escasa planta, quebrando las rizomas, y los maltratos aceleran el proceso de asentamiento de hojas, rizomas y bulbos.

4.1.6.3. Determinación de la carga Por tandas en Acuarios

A. Producción de Biomasa

La observación del comportamiento del helecho es más notoria, al manipular la planta y conforme se va desarrollando en el medio de cultivo, encontrándose rizomas acumulados y formando flóculos y sedimentos en el fondo del acuario.

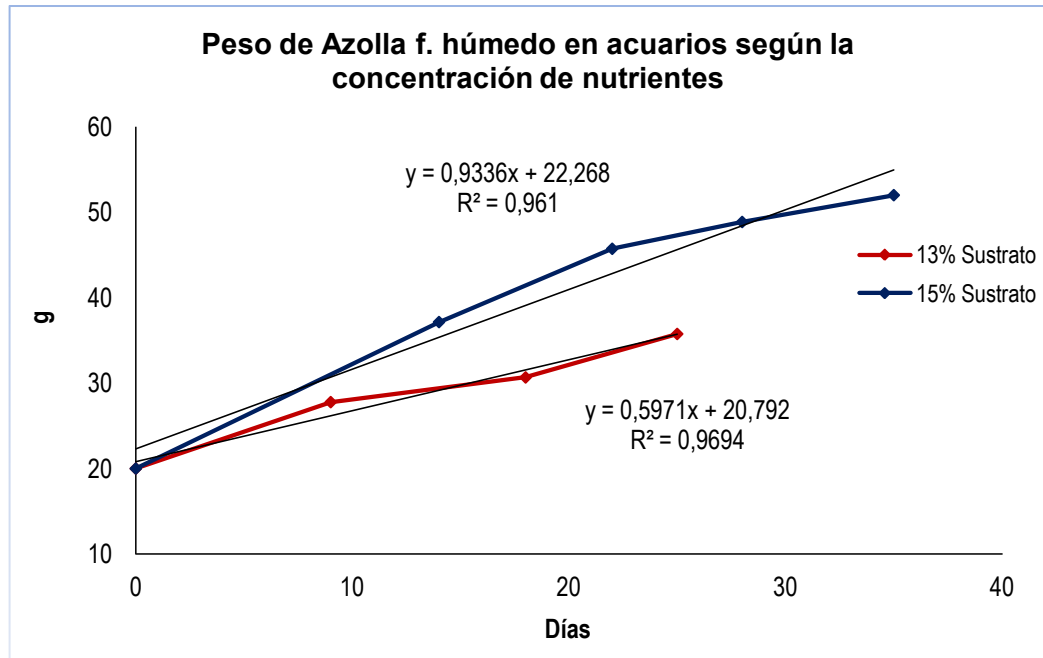


Figura 4. 40: Comportamiento del Peso húmedo en el cultivo de *Azolla filiculoides* (Sudburgo-Año 2009).

Interpretación: Las curvas representan el comportamiento diario de la biomasa en estado fresco que se cultivó en cada acuario, para distintas concentraciones en volumen del 13% y 15% de solución de nutrientes. Mediante estas curvas se obtuvieron las pendientes de las rectas aproximadas, lo cual significaría la cantidad de biomasa seca que se produce cada día.

En la Figura 4.40 se pudo establecer mediante gráficas para los distintos porcentajes de 13% y 15% mostrando siempre tendencias crecientes, donde la gráfica (**Sustrato en 13%**) muestra el peso final en 1.79 veces en 25 días obteniendo la COP_A en 0.60 gr/d y un coeficiente determinación en un 97%.

La gráfica (**Sustrato en 15%**) empieza a tener un comportamiento poco más acelerado que el anterior, llegando a pesar 2.60 veces del peso inicial en 35 días siendo la pendiente de la curva o COP_A en 0.93 g/d, es decir la diferencia

entre estos llega a ser de 0.33 gr/d y un coeficiente de determinación en un 93%, significando un mayor crecimiento a mayor concentración de sustrato.

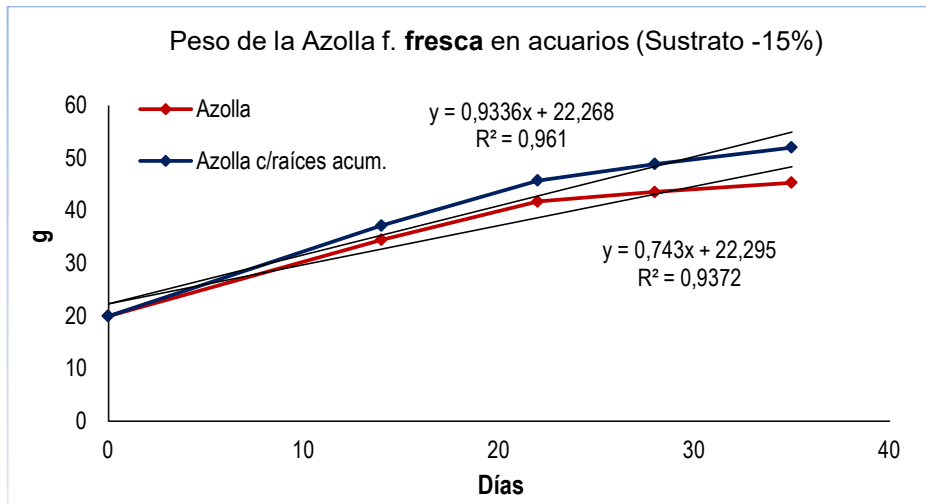


Figura 4. 41: Comportamiento del Peso húmedo cubierto con Azolla filiculoides (Suderburgo-Año 2009).

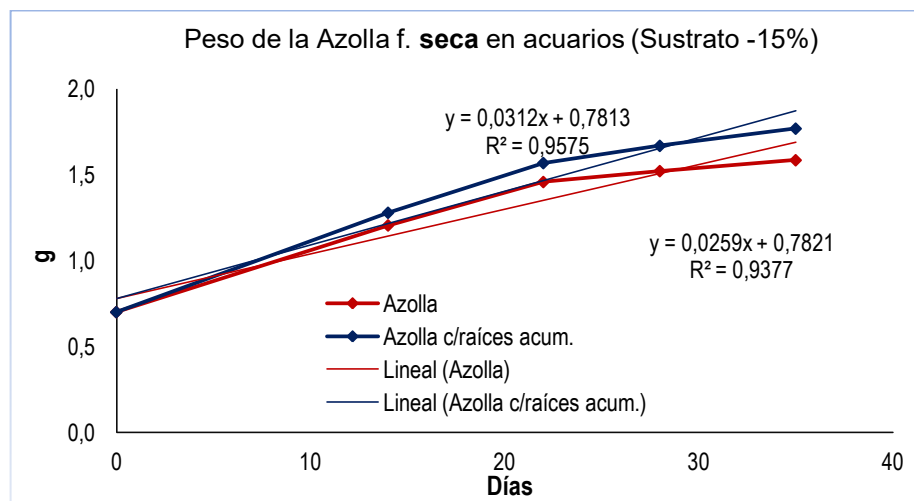


Figura 4. 42: Comportamiento del Peso seco cubierto con Azolla filiculoides (Suderburgo-Año 2009).

Interpretación: En ambas graficas se muestran la cantidad de biomasa que se desarrolla y crece en casa acuario, conteniendo el 15% del volumen total en solución de nutrientes; señalando en cada una dos curvas que representan al helecho y la otra al helecho con las rizomas depositadas al fondo de cada acuario. La primera grafica señala la biomasa fresca existente con respecto al tiempo.

Comparando la Figura 4.41 y 4.42, se puede descifrar porcentajes estimados de **materia seca** de la **planta** *Azolla filiculoides* y de las **rizomas precipitados** alcanzando valores de 3.50% y 2.74% del peso con agua respectivamente. Un complemento a esta información fueron la obtención del porcentaje en **materia orgánica** de la planta en 83% y de las rizomas sedimentadas en 73% del peso seco de la *Azolla filiculoides*.

Además en la Figura 4.41 se pudo establecer el porcentaje de producción que representa únicamente los rizomas sedimentadas en 20%, mediante las tasas de crecimiento de la planta y de la misma pero con los rizomas sedimentados.

Se muestra en ambas graficas, el peso final alcanzando en 2.27 veces del peso inicial de la planta *Azolla filiculoides* **fresca** en 35 días, con un COP_A de 0.74 g/d como se muestra en la Figura 4.41. Al analizar la Figura 4.42, el incremento en peso seco de la planta aumenta a una tasa de 0.026 g/d.

D. Densidad de Remoción diaria de Fosforo Total

En un último análisis de la Planta *Azolla filiculoides* al término de este experimento, se estudio la concentración de **fósforo** presente en el helecho seco (105°C) con el fin de evaluar la capacidad de absorción real.

Tabla 4. 7: Cálculos y resultados de la cantidad de Fósforo presente en la *Azolla filiculoides* (Sudburgo-Año 2009).

Absorción de Fósforo en la Planta acuática <i>Azolla filiculoides</i> en acuarios		
Cálculos y Resultados	Unidad	Promedio
Paso 1: Planta al inicio del experimento		
(A) <i>Azolla f.</i> inicial seca (3.5% de <i>Azolla fresca</i>)	g/acuario	0.70
(Fa) Planta <i>Azolla f.</i> inicial	mgP/Kg seco	925
(FT) Fosforo Total = (A x Fa)	mgP/acuario	0.65
Paso 2: Planta al final del experimento		
(A') <i>Azolla f.</i> final seca (3.5% de <i>Azolla fresca</i>)	g/acuario	1.59
(Fa') Plant <i>Azolla f.</i> final	mgP/Kg seco	2784
(FT') Fosforo Total = (A' x Fa')	mgP/acuario	4.43
Paso 3: Evaluación de la Absorción por la <i>Azolla f.</i>		
(ΔFT) Absorción por <i>Azolla f.</i> (FT'-FT)	mgP/acuario	3.78
Paso 4: Evaluación de la Capacidad de remoción por la <i>Azolla f.</i>		
(Aa) Área del acuario	dm ² /acuario	7.61
(CR_A) Capacidad de remoción = (ΔFT / Aa)	mgP/m ²	49.63
Paso 5: Evaluación de la Densidad de remoción diaria por la <i>Azolla f.</i>		
(T) Tiempo de cultivo	días	35
(D_A) Densidad de remoción diaria = (CR _A / T)	mgP /m ² /d	1.42

Comentario: La tabla muestra un resumen del cálculo de la absorción de fosforo del helecho mediante un estudio en su composición.

En la Tabla 4.7 se muestra la diferencia entre la cantidad de fósforo en la planta acuática antes de su colocación fue de 0.65 mg-P/acuario, siendo luego de los 35 días una cantidad de fósforo de 4.43 mg-P/acuario, significando que la relación en el contenido de fosforo inicial y final en la macrofitas fue de 1:10.

Tal como se indica en la Tabla 4.7, la capacidad de remoción de fósforo fue de 1.42 mg-P/d/m² indicando un minúsculo porcentaje de absorción.

E. Depósito Acumulado de Fósforo Total en un Acuario

Tabla 4. 8: Cálculos y resultados de la cantidad de fósforo presente en el fondo en los acuarios (Suderburgo-Año 2009).

Depósito acumulado de fósforo en los acuarios		
(Fra) Rizomas	mgP/Kg seco	997
(Ffs) Flóculos sedimentables	mgP/Kg seco	993
Paso 1: Evaluación de la capacidad de absorción de fósforo por los depósitos de rizomas		
(RA) Rizomas (2.74 % de rizomas fresca)	g/acuario	0.18
(FT'') Fósforo Total = (RA x Fra)	mgP/acuario	0.18
Paso 2: Evaluación de la capacidad de absorción de fósforo por los depósitos de flóculos		
(FS) Flóculos	g/acuario	0.43
(FT''') Fosforo Total = (FS x Ffs)	mgP/acuario	0.43
Paso 3: Capacidad de absorción de fósforo por rizomas y flóculos		
(FT) Fosforo Total = (FT'' + FT''')	mgP/acuario	0.61
Paso 4: Cantidad de Fósforo no removida por la Azolla f.		
(Aa) Área del acuario	dm ² /acuario	7.61
(CR) Capacidad de remoción = (FT / Aa)	mgP/m ²	8.02
Paso 5: Densidad de Fósforo no removida por la Azolla f.		
(T) Tiempo de cultivo	días	35
(D) Densidad de remoción diaria = (CR / T)	mgP /m ² /d	0.23

Comentario: En la Tabla 4.8 muestra la cantidad de fósforo depositado al fondo de cada acuario, de las cuales 0.18 mg-P/acuario se presentan en los rizomas asentadas y 0.43 mg-P/acuario en los flóculos sedimentables, siendo un total de 0.61mgP/acuario, y perteneciendo el 14% de lo que la planta *Azolla* remueve como se señalará en la Tabla 4.9.

F. Capacidad de Remoción de Fósforo

Tabla 4. 9: Cálculos y resultados del Porcentaje de la cantidad de fósforo (Suderburgo-Año 2009).

Cálculo del Porcentaje de Remoción de Fósforo Total		
(D _A) Capacidad de remoción por la Azolla	mgP /m ² /d	1.42
(D) Capacidad de remoción mediante otros procesos físicos	mgP /m ² /d	0.23
Paso 1: (DT) Densidad de remoción Total= (D+D_A)	mgP /m ² /d	1.65
Paso 2: (%D_A) Porcentaje de remoción por la Azolla	%	86.06
Paso 3: (%D) Porcentaje de remoción por otros procesos físicos	%	13.94

Comentario: Como se muestra en la Tabla 4.9, La remoción Total se divide en remoción netamente por el helecho y por otros factores físicos como la sedimentación. La remoción por parte de *Azolla filiculoides* es de un 86%, mientras que la remoción mediante otros factores es de 14%. Es decir la remoción de fósforo en tratamiento de aguas residuales utilizando helechos no dependerá sólo de plantas acuáticas.

4.1.7. Estudio de la Capacidad de Remoción

La capacidad de remoción de esta especie se puede analizar en base de gráficas comparativas.

4.1.7.1. Análisis en el Sistema Por Tandas

A. Parámetro Temperatura Y Ph

En verano el comportamiento de la temperatura en cada estanque fluctúa de 20 a 25°C. La *Azolla filiculoides* se encuentra entre un rango óptimo de temperatura para su reproducción.

La *Azolla filiculoides* siempre se mantuvo en un medio con un pH (7) casi constante, por lo que no tuvo dificultad en su adaptación.

4.1.7.2. Análisis en el Sistema Flujo Continuo

A. Parámetro Temperatura

El comportamiento de la temperatura en cada estanque. Durante este estudio con plantas se pudo observar un comportamiento casi similar por estanque, generalmente entre el ingreso al primer estanque y el efluente. Los valores de este parámetro concuerdan favorablemente para el tratamiento de aguas residuales con estas plantas acuáticas. La temperatura presentó ligeras variaciones que fluctúan de 20.0°C a 20.4°C para *A.filiculoides*.

Según la Tabla 3.2 y estudios realizado por Valderrama (2005); los valores de temperatura en este tipo de sistemas pueden variar a diferentes horas del día según la cantidad de heliofanía que reciban los sistemas.

B. Parámetro Ph

El comportamiento del parámetro pH, se visualiza en la Figura 4.16 (pág. 101). El tratamiento con *A. filiculoides* aumenta ligeramente de 7.39 a 7.47. Según Fernández (2006) al encontrarse *Azolla filiculoides* asociado con *Anabaena azollae*, eleva sus niveles de pH en las aguas, pues las altas concentraciones de N, en forma de nitritos o nitratos hacen que se produzcan reacciones químicas en el agua que permitan elevar el contenido de pH, volviendo a las aguas residuales más alcalinas en presencia de esta especie.

C. Parámetro Conductividad

Las aguas residuales generalmente tienen tendencia a presentar niveles altos de iones como aquellos provenientes del cloruro de sodio (NaCl) sal común, muy utilizada en la alimentación y que según algunos estudios realizados pasan inalterados por el tracto digestivo, elevando el nivel de iones en las aguas residuales.

La incidencia de cada especie sobre el parámetro conductividad, uno de los más importantes a nivel de las fuentes de agua natural que se emplean para riego, y que se expresa por la presencia de iones en el agua.

D. Parámetro N-Amoniacal

La remoción de nitrógeno amoniacal alcanzada por cada una de las especies, donde el comportamiento es muy variable. Así *A. Filiculoides* no presenta remoción debido al corto valor de TRH. Sin embargo en otros estudios la remoción varía desde 21% a un 100%.

E. Parámetro Fósforo Total y Ortofosfatos

La remoción del fósforo total no se observa para la *Azolla f.* debido al corto tiempo de retención.

Este estudio coincide con Monette (2006), siendo la máxima absorción óptima de fósforo en un 1.69%. Sin embargo según Rodríguez (1989), la máxima absorción

por la *Azolla* fue de un 60% para el mismo tiempo de retención que se trabajó en este experimento.

La remoción del ortofosfato no se observa para la *Azola filiculoides* debido al corto tiempo de retención.

4.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS UTILIZANDO LENTEJA DE AGUA Y JACINTO DE AGUA

Este capítulo pone en consideración la calidad de aguas, los resultados del diagnóstico de los sistemas, diagnóstico que engloba la determinación de tratadas, caudales y tiempo de retención hidráulica para cada uno de los sistemas.

Se analizó el comportamiento de la *Lemna minor* y la *Eichhornia crassipes* en la ciudad de **Lima-Perú**, para los sistema por tandas y de flujo continuo, empleándose mayor duración en éste último sistema para su análisis.

4.2.1. Calidad de las Aguas Tratadas

CITRAR (Ex UNITRAR) ubicado en Lima, es una planta piloto de tratamiento de aguas residuales de la Universidad Nacional de Ingeniería, fue construida entre los años 1994 y 1995, y entró en funcionamiento en Enero de 1996; con el propósito de propiciar la investigación científica y que actualmente se reutiliza los efluentes para el uso de riego.

Actualmente el objetivo de la Planta de Tratamiento de CITRAR en Lima, es mejorar tecnologías y técnicas para hallar alternativas de solución de bajo costo a la problemática de la disposición y uso inadecuado de las aguas residuales domésticas en el Perú. Por ello se comparó con los límites permisibles establecidos en la Norma de Saneamiento del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.

4.2.2. Diagnóstico de los Sistemas por Tandas

4.2.2.1. Diseño y Ejecución del Sistema por Tandas

El estanque con *Lemna Minor*, tuvo la forma de un sector de cilindro en posición horizontal y material metálico, distinto a los otros estanques de vidrio y de forma de un prisma rectangular. Siendo de un material metálico este absorbe mucho más calor que los acuarios de vidrio, aumentando así la temperatura del medio acuático.

4.2.2.2. Funcionamiento del Sistema Por Tandas

El diagnóstico se basó en la caracterización del agua tratada en un punto de la Planta de Tratamiento de **CITRAR**; efluente de la laguna terciaria, empleándose *Lemna minor* y *Eichhornia crassipes* como tratamiento biológico.

En la puesta en marcha del **sistema “Por Tandas”** en CITRAR se emplearon tres reactores cubiertos con *Lemna minor* y *Eichhornia crassipes*, y un reactor sin planta acuática a la que se le llamó Control. Este sistema mostrará: El rendimiento en la remoción de turbiedad, los distintos comportamientos del pH, Temperatura, Oxígeno Disuelto y además el rendimiento máximo en la cosecha de cada planta acuática por 13 días de cultivo, valor tomado como tiempo de retención.

Se resolvió muestrear en el centro del área superficial de cada reactor, con el fin de tener un valor más cercano al promedio, al ser medido en distintos puntos de este.

Tabla 4. 10: Diagnóstico de la calidad de las aguas tratadas con *Lemna Minor* en el Sistema de Flujo Continuo en CITRAR (Año 2010).

Sistema Por Tandas									
Reactor:	Sin planta			L.Minor			E.Crassipes		
Parámetros	Inicio	Final	Efecto	Inicio	Final	Efecto	Inicio	Final	Efecto
pH	10.4	9.3	9.8*	10.4	9.8	10.1*	10.42	6.86	8.6*
Turbiedad, NTU	404.0	192.0	52%**	407.0	112.0	72%**	410	144	65%**
Temperatura, °C	31.2	32.1	31.7*	31.6	34.8	33.2*	32	28.2	30.1*
OD, mg/l	11.58	15.61	35%**	14.4	17.92	24%**	17.6	4.75	73%**

NOTA: * significa valor promedio.

** significa porcentaje de remoción.

Comentario: La Tabla 4.10 muestra los resultados del análisis de agua al inicio y final de cada reactor, como también el promedio y/o porcentaje de depuración obtenido entre estos.

Como parámetros físico-químicos, el porcentaje en la capacidad de remoción de la turbiedad es de: un 52% en el **Control**, en el reactor **con Lenteja de Agua** de un 72%, y en el reactor **con Jacinto de Agua** en un 65%. Con respecto al parámetro de Oxígeno Disuelto, solo hubo presencia de remoción en un 73% en

el reactor cubierto **con Jacinto de Agua**, mientras que para el Control y Lenteja de Agua existió un incremento de 35% y 24% respectivamente.

4.2.3. Diagnóstico de los Sistemas Continuo

El diagnóstico del sistema se basó en el análisis de varios factores, el sistema de tratamiento de agua residuales de CITRAR; evaluación de los sistemas del proyecto, caudal y TRH (tiempo de retención hidráulica), con el fin, de obtener un panorama sobre las condiciones del sistema antes de la aplicación de estos experimentos.

4.2.3.1. Diseño y Ejecución del Sistema Continuo

Los dos reactores cubiertos con Lemna o Jacinto, tuvieron la forma rectangular con una relación de largo sobre ancho a 2.7, con lo cual se logra que el flujo se aproxime a un tipo pistón con un mayor recorrido de las partículas del agua a lo largo de cada reactor.

Para el diseño de este sistema, se tuvo otra posibilidad, esta fue de metal, pero no se optó, debido a que la temperatura se incrementaría con mayor rapidez en un pequeño volumen de agua, además porque este se oxidaría y así eliminaría el Oxígeno presente en el medio acuático. El paso de la luz se evitó cubriendo de plástico alrededor de cada acuario para así eliminar el paso de luz en este disminuyendo el aumento en la actividad fotosintética en la profundidad para un tratamiento adecuado.

4.2.3.2. Puesta en marcha del Sistema Continuo con Lemna y Jacinto

En la puesta en marcha del sistema de "Flujo Continuo" en CITRAR se emplearon *Lemna minor* y *Eichhornia crassipes* como tratamiento biológico para la depuración de las aguas residuales para predecir el rendimiento máximo en la cosecha de cada planta acuática.

Además fue importante la nivelación del sistema ya que esto influía directamente en el caudal de entrada y salida en el Sistema Continuo con ambas plantas acuáticas; y también la cantidad de agua a rebosar. Al iniciar el funcionamiento del sistema, el Efluente de la Laguna Terciaria de CITRAR tuvo que ser transportado mediante una manguera corta por sifón hasta la entrada de un

pequeño acuario con arena previamente lavada; para que sea más representativo el volumen de agua a tratar.

4.2.3.3. Desarrollo del Tratamiento mediante *Lemna* y *Jacinto*

Hubo influencia en el caudal de diseño por efectos del viento, la llovizna en la madrugada y los problemas de Evapotranspiración durante el tiempo de funcionamiento del Sistema Continuo, por lo que sus mediciones estaban fuera del alcance.

Se producía la obstrucción de los orificios de las tuberías de distribución por los elementos propios del Efluente de la Laguna Terciaria como gupis muertos, algas y otros; lo que hacía necesario incluir un acuario pequeño que actúe como filtro y una limpieza regular de los orificios de las tuberías en particular a la salida de cada reactor y en la manguera de salida del pequeño acuario con arena previamente lavada.

4.2.3.4. Parámetros en el Sistema de Flujo Continuo

Se monitorearan en varios puntos del sistema (de acuerdo a la metodología), con el fin de tener un panorama del comportamiento de remoción a lo largo de todo el sistema de flujo continuo. Se compararon los datos del efluente del sistema con los límites permisibles de descarga de la norma ambiental Peruana.

Las siguientes tablas muestran de forma didáctica, los resultados de los Análisis fisicoquímicos y Microbiológicos en el Sistema de Flujo Continuo con *Lemna* Minor y *Jacinto* de Agua. Las columnas que la componen son, parámetros con sus respectivas unidades, valores de concentraciones del Afluente (ingreso de agua residual al sistema continuo), concentraciones del 1er Efluente o a la mitad del sistema (salida de agua residual tratada en el primer reactor), concentraciones del 2do Efluente o Efluente de todo el sistema continuo (salida de agua residual ya tratada del segundo reactor), los valores o promedios porcentuales de remoción que es la división de los valores del Efluente sobre el Afluente, y la última columna señala los valores de las normas ambientales de nuestro país.

Estas Tablas solo muestran los resultados de los desarrollados en el laboratorio.

Estos resultados serán analizados posteriormente, donde cada parámetro tendrá su gráfico. Los resultados de PH, Temperatura, Turbiedad, Oxígeno Disuelto y Conductividad serán analizados en cuadros y gráficos, ya que se tiene mayor información de estas.

Tabla 4. 11: Resumen de resultados de parámetros de los Análisis Físicoquímicos y microbiológicos con *Lemna Minor* en el Sistema de Flujo Continuo en CITRAR (Año 2010).

Parámetros	Sistema de Flujo Continuo con <i>L. Minor</i>			% Remoción (Entre: Afluyente y 2do Efluyente)	Normas: Clase III
	Afluyente	1er Efluyente	2do Efluyente		
pH	8.7	8.6	8.4	8.6*	6.5-8.5
Turbiedad, NTU	394.9	305.3	268.2	32%	
Temperatura, °C	26.6	25.8	25.4	25.9*	<35
OD, mg/l	4.2	4.8	5.5	-	3
DBO, mg/L	64.78	45.89	2.15	96.68%	15
Conductividad, µs	567.6	577.8	582.7	-	n/d
Nutrientes, mg/l					
P	4.3	2.14	2.11	51%	n/d
PO ₄	12.99	6.55	6.51	50%	n/d
P ₂ O ₅	9.71	4.89	4.86	50%	n/d
NH ₃	5	1.67	0	100%	n/d
NH ₃ -N	4.17	1.5	0	100%	n/d

NOTA: n/d significa valor no disponible.

* significa valor promedio.

Comentario: Como se indica en la Tabla 4.11, de los 10 parámetros establecidos sólo para cada toma de muestra, solo dos parámetros son tomadas en consideración y además cumplen con la norma técnica Peruana. Como parámetros físico-químicos, el porcentaje de la capacidad de remoción de nutrientes oscila entre los 50% a 100,0%.

Contrariamente a las características de depuración con *Lemna Minor* en el parámetro microbiológico, Demanda Bioquímica de Oxígeno, **DBO₅**. Este parámetro disminuyó en el transcurso del proceso de tratamiento tal como se aprecia en la tabla 4.10 con una remoción del 96.7%. Se comprueba que la eficiencia de la especie es afectada por los periodos de cosecha; ocasionando a la vez incremento de sedimentos y elevación de la concentración de otros parámetros por los procesos de descomposición que se dan en el agua.

Tabla 4. 12: Diagnóstico de la calidad de las aguas tratadas con *Eichhornia crassipes* en el Sistema de Flujo Continuo en CITRAR (Año 2010).

Parámetros	Sistema de Flujo Continuo con E.Crassipes			% Remoción (Entre: Afluente y 2do Efluente)	Normas: Clase III
	Afluente	1er Efluente	2do Efluente		
pH	8.1	7.7	7.6	7.8*	6.5-8.5
Turbiedad, NTU	260	195.4	230	12%	
Temperatura, °C	20.3	20.4	20	20.2*	<35
OD, mg/l	4.2	5.8	4.6	-	3
DBO, mg/L	21.95	16.08	-	26.74%	15
Conductividad	583.3	495.4	484.2	-	n/d
Nutrientes, mg/l					
P	4.4	2.66	2.12	52%	n/d
PO ₄	13.46	8.15	6.46	52%	n/d
P ₂ O ₅	10.08	6.09	4.82	52%	n/d
NH ₃	8.33	1.33	1.17	86%	n/d
NH ₃ -N	7	1	1	86%	n/d

NOTA: n/d significa valor no disponible.

* significa valor promedio.

Comentario: La Tabla muestra los resultados del análisis de agua del ingreso al sistema (**Afluente**), salida del reactor N°1 (**1er Efluente**), y el efluente del sistema (**2do Efluente**). Este último punto es comparado con las normas ambientales.

Como se indica en la Tabla 4.12, de los 10 parámetros establecidos sólo para cada toma de muestra, solo dos parámetros son tomadas en consideración y además cumplen con la norma técnica Peruana. El porcentaje de remoción de nutrientes como parámetros fisicoquímicos oscila entre los 52% al 86%.

Como se aprecia en la tabla, el parámetro microbiológico, **DBO₅** disminuyó en el transcurso del proceso de tratamiento con *Eichhornia crassipes*, entre el Afluente y el 1er Efluente con un remoción de la DBO en 26.7%.

Se comprueba que la eficiencia de la especie es afectada por los periodos de cosecha; ocasionando a la vez incremento de sedimentos y elevación de la concentración de otros parámetros por los procesos de descomposición que se dan en el agua.

4.2.4. Estudio Fisiológico de las Especies Aplicadas

Se consideró analizar las características fisiológicas de las especies *Lemna minor* y *Eichhornia crassipes*, por ser especies que no han sido probadas como tratamiento secundario y terciarios en la purificación de aguas residuales domésticas.

La aplicación de los tratamientos con *Lemna minor* y *Eichhornia crassipes* se realizaron en CITRAR debido a las oportunidades que se tuvieron en la investigación, facilidad de instalación y la cercanía de las vías de acceso. A continuación se detalla los resultados y el respectivo análisis.

4.2.4.1. Sistema por Tandas: Análisis fisiológico de *Lemna Minor* y *Eichhornia Crassipes*

En esta temporada de **verano**, el aumento de *Eichhornia Crassipes* y *Lemna Minor* se puede apreciar en la Figura 4.43, cosechándose a los 13 días hasta ocupar totalmente la lamina de agua de cada estanque por ser el objetivo, es decir que en los estanques cubiertos con plantas acuáticas se observó remociones de nutrientes para este sistema “**Por Tandas**”.

Al inicio de este experimento se instalaron el 20% y 5% del área total para el Jacinto y la Lemna respectivamente, por tenerse en cuenta que el Jacinto de Agua crece superficialmente más lento que la Lenteja de Agua.

Sin embargo como se puede apreciar en la siguiente figura el Jacinto tuvo que haber ocupado un porcentaje menor inicialmente ya que la Lemna crecía con más celeridad, tal es así que el estanque con esta última planta acuática se transformaba en un medio con actividad eutrófica.

Según la Figura 4.43; el estanque Control, sin planta acuática, al 5to día muestra que hubo sobrepoblación de algas por la aparición de algas muertas flotando que seguidamente sedimentaran.



Figura 4. 43: Comportamiento de los sistemas por tandas ubicadas en CITRAR, sin planta acuática, con *L. Minor* y con *E. Crassipes* (Año 2010)

Comentario: En la Figura 4.43 se muestra el comportamiento de ambas plantas acuáticas en el sistema por Tandas por un periodo de 13 días.

4.2.4.2. Sistema de Flujo Continuo: Análisis fisiológico de *Lemna minor*

Esta es una de las especies más investigadas a nivel mundial y también en nuestro medio se ha catalogado como la base del tratamiento de las aguas residuales domésticas.

Según Caicedo (2003) son plantas que crecen en un alto rango de condiciones ambientales, que soportan grandes cambios de temperatura y altas concentraciones de nutrientes y además son resistentes a pestes y sequías extremas. Toma los nutrientes por la fronda y la raíz lo que la convierte en una planta muy eficiente. Se la ha catalogado también como especie que soporta variaciones fuertes en de temperatura y pH; su contenido es muy alto en proteínas con un 86 al 97%.

La temperatura es indispensable en el desarrollo de esta planta y en la mayoría de especies acuáticas pues de este parámetro dependen una serie de procesos que ayudan en su desarrollo, como fotosíntesis, asimilación de nutrientes, respiración, y otros procesos físicos, como permeabilidad, difusión de elementos. Según Docauer citado Pedraza (2005), el rango de temperatura para *Lemna minor* varía entre 25 a 31°C y los límites mínimos de temperatura varían entre 8 y 20°C, dependiendo de la procedencia de la especie.

Según Coral (2002) *L. minor* es una especie sumamente diferente a la especie antes mencionada como se observa en la Fotografía 6.4, poseen una sola raíz por hoja la cual alcanza tamaños entre 2 y 7.8 cm; y sus hojas alcanzan diámetros de 6 a 8 mm.

De igual manera se observa en la Fig. 4.44. en la temporada de **verano** para el **sistema continuo** el comportamiento de *Lemna Minor* de un color verde vivo oscuro en el estanque 1 y un color verde amarillento en el estanque 2 cosechándose interdiariamente, es decir que en todos los estanques ocurren remoción.



Figura 4. 44: Comportamiento de Lemna Minor en sistema de flujo continuo ubicada en CITRAR (Año 2010)

Comentario: En el caso de la Lemna Minor, se observa un crecimiento excesivo hasta causar un problema de eutrofización creciendo más plantas por encima de

las plantas primarias (que se desarrollaron al inicio) por lo que se consideró un 150% del área de cultivo.

Además se muestra en la Figura 4.44 se muestra el comportamiento a lo largo del desarrollo en el cultivo de *Lemna Minor* notando un aspecto favorable en ambos estanques sin embargo en el primer estanque se muestra un colorido mas verdoso o vitalicio, esto es debido tiene el primer contacto con el medio, y en este caso nutrientes.

A. Requerimientos nutricionales

Es considerada una planta que no solo crece en agua dulce sino también en agua salada, pero no crece en aguas con bajos contenidos de nutrientes. El pH en el agua subordina la disponibilidad de la mayoría de nutrientes para esta planta como el fósforo. Según Caicedo (1995) el nitrógeno amoniacal es un nutriente preferido por la lenteja de agua sin embargo el nitrógeno, en altas concentraciones en forma de nitrito (NO_3) es muy tóxico para esta planta de la misma manera el ácido sulfhídrico puede llegar a inhibir el crecimiento en altas concentraciones.

Según Caicedo (2005) el pH puede variar entre 3 a 10, presentándose los mejores resultados de desarrollo en pH de 7; para esta investigación el pH se mantuvo entre 7.54 y 10.40 que en este caso presenta un ligero inconveniente.

Se han observado en otros estudios las mejores tasas de desarrollo cuando el ion amonio y nitrato son la fuente principal de nitrógeno, en cierta manera este estudio pudo corroborar también un alto grado de concentración entre estos dos iones, y quizá es una de las razones por las cuales *Lemna minor* presenta una tasa alta de crecimiento. Según Coral (2002) la capacidad de crecimiento permitió que su peso se duplicara en dos días y por esta razón sugiere que las cosechas en esta especie sean realizadas cada **ocho días**.

Donde además la absorción de amonio permite a *Lemna* tener datos altos de rendimiento de biomasa y la concentración de **nitrógeno** en las plantas acuáticas varía entre 0.6 a un 43% que representa su peso seco.

Existe evidencia experimental considerable que demuestra que las plantas acuáticas tienen una vasta preferencia por el amonio en vez de los nitratos como fuente de nitrógeno; además si existen altas cantidades de nitritos en el agua, quizá el proceso de denitrificación provoca que se generen estos compuestos en altas cantidades.

Los altos requerimientos de nutrientes en *Lemna minor* han permitido que sea tolerante a altas concentraciones de sales; según Meraux citado por Ly (1978) la salinidad puede ir de 360 a 1250 $\mu\text{s/cm}$; llegando hasta los 4000 $\mu\text{s/cm}$. Razón por la que se ha recomendado a *Lemna sp* para tratar efluentes de aguas residuales, disminuyendo significativamente las altas concentraciones de sal, hasta los límites permisibles, que según la norma técnica del Perú es de 400 $\mu\text{s/cm}$ óptimo; 2000 $\mu\text{s/cm}$ moderado para riego en el presente estudio se ha mantenido entre 600 y 800 $\mu\text{s/cm}$.

Todas las plantas dependiendo de la especie y de su estructura fisiológica pueden captar nitrógeno en diferentes cantidades, pudiendo utilizar tanto amonio (NH_4^+), nitritos (NO_2^-) o nitratos (NO_3^-) como fuente de nitrógeno, debido a que sus estructuras especialmente se conforman de proteínas, las cuales son largas cadenas de aminoácidos en cuya estructura es esencial el nitrógeno.

B. Análisis del comportamiento de Lemna Minor en época de verano.

Durante el estudio de *Lemna minor* para la cual se registran menos investigaciones en nuestro país. Se ha tomado en cuenta analizar en la época de verano; este análisis ayudó a entender y a manejar de forma adecuada a la especie y planificando sus posibles usos.

Los meses considerados para el estudio fueron entre febrero (inicio de verano) y junio (fin de verano). A continuación se evalúan los parámetros considerados de mayor importancia en el tratamiento de las aguas residuales domésticas.

4.2.4.3. Sistema de Flujo Continuo: Análisis fisiológico de *Eichhornia Crassipes*

Valderrama (2005) considera a *Eichhornia crassipes* una especie promisoría en los procesos de desinfección de las aguas residuales debido a la alta eficiencia en niveles de remoción. A continuación el estudio fisiológico.

La Figura 4.45 muestra el comportamiento fisiológico que la especie *Eichhornia crassipes* aplicada como monocultivo en el sistema continuo, ha demostrado durante el mes de mayo y junio.

Según la Figura 4.45, el desarrollo de *Eichhornia crassipes* aplicado como monocultivo en el sistema de flujo continuo, donde se pudo determinar que el crecimiento de las raíces alcanzan tamaños promedios que van entre 5 cm y 10 cm. En el primer estanque (1) su media de crecimiento osciló entre 7 cm y 10 cm y en el último estanque (2) las raíces alcanzaron tamaños entre 5 cm y 6 cm; sin descartar raíces que llegan a medir hasta 15 cm en el sistema por Tandas.

El **ancho** de la planta (hoja) varía entre 36 cm y 42 cm siendo menor en el estanque 1, se ha logrado medir las plantas con mayor cobertura en los estanques de ambos sistema de tratamiento. La especie en **altura** varía entre 28 cm y 33 cm tomando en cuenta desde la raíz, se ha observado que el crecimiento de la raíz en relación a la planta es un 75% menos, lo que significa que el sistema radicular es relativamente el 25% del tamaño de la planta.

Analizando las causas de cada dato obtenido, el incremento en ancho de la planta está marcado por la cantidad de bulbos con una variación entre 3.5 y 12 bulbos por planta; en el estanques 1 presenta plantas con 4 y 7 bulbos, mientras el estanque 2 presentan plantas con 5 y 12 bulbos, cada bulbo posee un número de hijuelos que van desde 3 hasta 10 individuos.

Los bulbos se van separando de la planta madre a través de rizomas que miden generalmente 21 cm de longitud.

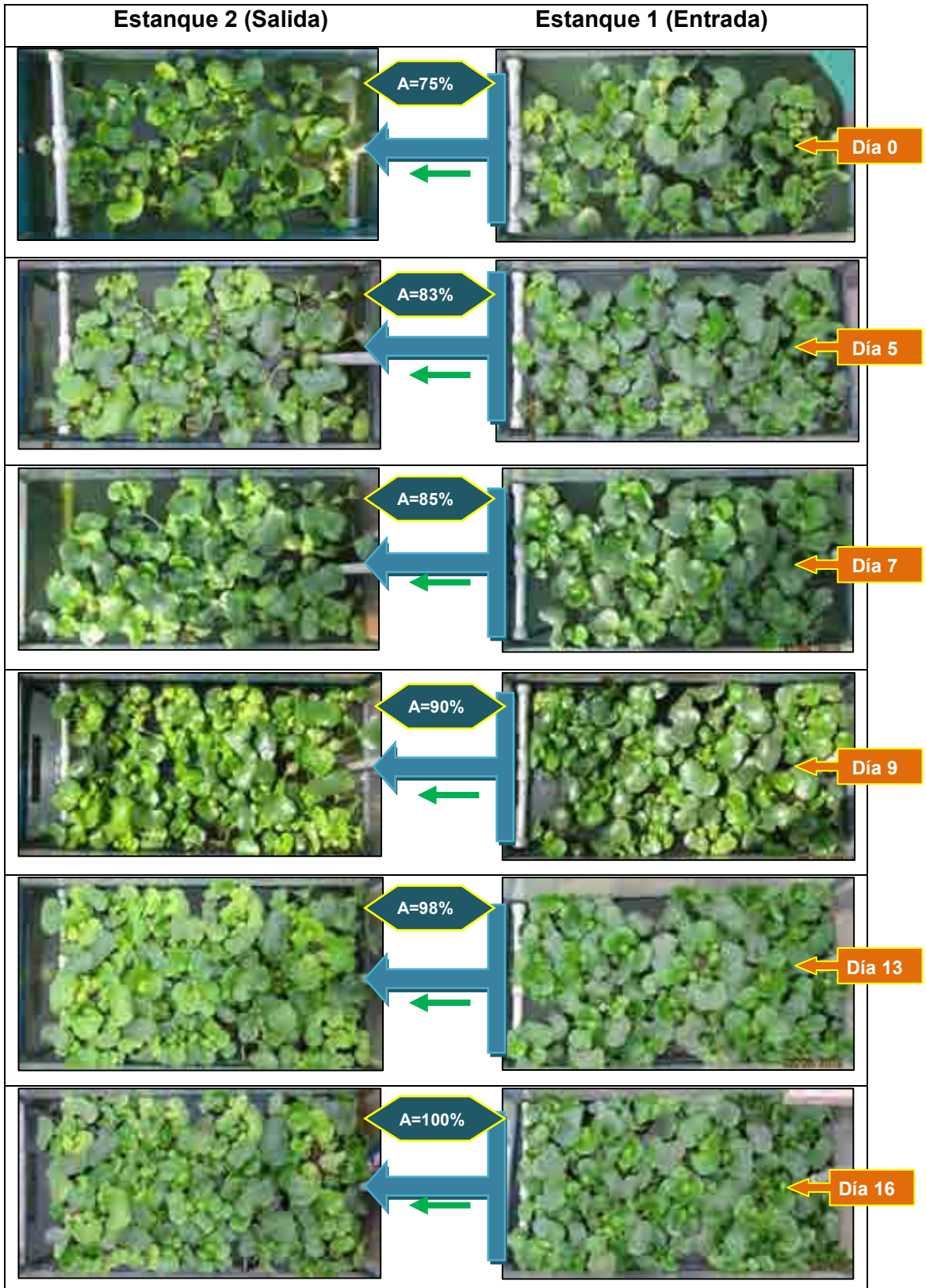


Figura 4. 45: Comportamiento de *Eichhornia Crassipes* en sistema de flujo continuo ubicada en CITRAR (Año 2010)

Comentario: En el caso del *Jacinto de Agua*, se observa un aproximado crecimiento desde un 75% del área total de cada estanque hasta un 100% después de 16 días como se observa en la Figura 4.45.

A. Requerimientos nutricionales

Eichhornia crassipes es una de las plantas que más nutrientes remueve, su elevado consumo en NTK, (Nitrógeno total) demuestra la utilización de estos macronutrientes para procesar la proteína que forma su estructura corporal. Estudios como el de Rodríguez et al.(2005) demuestran que el consumo de N.T.K disminuye en el agua de 29 a 8 mg/l.

Aunque en algunos casos *Lemna minor* es la especie que requiere más cantidad de nutrientes, según Majid citado por Pedraza (2005), los requerimientos de nitrógeno en *Eichhornia* son menores que en *Lemna sp*, es así que una planta grande puede requerir entre 1.5 y 2.15 mg/l mientras que en *Lemna sp* los requerimientos van de 4.83 mg/l. Para el parámetro fósforo *Eichhornia* requiere entre 0.38 a 0.56 mg/l y en *Lemna sp* 1.37mg/l; el parámetro potasio es requerido en *Eichhornia* entre 2.68 y 3.4 mg/l a diferencia de *Lemna sp* que demanda 4.56 mg/l.

B. Análisis del comportamiento de *Eichhornia crassipes* en época de verano

Durante el estudio de *Eichhornia crassipes* para la cual se registran menos investigaciones en nuestro país. Se ha tomado en cuenta la época de verano en el Perú, este análisis ayudó a entender y a manejar de forma adecuada a la especie y planificando sus posibles usos.

Los meses considerados para el estudio fueron entre febrero (inicio del verano) y junio (fin de verano). A continuación se evalúan los parámetros considerados de mayor importancia en el tratamiento de las aguas residuales domésticas.

4.2.5. Interpretación de Resultados Físicos-Químicos

A continuación se mostrarán los gráficos de los resultados fisicoquímicos de los sistemas: Por tandas, donde involucran las plantas acuáticas y el Control (Sin planta acuática); y los Sistemas de Flujo Continuo utilizando *Lemna Minor* y *Eichhornia Crassipes*.

4.2.5.1. Sistema Por tandas con *Lemna Minor* y *Eichhornia crassipes*

A continuación se mostraran los resultados de los análisis, valores mediciones diarias para el caso de Temperatura, PH, Turbiedad y Oxígeno Disuelto.



Figura 4. 46: Sistemas por tandas, con *Lemna minor*, *Eichhornia crassipes* y sin planta acuática (del 25 de Febrero al 12 de Marzo) ubicadas en CITRAR-UNI (Año 2010)

Comentario: La Figura 4.46 muestra los tres estanques utilizado para el cultivo de *Lemna Minor*, *Eichhornia Crassipes* y sin planta acuática la cual se

experimentaron una vez en la época de verano.

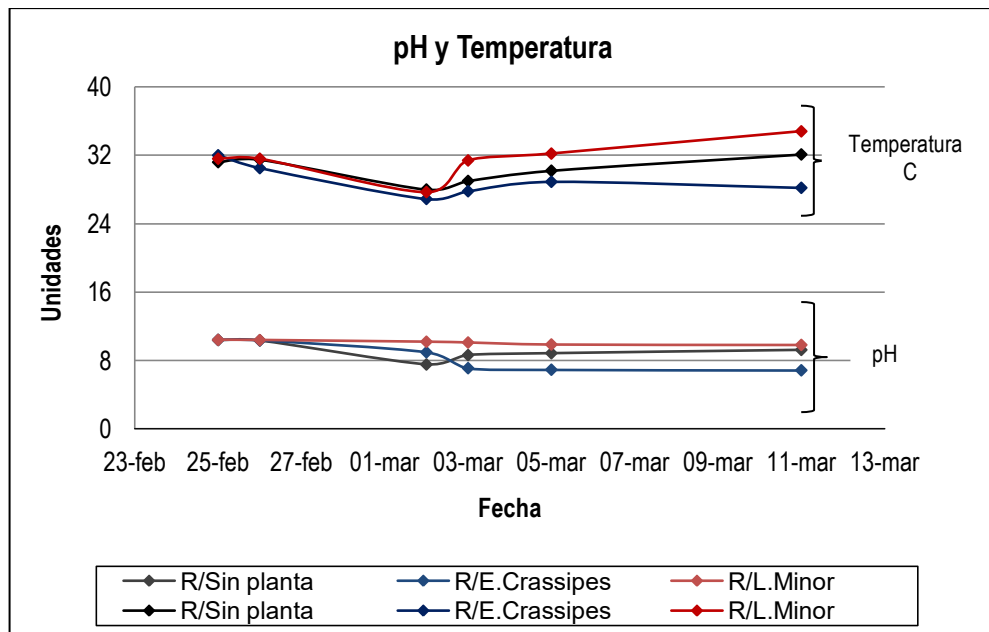


Figura 4. 47: Comportamiento de pH y temperatura en los estanques (del 25 de Febrero al 12 de Marzo del 2010) ubicadas en CITRAR-UNI.

Interpretación: Estas mediciones de Temperatura y PH se realizaron entre el 23 de Febrero al 12 de Marzo del 2010, cada curva con un solo color representa al conjunto de mediciones de Temperatura y PH para un reactor cubierta con una especie de planta acuática contenida en un acuario tal como se observa en la figura. En este caso, son tres reactores: Con lenteja de Agua (curvas de color rojo), con Jacinto de Agua (curvas de color azul), y el Control (curvas de color negro).

La **temperatura** considerado uno de los parámetros de gran importancia ya que interviene en los todos los procesos biológicos y fisiológicos que se desempeñan en los sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas. Tal como se muestra en la Figura 4.47, este parámetro no presentó grandes variaciones sin embargo, se presentó un mayor aumento en el cultivo de *Lemna Minor* desde 31.6°C hasta un 34.8°C, esto debido al uso de plástico adherido al reactor de material metálico, en cambio existió un leve descenso por *Eichhornia crassipes* en este parámetro.

Según Caicedo (2000), el crecimiento de la *Lenteja de Agua* muestra una clara relación con la **temperatura**, encontrándose de estos valores mínimos, óptimos

y máximos. Esto puede ser fácilmente explicado, puesto que el crecimiento es el resultado de muchos procesos bioquímicos dependientes de la temperatura como son: toma de nutrientes, transporte y asimilación de nutrientes, fotosíntesis, respiración y otros procesos compuestos de reacciones enzimáticas. Estudios realizados por Docauer (1983) señalan como un rango óptimo de temperatura para diferentes especies de 25 a 31°C donde se logra un eficiente crecimiento de *Lemna*. Esto está en concordancia con lo reportado por Landolt (1987).

Según Caicedo (2000), en comparación con otras plantas acuáticas, como *Jacinto de Agua* por ejemplo, las *Lemnaceae*s son muy tolerantes a un amplio rango de temperatura. Ellas se encuentran en todos los climas a excepción de los lugares muy fríos.

Las curvas indican un comportamiento casi constante en concentración del **pH promedio**, cuyos valores oscilan entre 6.86 y 10.42 donde se manifiestan ligeros descensos.

Para los tres casos, el valor del **pH inicial** tuvo un valor de 10.4 que va disminuyendo; es decir el comportamiento sin planta acuática es similar al comportamiento de la temperatura; mientras que con las plantas acuáticas, como *Eichhornia Crassipes* ocurre un descenso del pH llegando a 6.86 y con *Lemna Minor* el pH presenta un ligero descenso hasta 9.83. Es decir el *Jacinto de Agua* muestra que a mayor temperatura, menor valor del pH, siendo esta diferencia mucho mayor con respecto a la *Lenteja de Agua*.

Según Caicedo (2000), es bien conocido que el **pH** es un factor importante en cualquier proceso biológico, pues determina muchos equilibrios químicos e influyen en los procesos metabólicos. La solubilidad de elementos como el fósforo, el hierro, el zinc, el manganeso, importantes para el crecimiento de la lenteja de agua depende del pH y por lo tanto la disponibilidad de dichos elementos en el agua está subordinada a este parámetro. También hay especies químicas cuyo equilibrio está determinado por el nivel de pH, como son las parejas: ion amoníaco-nitrógeno gaseoso, ion sulfuro – ácido sulfhídrico.

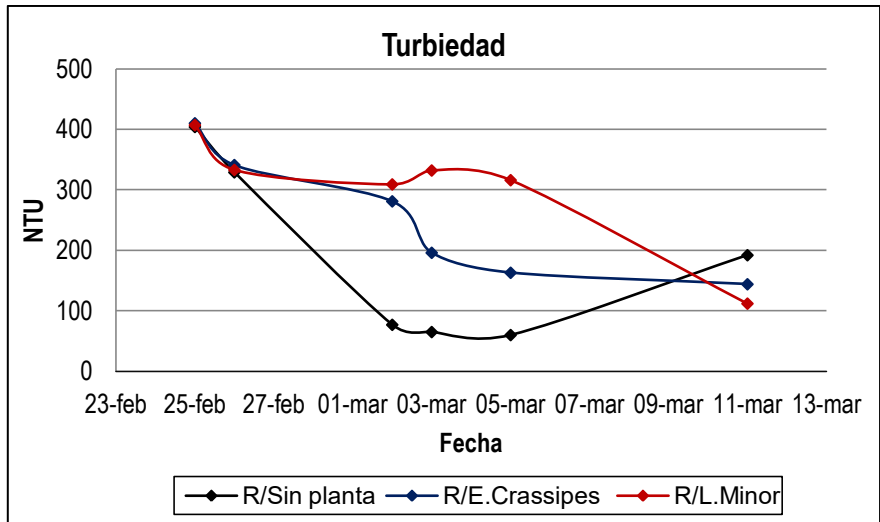


Figura 4. 48: Remoción de la Turbiedad en los estanques (del 25 de Febrero al 12 de Marzo del 2010) ubicadas en CITRAR-UNI.

Interpretación: Se aprecia las curvas del parámetro de la Turbiedad con respecto al tiempo de los dos reactores con plantas acuáticas y del reactor Control.

En la Figura 4.48, los sólidos suspendidos y sólidos sedimentables muestran un comportamiento variable, provoca remociones altas en el parámetro de **turbiedad** durante su inicio alcanzó valores en los tres tratamientos de 407 NTU, y removiéndose hasta 212, 266 y 295 NTU en el cultivo sin planta acuática, de *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor* respectivamente; representando un alto el porcentaje de remoción por parte de *Lemna minor* en un 72% y un 65% por parte de *E. crassipes*, sin embargo hubo remoción sin plantas acuáticas en un 52%.

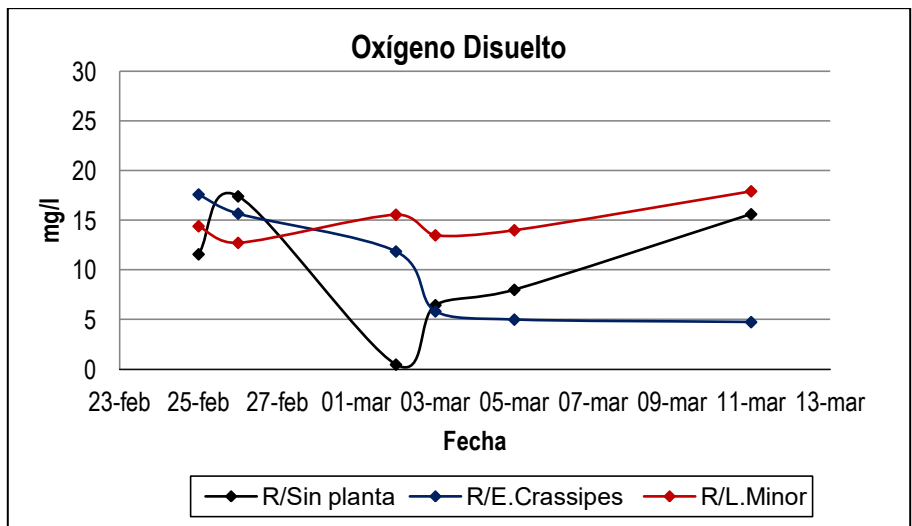


Figura 4. 49: Comportamiento de Oxígeno Disuelto en los estanques (del 25 de Febrero al 12 de Marzo del 2010) ubicadas en CITRAR-UNI.

Interpretación: La Figura 4.49, muestra el comportamiento del **Oxígeno disuelto**, realizado por plantas acuáticas y sin estas. Existe leves variaciones en los tratamientos sin planta acuática, con *E. crassipes* y *L. minor* poco acentuadas de 9.9, 10.1, 14.7 mg/l

La comparación de la **OD** entre en las aguas residuales tratados permite medir la efectividad de sistema de tratamiento para observa si existen zonas aerobias y/o anaerobias.

4.2.5.2. Sistema de Flujo Continuo con *Lemna Minor*

A continuación se mostraran los resultados de los análisis, valores promedios de las tres mediciones diarias (9:00, 13:00 y 16:00 horas) para el caso de Temperatura, PH, Turbiedad, Oxígeno Disuelto y Conductividad. Mientras que para los parámetros de Fósforo Total y Nitrógeno Amoniacal se los resultados fueron obtenidos diariamente por un periodo más corto.



Figura 4. 50: Estanques con Sistemas de “flujo continuo” cubierto con *Lemna Minor* ubicada en CITRAR-UNI (del 07 de Abril al 20 de Mayo del 2010)

Comentario: Se muestra el sistema de reactores utilizado cubierto con *Lemna Minor* la cual se experimentó una vez en la época de verano.

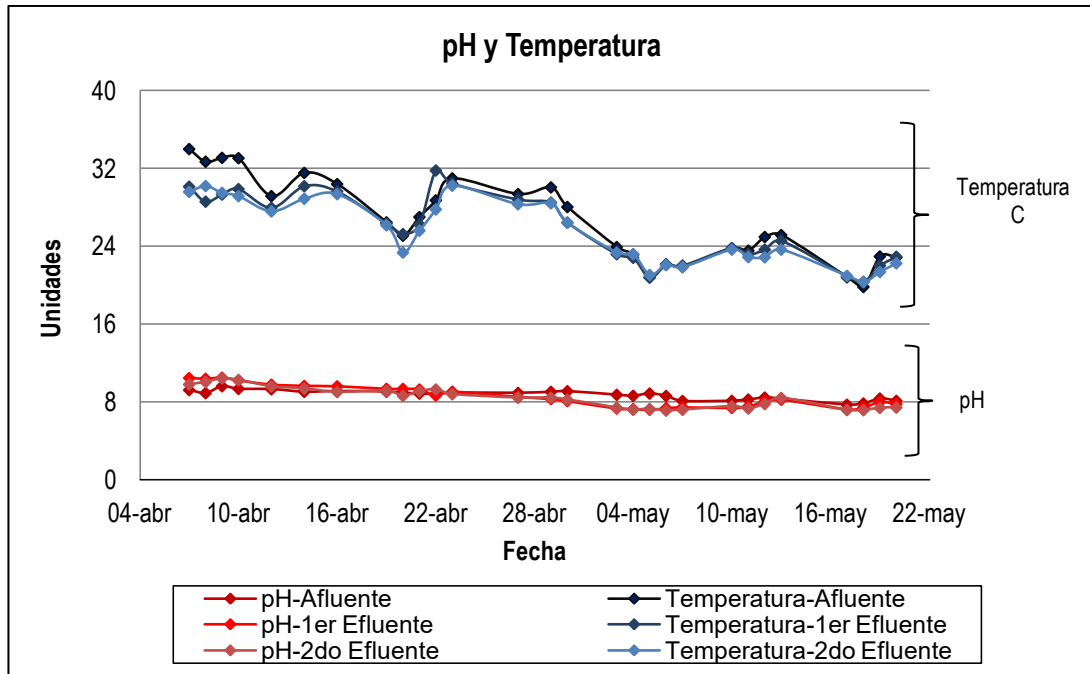


Figura 4. 51: Comportamiento de pH y temperatura de los 3 puntos de muestreo cubierto con Lemna M en el Sistema Continuo (del 07 de Abril al 20 de Mayo del 2010 en CITRAR)

Interpretación: Cada curva representa al conjunto de mediciones de Temperatura o PH en cada punto de muestreo, las cuales son del Afluyente, 1er Efluente y 2do Efluente. Estas mediciones de Temperatura promedio y PH promedio se realizaron entre el 7 de Abril al 20 de Mayo del 2010.

El conjunto de curvas de **Temperatura** se asemejan y prácticamente empalman una con otra, es debido a que el volumen de agua y el área de espejo de agua fueron las mismas para cada reactor. Según el grafico, fue mayor la temperatura al inicio del experimento y menor al final de este. Este parámetro presentó variaciones de acuerdo a la **Temperatura** del medio ambiente (a mayor radiación solar se dio la mayor temperatura del agua residual tratada).

Se presenta una disminución en los afluyente y efluentes, que varía de 40.9 a 19.4 °C. Se observa además variaciones entre las temperaturas del afluyente y el primer efluente disminuyendo en 0.84°C y en el 2do efluente en 1.26°C.

La **temperatura** considerado uno de los parámetros de gran importancia ya que interviene en los todos los procesos biológicos y fisiológicos que se desempeñan en los sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas.

La Figura 4.51, muestra el comportamiento de los parámetros de pH y

Temperatura evaluados. Las gráficas indican comportamientos similares en concentración del **pH**, cuyos valores oscilan entre 7.1 y 10.7 donde se manifiestan ligeros descensos. .

Los elementos inorgánicos comunes en las aguas residuales incluyen cloruro, iones de hidrógeno (que influyen en el **pH**), y entre los compuestos que causan alcalinidad, nitrógeno, fósforo y azufre. Es necesario mencionar que la descomposición de materia orgánica o de ácidos orgánicos puede también incrementar el nivel de pH en aguas residuales domésticas (Clostre, 2007). Según Valderrama, los niveles de pH pueden alterarse durante el tratamiento de aguas residuales domésticas entre 6.5 y 8.5.

Las plantas acuáticas como *Lemna crassipes* presentan niveles cercanos a la neutralidad, no presenta variaciones como las algas presentes en una muestra que al realizar fotosíntesis en proceso, remueve el CO₂ y altera el equilibrio Buffer ácido carbónico-carbonatos, elevando el pH.

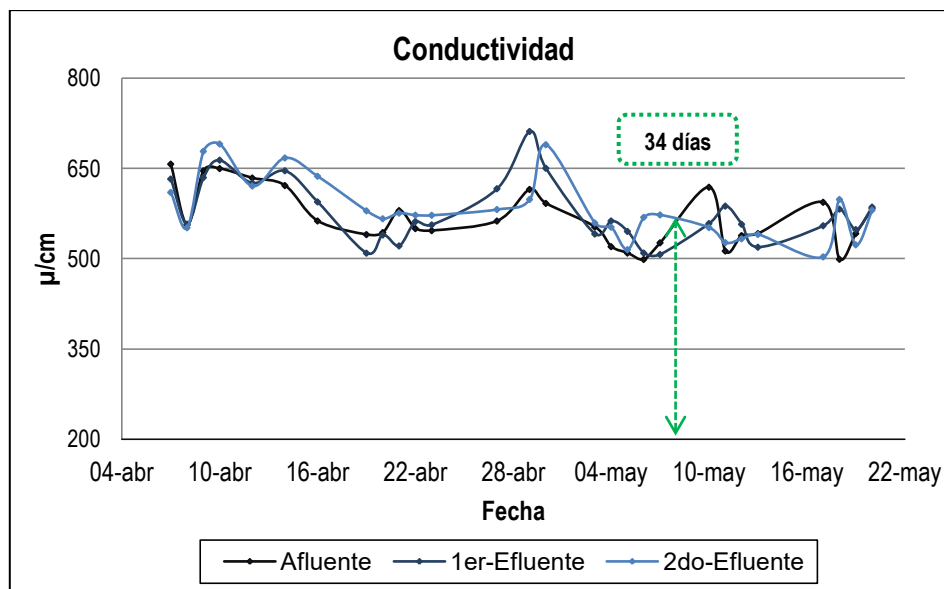


Figura 4. 52: Comportamiento de la Conductividad medido en los 3 puntos del Sistema Continuo cubierto con *Lemna M.* (del 07 de Abril al 20 de Mayo del 2010) en CITRAR-UNI.

Interpretación: Se aprecia las curvas del parámetro de la Conductividad con respecto al tiempo de los tres puntos en el transcurso del Sistema Continuo. Las conductividades fueron mayores en el 1er y 2do Efluente comparado con el Afluente hasta los 34 días de tratamiento tal como se aprecia en la figura anterior, con un incremento del 2% (hasta el 1er Efluente) y 3% (hasta el 2do

Efluente).

La Figura 4.52 presenta además el comportamiento relativamente similar de **conductividad** evaluado en los tres puntos. La conductividad demuestra que las concentraciones de sales en el afluente no presentan diferencias marcadas con respecto a los efluentes, ingresando con valores promedios semejantes con concentraciones de 567.6 (Afluente), 577.8 (1er Efluente) y 582.7 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (2do Efluente), siendo alta debido a los contenidos de sales en las aguas residuales domésticas.

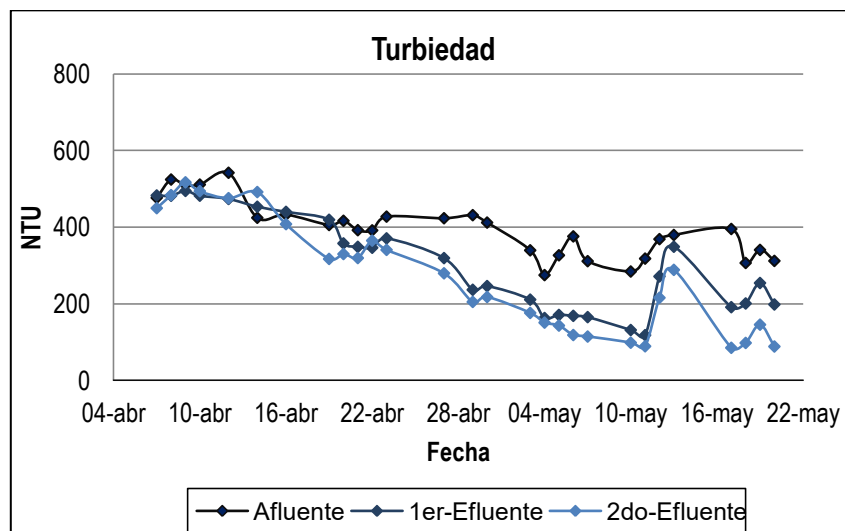


Figura 4. 53: Remoción de la Turbiedad medida en los 3 puntos del Sistema Continuo cubierto con Lemna M. (del 07 de Abril al 20 de Mayo del 2010) en CITRAR-UNI.

Interpretación: Se aprecia las curvas del parámetro de la Turbiedad con respecto al tiempo de los tres puntos en el transcurso del Sistema Continuo.

En la Figura 4.53, la **turbiedad** (sólidos suspendidos y sólidos sedimentables) muestra un comportamiento variable, la época de verano provoca incrementos elevados en el parámetro de la turbiedad durante su ingreso, 1er y 2do efluente alcanzando valores máximos promedios de 542.0, 494.7, y 517.0 NTU respectivamente notándose remociones del 47.3 y 25.0 NTU, es decir con niveles de remoción del 1er y 2do efluente del 9% y 5% respectivamente.

Sin embargo el tratamiento muestra para valores de menores concentraciones de 275.0, 118.3 y 85.3 NTU para el ingreso, 1er y 2do efluente respectivamente, se remueve hasta 156.7 y 189.7 NTU, representando un alto el porcentaje de remoción del 1er y 2do efluente en un 57% y 69% respectivamente.

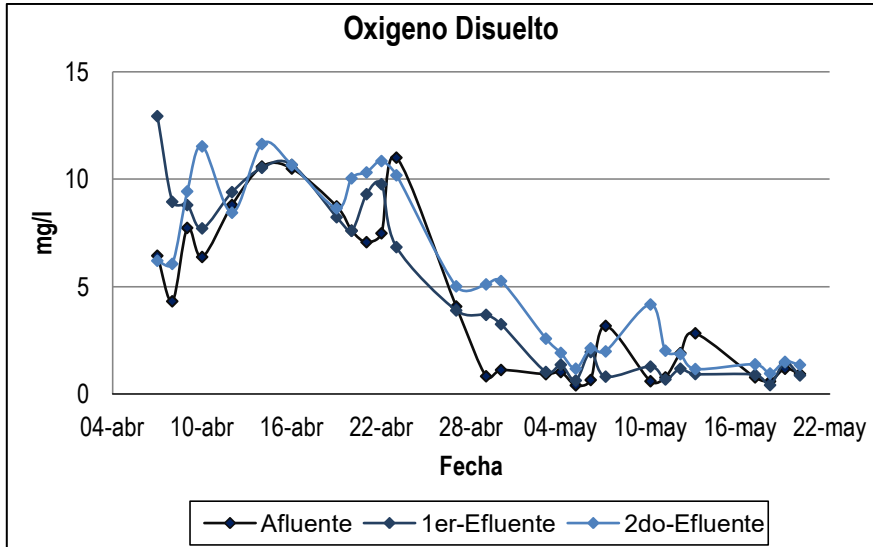


Figura 4. 54: Comportamiento del Oxígeno Disuelto medidos en los 3 puntos de muestreo del Sistema Continuo cubierto con *Lemna M.* (del 07 de Abril al 20 de Mayo del 2010) en CITRAR-UNI.

Interpretación: Se aprecia las curvas del parámetro de la Oxígeno Disuelto con respecto al tiempo de los tres puntos en el transcurso del Sistema Continuo.

El Oxígeno Disuelto disminuyó a concentraciones promedios menores a 1 mg/lit en el área de agua residual cubierta con *Lemna Minor*, a causa de la eliminación de las algas provenientes de la laguna de estabilización. Sin embargo notamos que el Oxígeno Disuelto también es decreciente en el Afluente esto es debido porque se colocó un filtro (Acuario pequeño con arena limpia) antes del Sistema de Flujo Continuo. Además se observó que las algas quedaban adheridas en las tuberías de PVC y al fondo de cada reactor.

En todo este tiempo que duro el experimento, el filtro se lavo una vez después de haberse instalado, colocándose nuevamente en funcionamiento. Esto quiere decir que la planta acuática *Lemna Minor* a esa altura de nivel de agua no fue la única causa para la disminución de Oxígeno Disuelto en los tres puntos de muestreo. Por lo que se puede apreciar hay un ligero aumento de OD en el Afluente, esto debido a la altura del nivel de agua y a la ubicación exacta del punto de muestreo.

La altura del medio acuático de la segunda Laguna de estabilización (zona aeróbica) es de un metro en la PTAR-CITRAR, mientras que los reactores con la Lenteja de Agua en este estudio son de 12 a 20 cm.

La disminución de algas ocurre porque las Lentejas de Agua que flotan en la superficie del agua como una alfombra opaca no permiten que la luz atraviese esta biomasa. En consecuencia, las algas no pueden realizar la fotosíntesis, ni sedimentarse en los reactores. A diferencia de las algas, la biomasa generada por *Lemna Minor* en una laguna, podrá ser retirada con más facilidad. La disminución de la concentración de algas reducen los parámetros de DBO₅, DQO, sólidos en suspensión y turbiedad.

La Figura 4.54 muestra el comportamiento del OD de los tres puntos de muestreo, donde en conjunto la variación es notoria en todo el tiempo de este experimento, disminuyendo en promedio desde un 13.7 a 0.56 mgO₂/L (96% menos en cada estanque con *Lemna Minor*), es decir el medio aerobio se convierte cada vez más a un medio anaerobio.

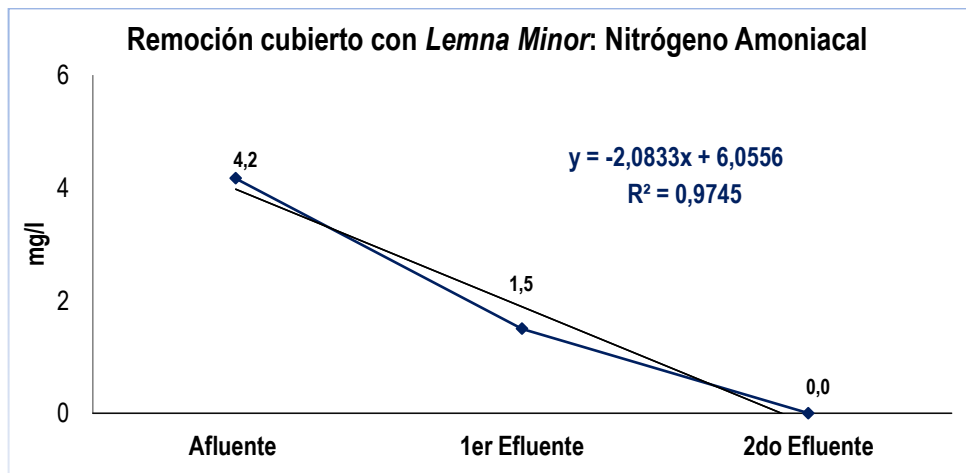


Figura 4. 55: Resultados de las mediciones de concentración en N. Amoniacal en los 3 puntos del Sistema Continuo cubierto con *Lemna M.* (del 07 de Abril al 20 de Mayo del 2010) en CITRAR-UNI.

Interpretación: La curva muestra resultados de la concentración de Nitrógeno Amoniacal promedio, que fueron tomados en los tres puntos de muestreo en el proceso del Sistema Continuo (Afluyente, mitad del sistema y Efluente); en la cual la remoción hasta el 1er Reactor y el 2do Reactor, fueron del 67% y 100% respectivamente; estos resultados fueron obtenidos de la diferencia entre el Afluyente y los efluentes de los reactores.

La Figura 4.55 muestra además la capacidad de depuración del Sistema Continuo cubierto por *Lemna Minor* con respecto a este parámetro, mediante la tasa o pendiente obtenida por la recta, que representa la cantidad obtenida de Nitrógeno Amoniacal que es removida por cada reactor, es decir existe una

remoción promedio de 4.17 mg/l en 5 días que dura el tiempo de retención de los dos reactores en todo el proceso.

Según Rodier (2005), el nitrógeno amoniacal existe en solución acuosa tanto en forma de ion amonio como en forma de amoníaco. Para valores de pH superiores a 9.3, predominando el amoníaco, mientras que para valores por debajo de 9.3 existe un predominio de ion amonio. Los niveles de absorción de nitrógeno son altos debido a la necesidad de las plantas de este bioestimulante para sintetizar proteínas.

Según Monette (2006), mediante un estudio realizado en Canadá, la absorción óptima de nitrógeno fue de 3.98% a 5.80% con una tasa de remoción de 483 mg-N/m²/d.

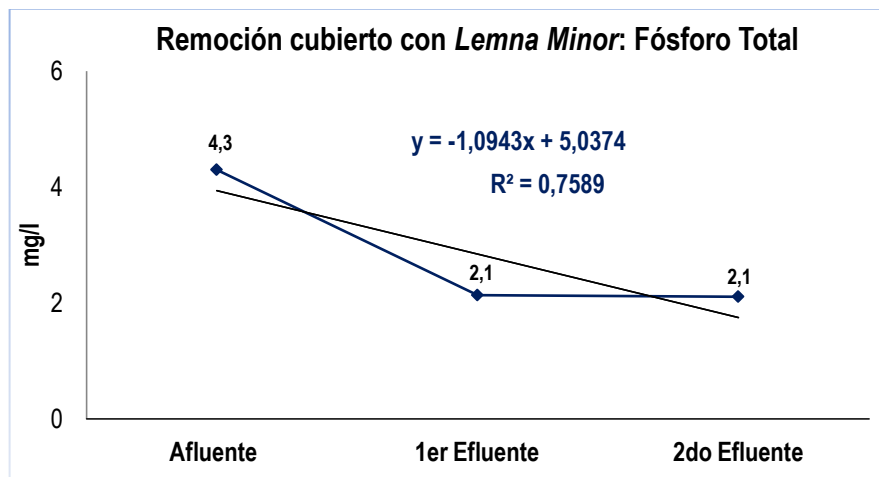


Figura 4. 56: Remoción de fósforo total en el cultivo de Lemna M. (del 07 de Abril al 20 de Mayo del 2010) en CITRAR-UNI.

Interpretación: La curva muestra resultados de la concentración de Fósforo Total promedio, que fueron tomados en los tres puntos de muestreo en el proceso del Sistema Continuo (Afluente, mitad del sistema y Efluente); en la cual los valores de este parámetro fluctuó de 4.3 mg/l disminuyendo a 2.1 mg/l, la remoción hasta el 1er Reactor y el 2do Reactor, y los porcentajes de remoción fueron del 46% y 50% respectivamente; estos resultados fueron obtenidos de la diferencia entre el Afluente y los efluentes de los reactores.

La Figura 4.56 muestra además la capacidad de depuración del Sistema Continuo cubierto por *Lemna Minor* con respecto a este parámetro, mediante la tasa o pendiente obtenida por la recta, que representa la cantidad obtenida de

Fósforo Total que es removida por cada reactor, es decir existe una remoción promedio de 2.10 mg/l en 5 días que dura el tiempo de retención de los dos reactores en todo el proceso.

El fósforo es un nutriente esencial para el crecimiento de plantas y cuando se encuentran en exceso en los efluentes tratados y descargados a las aguas superficiales, pueden causar un crecimiento excesivo de algas.

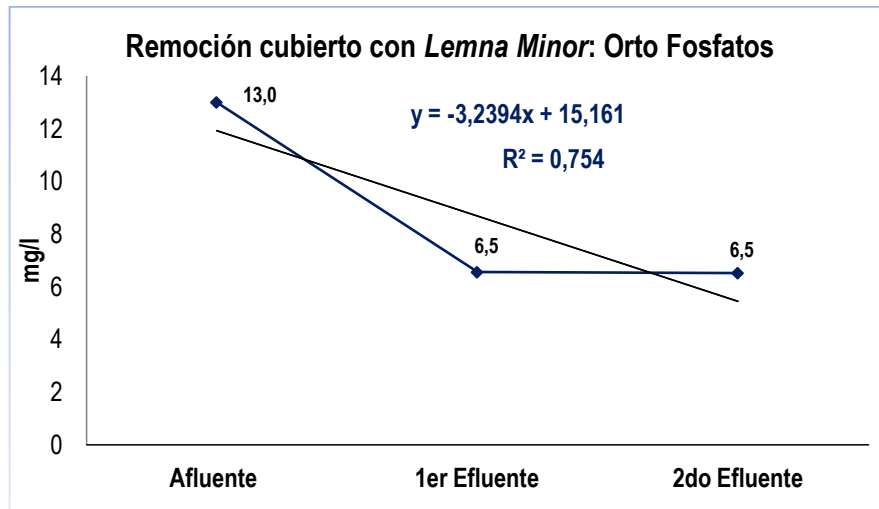


Figura 4. 57: Remoción de orto fosfatos en el cultivo de *Lemna M.* (del 07 de Abril al 20 de Mayo del 2010) en CITRAR-UNI.

Interpretación: La curva muestra resultados de la concentración de Orto Fosfato promedio, que fueron tomados en los tres puntos de muestreo en el proceso del Sistema Continuo (Afluente, mitad del sistema y Efluente). Las concentraciones de los **fosfatos** fluctuó de 13.0 a 6.6 mg/l, en la cual la remoción hasta el 1er Reactor y el 2do Reactor, fueron del 46% y 49% respectivamente; este resultado fue obtenido de la diferencia entre el Afluente y los efluentes de los reactores.

La Figura 4.57 muestra además la capacidad de depuración del Sistema Continuo cubierto por *Lemna Minor* con respecto a este parámetro, mediante la tasa o pendiente obtenida por la recta, que representa la cantidad obtenida de Orto Fosfato que es removida por cada reactor, es decir existe una remoción promedio de 6.48 mg/l en 5 días que dura el tiempo de retención de los dos reactores en todo el proceso.

Según Rodier (2005), las aguas residuales domiciliarias pueden contener entre 4

y 12 mg/l de fósforo expresado como P. Se observa además que la remoción máxima se observa solo hasta el primer estanque ya que la remoción no se incrementa en el segundo estanque. Según Monette (2006), mediante un estudio realizado en Canadá, la absorción óptima de fósforo fue de 1.05% a 1.69% con una tasa de remoción de 128 mg-P/m²/d.

4.2.5.3. Sistema de Flujo Continuo con *Eichhornia crassipes*

A continuación se mostraran los resultados de los análisis, valores promedios de las tres mediciones diarias (9:00, 13:00 y 16:00 horas) para el caso de Temperatura, PH, Turbiedad, Oxígeno Disuelto y Conductividad. Mientras que para los parámetros de Fósforo Total y Nitrógeno Amoniacal se los resultados fueron obtenidos diariamente por un periodo más corto.



Figura 4. 58: Estanques con Sistemas de “flujo continuo” cubierto con *Eichhornia crassipes* ubicada en CITRAR-UNI (del 24 de Mayo al 4 de Junio del 2010)

Comentario: Se muestra el sistema de reactores utilizado cubierto con *Eichhornia Crassipes* la cual se experimentó una vez en la época de verano.

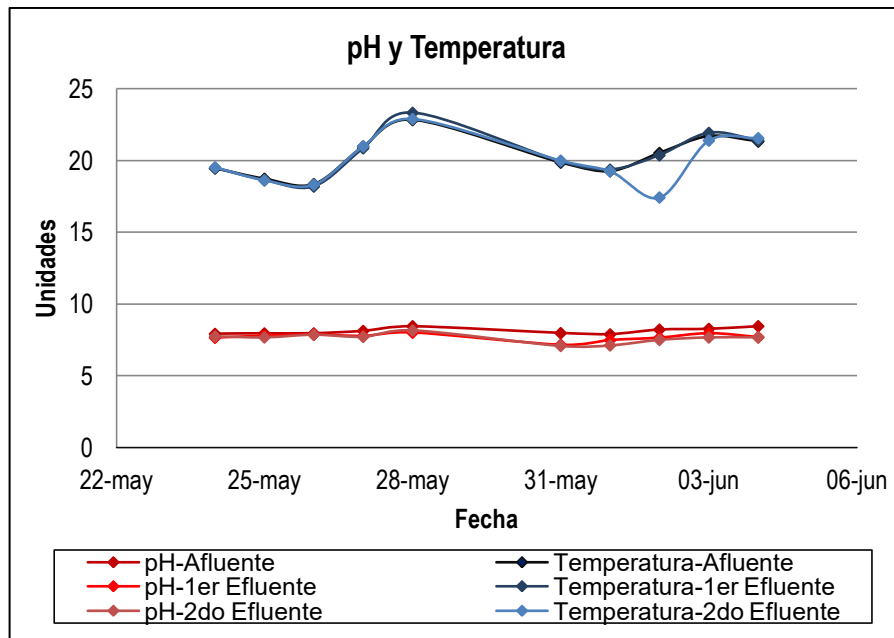


Figura 4. 59: Comportamiento de pH y temperatura de los 3 puntos de muestreo cubierto con *Eichhornia Crassipes* en el Sistema Continuo (del 24 de Mayo al 4 de Junio del 2010 en CITRAR)

Interpretación: Cada curva representa al conjunto de mediciones de Temperatura o PH en cada punto de muestreo, las cuales son del Afluyente, 1er Efluente y 2do Efluente. Estas mediciones de Temperatura promedio y PH promedio se realizaron entre el 24 de Mayo al 4 de Junio del 2010.

El conjunto de curvas de **Temperatura** se asemejan y prácticamente empalman una con otra, es debido a que el volumen de agua y el área de espejo de agua fueron las mismas para cada reactor. El rango de este parámetro varió de 18.2 a 24.2°C.

Este parámetro presentó variaciones de acuerdo a la **Temperatura** del medio ambiente (a mayor radiación solar se dio la mayor temperatura del agua residual tratada).

La **temperatura** considerado uno de los parámetros de gran importancia ya que interviene en los todos los procesos biológicos y fisiológicos que se desempeñan en los sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas.

Según algunos autores la temperatura en aguas tratadas con *Eichhornia crassipes* se reduce, debido a la sombra que proporcionan sus anchas hojas sobre la lámina de agua y puede incrementar a causa de la luminosidad provocada por las cosechas y el crecimiento de la especie, como en el caso de la *Lemna Minor*.

La Figura 4.59 muestra que el comportamiento del PH es semejante al

comportamiento de la Temperatura, cuyos valores oscilan de 7.8 y 9.1.

Según Valderrama, los niveles de pH pueden alterarse durante el tratamiento de aguas residuales domésticas entre 6.5 y 8.5.

Las plantas acuáticas como *Jacinto de Agua* presentan niveles cercanos a la neutralidad, no presenta variaciones como las algas presentes en una muestra que al realizar fotosíntesis en proceso, remueve el CO₂ y altera el equilibrio Buffer ácido carbónico-carbonatos, elevando el pH.

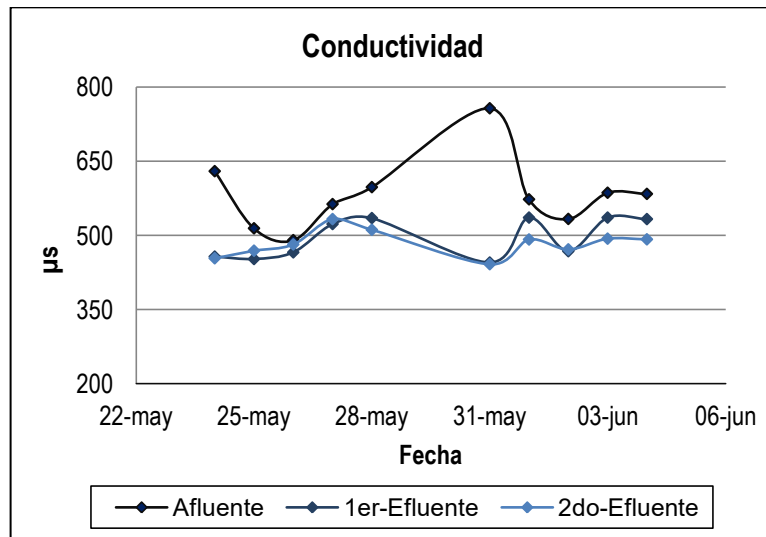


Figura 4. 60: Comportamiento de conductividad en el cultivo de *Eichhornia crassipes* (del 24 de Mayo al 4 de Junio del 2010 en CITRAR)

Interpretación: Se muestran las curvas del parámetro de la Conductividad con respecto al tiempo para cada punto de muestreo, a lo largo del proceso en el Sistema Continuo.

Se aprecia en la Figura 4.60 que los comportamientos de la **Conductividad** hubieran sido relativamente similares evaluados en los tres puntos de muestreo, si no fuera por un único punto de medición en el Afluente.

La conductividad demuestra que las concentraciones de sales no presentan diferencias marcadas entre en el afluente y los efluentes, sin embargo los niveles de remoción fueron del 15% y 20% hasta el 1er y 2do efluente respectivamente; resultados obtenidos entre, el valor promedio del Afluente (583.30 µs/cm) y los valores promedios de las concentraciones en el 1er efluente (495.42 µs/cm) y 2do efluente (484.23 µs/cm).

Un agua es tan conductora de electricidad, cuantos más minerales disueltos

contenga. La medida de conductividad da una idea muy aproximada del contenido mineral del agua.

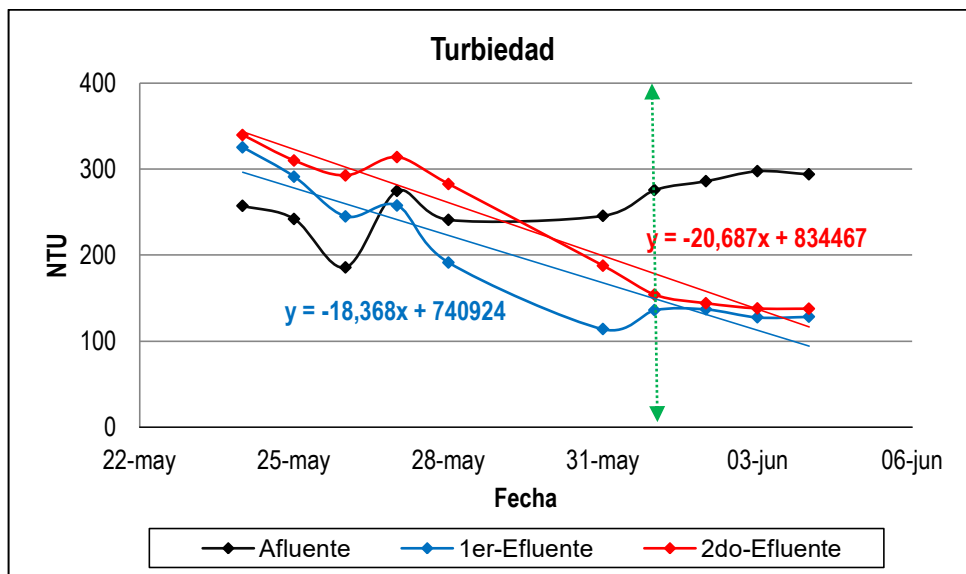


Figura 4. 61: Remoción de la Turbiedad en el cultivo de *Eichhornia crassipes* (del 24 de Mayo al 4 de Junio del 2010 en CITRAR)

Interpretación: Se muestran las curvas del parámetro de la **Turbiedad** con respecto al tiempo para los tres puntos de muestreo, a lo largo del proceso en el Sistema Continuo.

El rango de este parámetro en el Afluyente varió debido a la temperatura, entre 185.7 a 297.7 NTU, resultando un promedio de 259.97 NTU a través del tiempo.

En la Figura 4.61, la **Turbiedad** (sólidos suspendidos y sólidos sedimentables) muestra un comportamiento variable, donde en verano provoca incrementos elevados en este parámetro.

Sin embargo el Sistema Continuo muestra una clara tendencia decreciente en las curvas del 1er y 2do Efluente, por lo que se muestran las rectas resultantes mostrando las tasas de decaimiento en 18.4 y 20.7 NTU/día respectivamente. Estos resultados muestran una mayor remoción hasta el Efluente final del Sistema, sin embargo hasta la mitad del proceso representa una remoción del 88.89%.

Además se observa una línea que representa la separación de de los últimos 5 días en la que duró este experimento; basándose en el comportamiento lineal y constante de los valores obtenidos de este análisis, y para la obtención a una mayor eficiencia.

En el tratamiento en estos últimos días, las concentraciones promedio de la Turbiedad fueron de 279.80, 128.60 y 152.27 NTU para el ingreso, 1er y 2do efluente respectivamente.

Por lo tanto las capacidades de remoción del 1er y 2do efluente fueron de un 54% y 46% respectivamente, resultados obtenidos entre el efluente y los efluentes.

Se demuestra que hasta el primer reactor hay remoción, mientras que a partir del 1er Efluente o en el segundo reactor no hay remoción alguna, por lo que contrariamente aumenta la turbiedad.

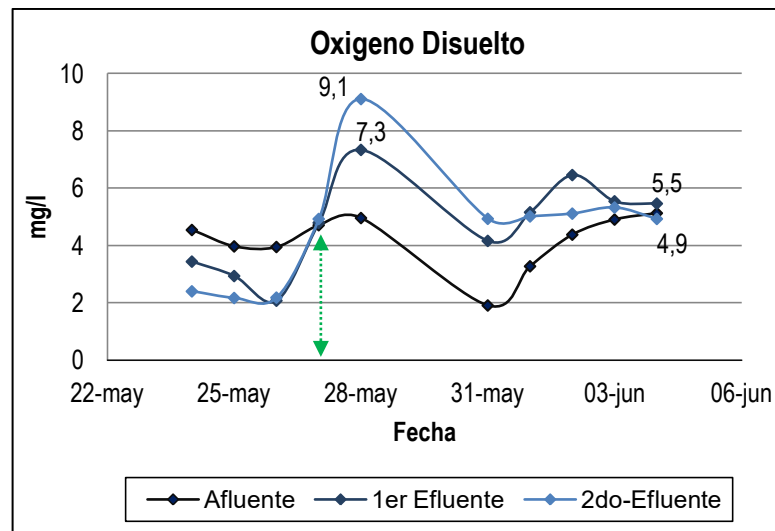


Figura 4. 62: Comportamiento del Oxígeno disuelto en el cultivo de *Eichhornia crassipes* (del 24 de Mayo al 4 de Junio del 2010 en CITRAR)

Interpretación: Se aprecia las curvas del parámetro de la **Oxígeno Disuelto** con respecto al tiempo de los tres puntos en el transcurso del Sistema Continuo.

La Figura 4.62, muestra el comportamiento del OD en los reactores cubiertos por *Eichhornia crassipes*, existiendo variaciones no muy diferenciadas.

Hasta el tercer día se observa una clara tendencia decreciente de Oxígeno disuelto en cada reactor; debido a las hojas del Jacinto de Agua evitando la transferencia de Oxígeno hasta un 50% del Oxígeno presente en el medio.

Se confirmó que la concentración del OD aumenta cinco veces y al doble en los reactores 1 y 2 respectivamente hasta el tercer día, es decir el medio anaerobio se convierte lentamente a un medio aerobio.

A partir del tercer día, la concentración de este parámetro en los reactores, es más alto que el afluente, que decrece hasta casi igualar al valor del afluente.

El valor del 1er efluente varió desde un 7.3 a 5.5 mgO₂/l, mientras que del 2do efluente fluctuó desde 9.1 a 4.9 mgO₂/l.

Los porcentajes de remoción fueron de 46.15% hasta el segundo reactor, y un 24.66% hasta el primer reactor.

Con estos resultados se demuestra que la reproducción del Jacinto de Agua comenzó a partir del tercer día incrementando el Oxígeno disuelto en cada acuario, nuevamente el OD presente en el medio disminuye hasta llegar a la concentración del afluente en el octavo día, por estar cubierto por la planta acuática.

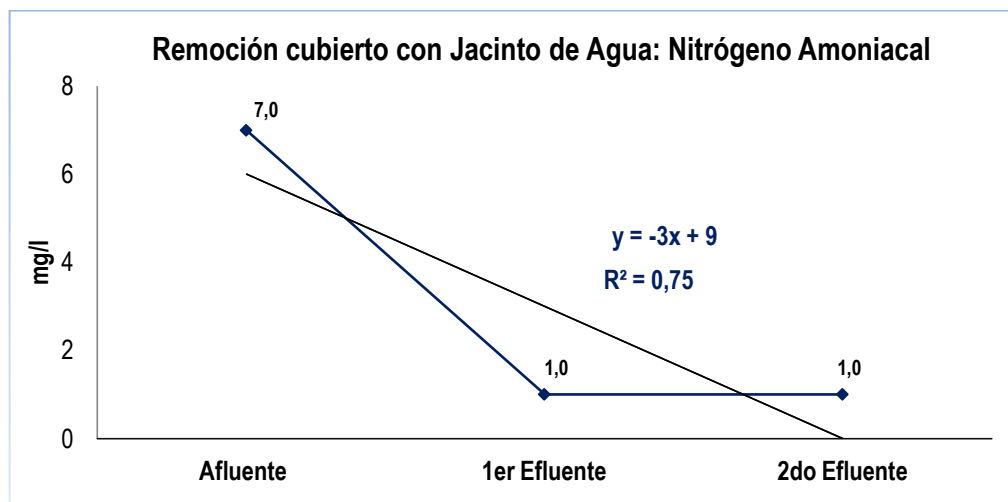


Figura 4. 63: Remoción de *N. amoniacal* en el cultivo de *Eichhornia crassipes* (del 24 de Mayo al 4 de Junio del 2010 en CITRAR)

Interpretación: La curva muestra resultados de la concentración de Nitrógeno Amoniacal promedio, que fueron tomados en los tres puntos de muestreo en el proceso del Sistema Continuo (Afluente, mitad del sistema y Efluente); en la cual la remoción hasta el 1er Reactor y el 2do Reactor, fueron del 85.7% y 85.7% respectivamente; estos resultados fueron obtenidos de la diferencia entre el Afluente y los efluentes de los reactores.

La Figura 4.63 muestra además la capacidad de depuración del Sistema Continuo cubierto por *Eichhornia crassipes* con respecto a este parámetro, mediante la tasa o pendiente obtenida por la recta, que representa la cantidad obtenida de Nitrógeno Amoniacal que es removida por cada reactor, es decir existe una remoción promedio de 6 mg/l en 5 días que dura el tiempo de retención de los dos reactores en todo el proceso.

Según Rodier (2005), el nitrógeno amoniacal existe en solución acuosa tanto en forma de ion amonio como en forma de amoníaco. Para valores de pH superiores a 9,3, predominando el amoníaco, mientras que para valores por debajo de 9,3 existe un predominio de ion amonio. Los niveles de absorción de nitrógeno son altos debido a la necesidad de las plantas de este bioestimulante para sintetizar proteínas.

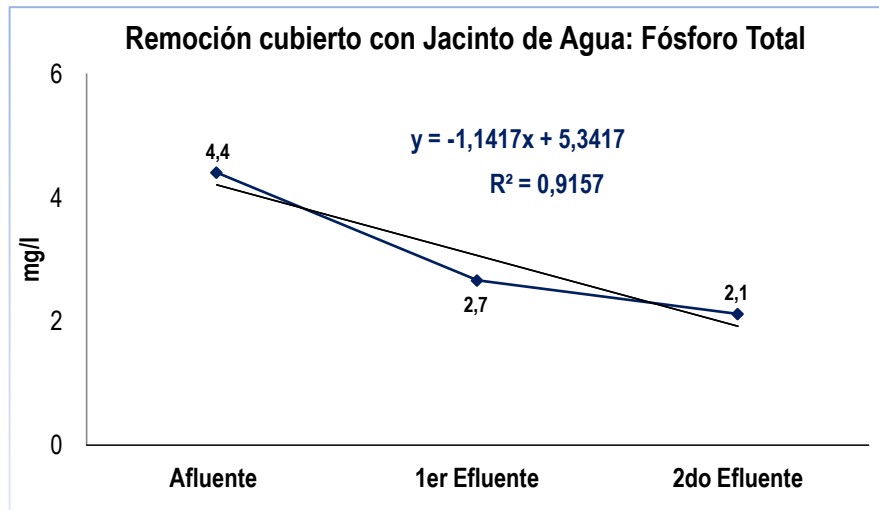


Figura 4. 64: Remoción de fósforo total y fosfatos en el cultivo de *Eichhornia crassipes* (del 24 de Mayo al 4 de Junio del 2010 en CITRAR)

Interpretación: La curva muestra resultados de la concentración de Fósforo Total promedio, que fueron tomados en los tres puntos de muestreo en el proceso del Sistema Continuo (Afluente, mitad del sistema y Efluente).

Los valores de este parámetro fluctuó de 4.4 mg/l disminuyendo a 2.1 mg/l, la remoción hasta el 1er Reactor y el 2do Reactor, y los porcentajes de remoción fueron del 38.64% y 52.27% respectivamente; estos resultados fueron obtenidos de la diferencia entre el Afluente y los efluentes de los reactores.

La Figura 4.64 muestra además la capacidad de depuración del Sistema Continuo cubierto por *Eichhornia crassipes* con respecto a este parámetro, mediante la tasa o pendiente obtenida por la recta, que representa la cantidad obtenida de Fósforo Total que es removida por cada reactor, es decir existe una remoción promedio de 2.28 mg/l en 5 días que dura el tiempo de retención de los dos reactores en todo el proceso.

El fósforo es un nutriente esencial para el crecimiento de plantas y cuando se encuentran en exceso en los efluentes tratados y descargados a las aguas superficiales, pueden causar un crecimiento excesivo de algas.

Según Rodier (2005), las aguas residuales domiciliarias pueden contener entre 4 y 12 mg/l de fósforo expresado como P. Se observa además que la remoción máxima se observa solo hasta el primer estanque ya que la remoción no se incrementa en el segundo estanque.

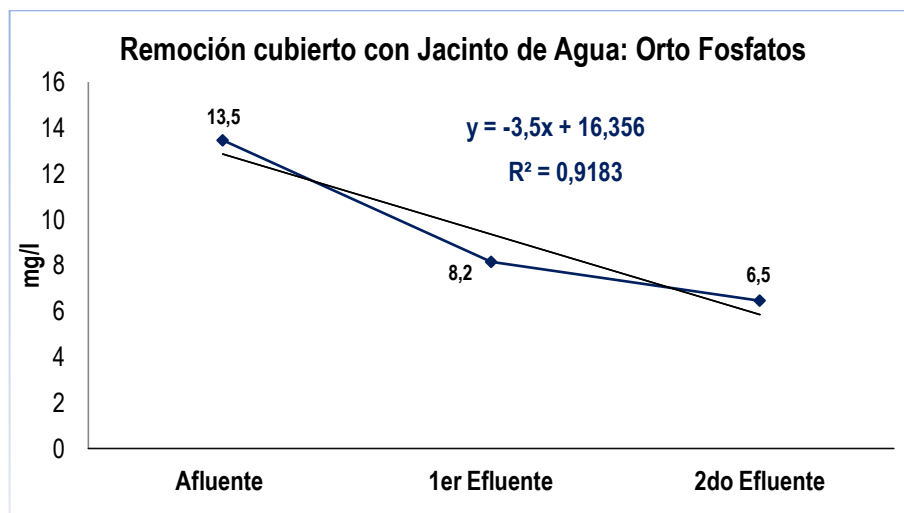


Figura 4. 65: Remoción de orto fosfatos en el cultivo de *Eichhornia crassipes* (del 24 de Mayo al 4 de Junio del 2010 en CITRAR)

Interpretación: La curva muestra resultados de la concentración de Orto Fosfato promedio, que fueron tomados en los tres puntos de muestreo en el proceso del Sistema Continuo (Afluente, mitad del sistema y Efluente).

Las concentraciones de los **fosfatos** fluctuó de 13.5 a 6.5 mg/l, en la cual la remoción hasta el 1er Reactor y el 2do Reactor, fueron del 39.26% y 51.85% respectivamente; este resultado fue obtenido de la diferencia entre el Afluente y los efluentes de los reactores.

La Figura 4.65 muestra además la capacidad de depuración del Sistema Continuo cubierto por *Eichhornia crassipes* con respecto a este parámetro, mediante la tasa o pendiente obtenida por la recta, que representa la cantidad obtenida de Orto Fosfato que es removida por cada reactor, es decir existe una remoción promedio de 7.00 mg/l en 5 días que dura el tiempo de retención de los dos reactores en todo el proceso.

4.2.6. Comportamiento de la Biomasa de las Plantas Acuáticas

Las velocidades de crecimiento de *Lemna Minor* y *Eichhornia Crassipes* dependen de la concentración de nutrientes, es decir de la caracterización del efluente; del espacio físico que disponga para ocupar durante su proceso de desarrollo; y del medio ambiente al cual está en contacto.

Se determinaron la COP_L (Carga Operacional de la *Lemna*) en g/d y la COP_E (Carga Operacional de *Eichhornia*) en g/d por cada estanque iniciando con una cobertura de siembra de la mitad del espacio, en cada uno de los estanques ya sea para los sistemas; Por Tandas como para el de Flujo Continuo.

4.2.6.1. Sistema Por Tandas: Determinación de la carga de *Lemna Minor* y *Eichhornia Crassipes*

Las cantidades de biomasa fresca se han definido como COP_L y COP_E , con las que se pudo trabajar en condiciones específicas, tratando de que exista un equilibrio entre la capacidad de remoción de contaminantes y las cosechas en un área determinada por la especie.



Figura 4. 66: Sistemas por tandas, con *Lemna minor*, *Eichhornia crassipes* y sin planta acuática ubicadas en CITRAR (Año 2010)

A. Tasa de Crecimiento Superficial

Por el método del cálculo de la tasa de crecimiento superficial mencionado anteriormente, se obtuvieron resultados como se muestra en la Figura 4.67, en este caso las tasas para la Lenteja de Agua y para el Jacinto de Agua.

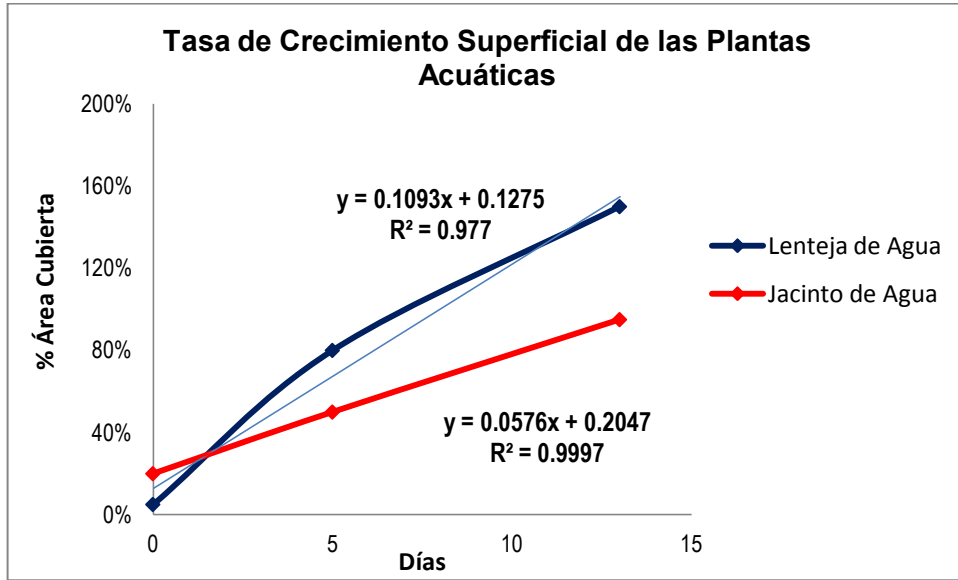


Figura 4. 67: Comportamiento del área ocupada por las plantas acuáticas versus los días (CITRAR- Año 2010)

Interpretación: La grafica muestra una tasa mayor para la Lenteja de agua, es decir esta planta acuática se proliferaría con mayor rapidez u ocuparía casi el doble que ocuparía el Jacinto de Agua.

Tabla 4. 13: Resumen del Cálculo de la Tasa Superficial (CITRAR- Año 2010)

Cálculo de la Tasa Superficial			
Parámetro	Unidad	Lemna	Jacinto
%Tasa Superficial	% Área/día	0.11	0.06
A=Área	cm ²	4988	3600
TS=Tasa Superficial	cm ² /día	545.19	207.36

Comentario: La tabla muestra en la primera columna los parámetros a calcular, en la segunda columna las unidades y en las dos últimas los resultados de las plantas acuáticas. La tasa Superficial **TS**, se obtiene de la multiplicación del %Tasa Superficial por el Área del depósito.

B. Producción De Biomasa

La producción de biomasa indica la cantidad de cosecha en los estanques de tratamiento y de esta manera se obtendrán las densidades.

Tabla 4. 14: Resumen del Cálculo de la Producción de la Biomasa (CITRAR- Año 2010)

Cálculo de la Producción de biomasa			
Parámetro	Unidad	Lemna	Jacinto
Pi=Peso inicial	g	600	300
Pf=Peso final	g	100	1,497
ΔP=Producción de biomasa	g	500	1,197

Comentario: La tabla muestra en la primera columna los parámetros y la diferencia de estos, en la segunda columna las unidades y en las dos últimas los resultados de las plantas acuáticas. La Producción de la biomasa **ΔP**, se obtiene de la diferencia de los pesos al final menos los pesos al inicio.

C. Densidad De Peso Húmedo Por Superficie

La Densidad de Peso Húmedo por Superficie indica la cantidad de planta acuática por cm² y por día de cultivo.

Tabla 4. 15: Resumen del Cálculo de la Densidad de Peso Húmedo por Superficie (CITRAR- Año 2010)

Cálculo de la Densidad de Peso Húmedo por Superficie			
Parámetros	Unidad	Lemna	Jacinto
ΔP=Producción de biomasa	g	500	1,197
TS=Tasa Superficial	cm ² /día	545.19	207.36
D=Densidad de Peso Húmedo	g/cm ² /día	0.92	5.77

Comentario: La tabla muestra en la primera columna los parámetros; en la segunda columna, las unidades y en las dos últimas los resultados de las plantas acuáticas.

D. Carga Operacional

La Carga Operacional indica la cantidad apropiada para la cosecha en los estanques de tratamiento y de esta manera se mantendrán densidades adecuadas.

Tabla 4. 16: Resumen del Cálculo de la Carga Operacional (CITRAR- Año 2010)

Cálculo de la Carga Operacional			
Parámetro	Unidades	Lemna	Jacinto
D=Densidad de Peso Húmedo	g/cm ² /día	0.92	5.77
A=Área	m ²	1	1
COP = D x A	Kg/día	0.092	0.577

Comentario: La tabla muestra en la primera columna los parámetros; en la segunda columna, las unidades y en las dos últimas los resultados de las plantas acuáticas. La Carga Operacional **COP**, se obtiene de la multiplicación del área por la Densidad de Peso Húmedo.

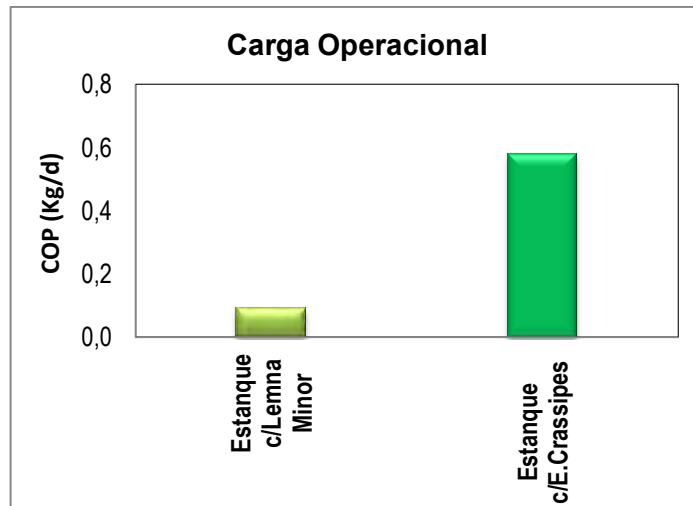


Figura 4. 68: Comportamiento de las Cargas Operacionales de ambas plantas acuáticas (CITRAR- Año 2010)

Interpretación: La grafica muestra una mayor tasa operacional para el Jacinto de Agua, es decir la cosecha en peso es seis veces la Lenteja de Agua en un área de 1 m². Esto implicaría en Operación y Manteniendo, un alto costo cultivando *Jacinto de Agua* que *Lemna Minor*.

E. Evapotranspiración en el Cultivo

Los resultados de la Evapotranspiración fueron en estanques: cubierto con *Lenteja de Agua*, cubierto con *Jacinto de Agua* y un estanque llamado Control (sin planta acuática). La evapotranspiración es la suma total de la cantidad de agua consumida por la planta acuática y la evaporación debido a la temperatura del agua (que fluctuó entre 31.6°C y 34.8°C), sin embargo se debe tener en cuenta que estos valores son relativos porque dependerán de factores climáticos temperatura, precipitaciones propias de la zona donde se ubique la Planta de tratamiento con *Lemna* o *Jacinto*.

Tabla 4. 17: Evapotranspiración en los acuarios con/sin las plantas acuáticas (CITRAR- Año 2010)

Evapotranspiración en los tres estanques				
Cálculos y Resultados	Unidad	Lemna	Jacinto	Sin planta
Evapotranspiración:	mm/d	6.29	7.50	7.29
Área del estanque:	m ²	0.50	0.36	0.36
Volumen consumido				
Volumen en el estanque inicial:	dm ³	46.14	122.40	126.00
Volumen consumido:	dm ³	21.95	37.80	36.72
Porcentaje consumido en el estanque:		48%	31%	29%

Por lo tanto como se indica en el cuadro anterior, el Jacinto de Agua altera este parámetro, ya que disminuyó a causa del crecimiento de esta planta acuática en la superficie del líquido, sin dejar fácilmente la salida del agua por evaporación al medio ambiente. Es decir el 2% de la altura de agua inicial fue debido al Jacinto de Agua, diferencia obtenida entre los estanques con Jacinto (31%) y el estanque Control (29%).

El porcentaje de la evapotranspiración es un valor importante en este experimento con el fin de determinar el nivel de agua de cualquier estanque de cultivo y así determinar un efectivo tiempo de retención. Del siguiente cuadro, la evapotranspiración en los estanques tiene un valor promedio de 7.02 mm/d representando un 36% de su altura inicial.

4.2.6.2. Sistema Continuo: Determinación de la Carga Operacional con *Lemna Minor*

Se indicará la cantidad de biomasa fresca definido como COP_L para el sistema de flujo continuo con el fin de determinar el periodo óptimo de cosecha de la *Lemna minor*, y para evaluar la capacidad máxima en cuanto a la remoción de nutrientes. Sin embargo en este experimento se presentaron complicaciones en medir la evaluación en la remoción de nutrientes debido al tiempo de retención al que se trabajo.

Conforme a lo citado anteriormente, la cosecha de la *Lemna Minor* se realizó en promedio cada 4 días dejando un área de cobertura del 90%, significando la máxima cantidad con la que se pueden realizar las labores de cosecha y depuración de forma adecuada para ambos estanques.

Se muestra además que en los primeros días de cultivo no hubo cosecha ya que no llegaba a ocupar el 100% del área del estanque, es decir la *Lemna Minor* estaba recientemente adecuándose al medio instalado necesitando 20 días aproximadamente después de ser colocada en los estanques.

Según Driever (2004), en un estudio realizado en Holanda sobre el efecto de la alta densidad poblacional de la *Lemna Minor*, la tasa de crecimiento, estudiado bajo una temperatura de 23°C en un medio con suficientes nutrientes, varía de acuerdo a su densidad. La biomasa fue de 180 gPS/m² para una tasa de crecimiento negativo. Con una densidad de 10 gPS/m², la tasa máxima de crecimiento fue de 0.3 d⁻¹. A bajas densidades (<9 gPS/m²) se observa que la tasa de crecimiento depende inversamente a la densidad.



Figura 4. 69: Estanques con *Lemna Minor* para los sistemas de “flujo continuo” (CITRAR- Año 2010)

A. Carga Operacional

La Carga Operacional indica la cantidad apropiada para la cosecha en los estanques de tratamiento y de esta manera se mantendrán densidades adecuadas.

Tabla 4. 18: Resultados para el Cálculo de la Carga Operacional (CITRAR- Año 2010)

Cosecha de la <i>Lemna Minor</i>					
Reactor I			Reactor II		
DA=Día de Cosecha	C=Cosecha (g)	COP _L =Tasa de Cosecha (g/d)	DA=Día de Cosecha	C=Cosecha (g)	COP _L =Tasa de Cosecha (g/d)
0	0		0	0	
20	93	4.65	20	147	7.35
31	71	6.45	23	100	33.33
36	436	87.20	30	160	22.86
41	121	24.20	35	126	25.20
44	421	140.33	41	223	37.17

Comentario: La tabla muestra resultados de los reactores en el Sistema Continuo. Tanto para el cuadro del Reactor I como del Reactor II; en la 1ra columna se detalla el número del día en que se cosechó Lenteja de Agua en el tiempo que duró el experimento; la 2da columna muestra la cantidad de planta acuática extraída para evitar que el sistema esté en condiciones anaerobias; y la 3ra columna muestra la tasa de cosecha o el COP_L, que representa la cantidad de *Lemna* que se extrajo con respecto al tiempo entre cosechas. Este resultado en comparación al Sistema Por Tandas, se obtiene al principio por ser un sistema de mayor análisis y con valores variables de sus parámetros en el cultivo de la *Lemna Minor*. A continuación de mostrará para mayor entendimiento la formula de obtención de la COP_L:

$$COP_L = \frac{\text{Cantidad de Cosecha}}{\text{Día en que se cosechó} - \text{Día de la última Cosecha}}$$

El primer valor de COP_L, se obtuvo en los primeros 20 días siendo un resultado de adaptación de la *Lemna* en el efluente de la Laguna Terciaria de CITRAR. A partir de este día la cosecha se desarrolló con mayor rapidez. El último valor de COP_L representa el resultado obtenido de la cantidad total de *Lemna* presente en el acuario al final del experimento.

Estos resultados dependieron del operador, es decir el día de cosecha y la cantidad de *Lemna* en cada cosecha se obtuvo bajo el criterio de evitar que el Sistema entre a condiciones extremas de eutrofización.

Cabe mencionar que el Reactor 1 se encuentra ubicado a la entrada del Sistema Continuo, es decir la *Lemna* recibe son los primeros en recibir mayor cantidad de nutrientes que el segundo reactor, y además la apariencia de la planta es muy buena manteniéndose más consistente y un color verde más oscuro.

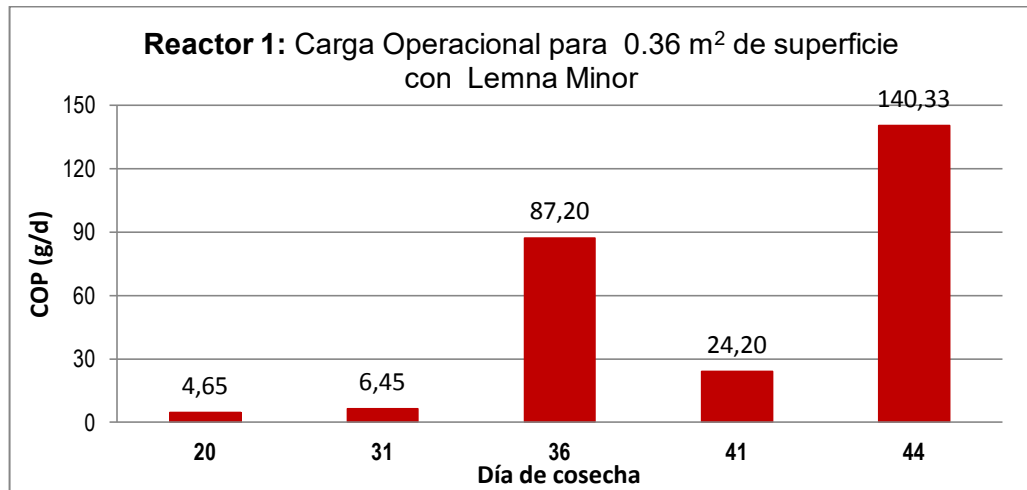


Figura 4. 70: Tasa de Cosecha de la Lemna Minor en el 1er Reactor del Sistema Continuo (CITRAR- Año 2010)

Interpretación: La figura muestra el comportamiento de COP_L para el 1er reactor con respecto al día de Cosecha, en la cual se observa que las tasas varían enormemente lo que significaría una dificultad en la operación diaria de una laguna cubierta con Lemna para la remoción de nutrientes en el tratamiento de aguas residuales.

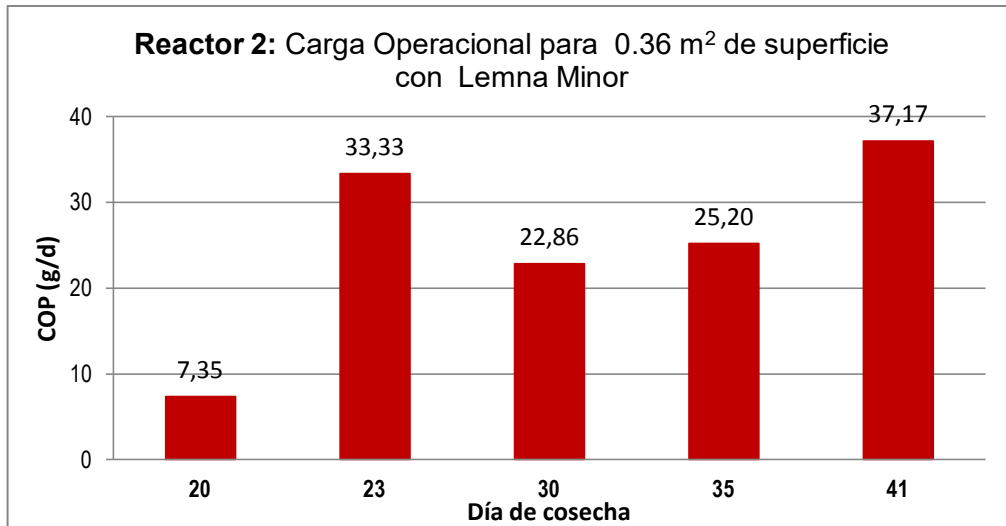


Figura 4. 71: Tasa de Cosecha de la Lemna Minor en el 2do Reactor del Sistema Continuo (CITRAR- Año 2010)

Interpretación: Al igual que el reactor 1, la figura muestra el comportamiento de COP_L para el 2do reactor con respecto al día de Cosecha, en la cual se observa que las tasas difieren menos, significando un mejor manejo diario de esta planta acuática. Sin embargo la *Lemna Minor* se muestra más débil que en el Reactor 2 en presencia de bajas concentraciones de nutrientes. El promedio de las COP_L en los días 23, 30 y 35 es de 27.13 g/d como se observa en la Figura 4.71.

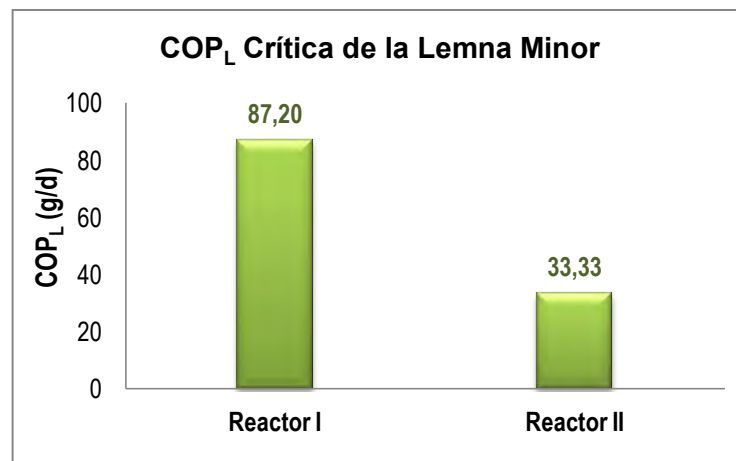


Figura 4. 72: Comportamiento de las Cargas Operacionales Crítica de la Lemna Minor fresca (CITRAR- Año 2010)

Interpretación: La grafica muestra las tasas operacionales críticas o máximas de los reactores. Por lo tanto este resultado muestra la máxima cantidad de *Lemna* que se extrajo diariamente en cada acuario.

Estos valores provienen de los resultados de la Tabla 4.18 (pág. 179), en la 3ra columna.

Para el **1er reactor**, los COP_L presentaron diferencias marcadas (sin tomar en cuenta el último valor por no ser una operación continua), razón por el cual se tomó el máximo.

Para el **2do reactor**, se considero el valor máximo de los COP_L , cuyas diferencias no fueron significativas; este valor simbolizaría además una tasa crítica para la Operación y Mantenimiento.

De acuerdo a los resultados de Turbiedad, la cantidad de algas que ingresan en el 2do reactor es mucho menor al 1er reactor; evitando así competencias y favoreciendo al 2do reactor a tener mayor crecimiento; sin embargo las concentraciones de nutrientes en este último es mucho menor en comparación al 1er reactor.

Según la remoción de nutrientes en el reactor 1, existió una remoción del 67% en **Nitrógeno Amoniacal**, mientras que hasta el 2do reactor, la capacidad de depuración se completó al 100%. Lo cual significa que la *Lemna Minor* puede sobrevivir a concentraciones menores a 1.5 mg/L absorbiendo todo este nutriente como se mostró en los resultados fisicoquímicos del 2do Reactor.

Según la remoción de nutrientes en el reactor 1, existió una remoción del 46% en **Fósforo Total**, mientras que hasta el 2do reactor, la capacidad de depuración fue nula. Lo cual significa que el crecimiento de la *Lemna Minor* no depende de este nutriente para sobrevivir a bajas concentraciones de 2.1 mg/L como se mostró en los resultados fisicoquímicos del 2do Reactor.

Siendo la diferencia entre COP_L -1er reactor y el COP_L -2do reactor en 53.87 g/d (62% del COP_L del 1er reactor); es decir la proporción de COP_L -1er reactor: COP_L -2do reactor es de 13:5. Este resultado nos indica que la cosecha se operaría con más facilidad en el 2do Reactor.

Si hablamos de lagunas de tratamiento utilizando Lemna, el primer contacto en una laguna cubierto con esta planta acuática significaría un costo mayor obteniendo una mayor eficiencia en el tratamiento de nutrientes. Por lo tanto estos resultados nos dan a entender que si deseáramos adaptar una laguna para el tratamiento de aguas residuales conviene tener altas concentraciones de nutrientes.

B. Rendimiento de la Biomasa

El rendimiento máximo de biomasa indica la cantidad apropiada para la cosecha en los estanques de tratamiento y de esta manera se mantendrán las densidades adecuadas, disminuyendo la competencia entre individuos de la misma especie por nutrientes, espacio y luz. Según Driever (2004), la tasa de crecimiento decrece con el incremento de la densidad.

Se podría afirmar que para un mayor crecimiento y reproducción de la “Lenteja de Agua”, necesita de un medio sin interferencias representativas y de otros factores externos.

Según Monette (2006), el máximo crecimiento de biomasa fue de 88 g PS/m² (1470 g PF/m²) con una densidad inicial optima de 45 g PS/m² (750 g PF/m²). La relativa desviación de las tasas de remoción global para densidades entre 23 y 45 g PS/m² son; 13% para N y 7% para P. Mientras que para una densidad límite obtenido experimentalmente de 177 g PS/m², el contenido de N y P fueron constantes en 39.8 mg-N/g PS (3.98%) y 10.4 mg-P/g PS (1.04%). La tasa de crecimiento de la *Lemna Minor* no depende de las concentraciones de N y P siempre que no excedan de 4.0 mg-N/L y 0.74 mg-P/L respectivamente.

A continuación se mostrará la Biomasa producida por la *Lemna Minor* en cada Reactor del Sistema Continuo.

Tabla 4. 19: Resumen del Cálculo de la Producción de la Biomasa (CITRAR- Año 2010)

Biomasa de la Lemna Minor			
Reactor I (44 días)		Reactor II (44 días)	
B=Biomasa Acumulada (g)	B/Ba	B=Biomasa Acumulada (g)	B/Ba
B ₀ =80	-	80	-
173	2.16	227	2.84
244	1.41	327	1.44
680	2.79	487	1.49
801	1.18	613	1.26
1222	1.53	836	1.36

Comentario: La Tabla muestra en la **primera columna** de cada Reactor, los resultados de la Biomasa acumulada que se produce durante los 44 días. Es decir “B” se obtiene de la suma del peso inicial (80 g) con la sumatoria de los pesos de las cosechas anteriores. A continuación se muestra la fórmula de este

cálculo para mayor entendimiento:

$$\text{Biomasa Acumulada}(n) = \text{Biomasa Inicial} + \sum_{n=1}^5 (\text{Biomasa Cosechada})$$

Donde **n** representa las veces de cosecha de la Lenteja de Agua. Los datos de la Biomasa Cosechada se observa en el Anexo 2.

En la **segunda columna** se muestra la relación entre la Biomasa Acumulada con la Biomasa Acumulada anterior. Estos resultados muestran la manera como se llevo a cabo las cosechas con respecto al peso de Lemna presente en cada acuario. La siguiente formula muestra la relación B/Ba:

$$\text{Relación de Biomasa Acumulada (B/Ba)} = \frac{\text{Biomasa Acumulada}}{\text{Biomasa Acumulada anterior}}$$

Los resultados obtenidos mediante esta fórmula para el 1er reactor fluctúan de 1.18 a 2.79, mientras que para el 2do Reactor varió en un rango de 1.26 a 2.84. Se puede afirmar que los rangos entre los reactores son casi similares, es decir cada cosecha se realiza cuando la producción acumulada en peso sea casi el doble (1.81 y 1.68 como promedio en los reactores 1 y 2 respectivamente) del peso acumulado anterior en ambos reactores.

El objetivo de estos resultados es obtener una adecuada cosecha (Operación y Mantenimiento) de la *Lemna Minor* cada 4 días (resultado obtenido como promedio entre cosechas en esta investigación), utilizando la relación obtenida en esta investigación mediante la cantidad de biomasa acumulada.

Por lo tanto un objetivo específico sería que el promedio de B/Ba sea lo más cercano posible a los resultados de la segunda columna mostrada en la Tabla, a pesar de que esta planta acuática tenga diferentes comportamientos en cada instante de su cultivo.

C. Producción de Biomasa

La producción de biomasa indica la cantidad de cosecha en los estanques de tratamiento y de esta manera se obtendrán las densidades de los pesos húmedos por superficie.

Tabla 4. 20: Resumen del Cálculo de la Producción de la Biomasa de la Lemna Minor (CITRAR- Año 2010)

Cálculo de la Producción de biomasa de la Lemna			
Parámetro	Unidad	Reactor I	Reactor II
Pi=Peso inicial	g	80	80
Pf=Peso final	g	1222	836
ΔP=Producción de biomasa	g	1142	756
Promedio ΔP	g	949	

Comentario: La tabla muestra en la primera columna los parámetros y la diferencia de estos, en la segunda columna las unidades y en las dos últimas los resultados de las plantas acuáticas. La Producción de la biomasa **ΔP**, se obtiene de la diferencia de los pesos al final menos los pesos al inicio. El crecimiento en biomasa de *Lemna M.* fue analizado por un periodo de 44 días en ambos reactores.

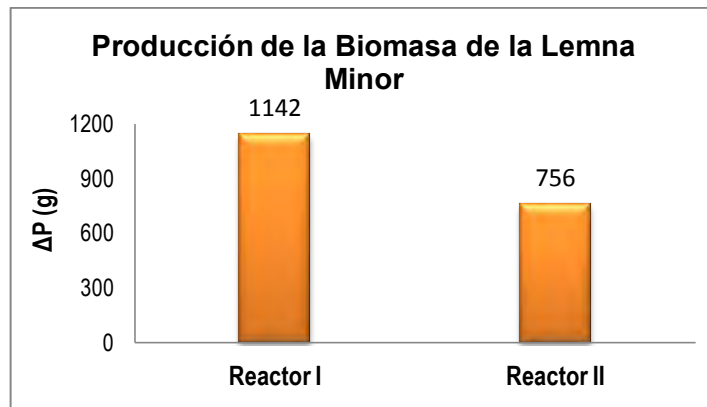


Figura 4. 73: Comportamiento de la Biomasa de la Lemna Minor fresca en los 44 días (CITRAR- Año 2010)

Interpretación: La grafica muestra una mayor producción de la Lenteja de Agua cultivado en el 1er Reactor. Lo que significa 1.5 veces la producción en el 2do Reactor, a pesar de la alta presencia de algas que ingresan en este último en comparación al 1er reactor.

Nuevamente este resultado nos indica que la cosecha se operaría con mayor facilidad en el 2do Reactor. Si hablamos de lagunas de tratamiento utilizando Lemna, el primer contacto en una laguna cubierto con esta planta acuática significaría un mayor costo sin embargo se obtendría una mayor eficiencia en el tratamiento de nutrientes.

D. Densidad de Peso Húmedo por Superficie

Procedimiento:

COP: Carga Operacional Crítica (60.27 g/d en promedio)

Área: Área superficial del reactor =0.36 m²

A: Porcentaje de área que ocupaba la planta cosechada en el reactor aproximadamente (50%)

Cálculo del Reactor 1:

$$D = \frac{COP \times T}{A} = \frac{87.20 \frac{g}{d} \times 4días}{0.18 m^2} = 1.94 \frac{Kg}{m^2}$$

Cálculo del Reactor 2:

$$D = \frac{COP \times T}{A} = \frac{33.33 \frac{g}{d} \times 4días}{0.18 m^2} = 0.74 \frac{Kg}{m^2}$$

Tabla 4. 21: Resumen del Cálculo de la Densidad de Peso Húmedo por Superficie de la Lemna Minor (CITRAR- Año 2010)

Cálculo de la Densidad de Peso Húmedo por Superficie			
Parámetro	Unidad	Reactor I	Reactor II
COP _L	g/d	87.20	33.33
A=50%Área	m ²	0.18	0.18
T=Tiempo entre cosechas	d	4	4
D=Densidad de Peso Húmedo (COP x T / A)	g/m ²	1,937.78	740.74
D=Densidad de Peso Húmedo	Kg/m ²	1.94	0.74
Promedio D	Kg/m ²	1.34	

Comentario: La tabla muestra en la primera columna los parámetros; en la segunda columna, las unidades y en las dos últimas los resultados de los reactores cubiertos con *Lemna Minor*. La Densidad de Peso Húmedo **D**, se obtiene de la división de la COP_L crítica entre el área.

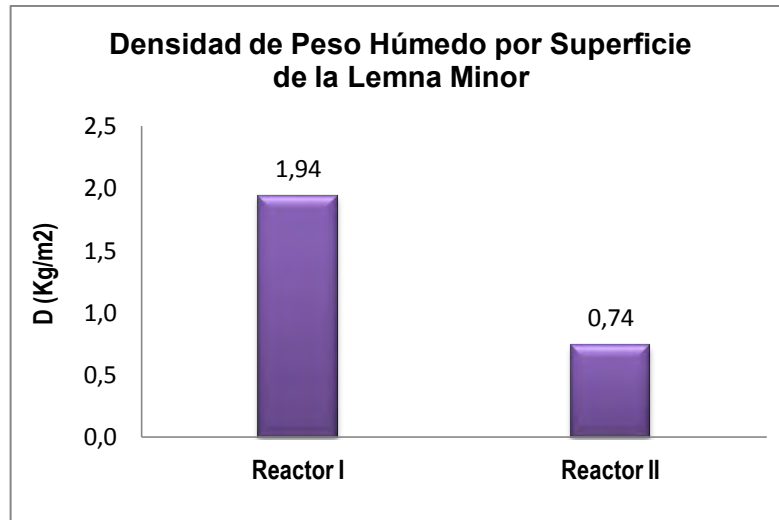


Figura 4. 74: Comportamiento de la Densidad de Peso Húmedo por Superficie de la Lemna Minor (CITRAR- Año 2010)

Interpretación: Como se observa en la Fig. 4.74 la Densidad en peso por superficie en el 1er Reactor llegó a 1.94 Kg/m² mientras que el 2do Reactor mostro una densidad de 0.74 Kg/m².

E. Tasa de Crecimiento Superficial

Procedimiento:

D: Densidad de Peso Húmedo por superficie.

TP: Tasa de Producción diaria.

TS: Tasa de Crecimiento Superficial.

Cálculo del Reactor 1:

$$TP = \frac{1,142 \text{ g}}{44 \text{ días}}$$
$$TS = \frac{25.95 \text{ g/d}}{1,937.78 \text{ g/m}^2} = 133.94 \text{ cm}^2/\text{d}$$

Cálculo del Reactor 2:

$$TP = \frac{756 \text{ g}}{44 \text{ días}}$$
$$TS = \frac{17.18 \text{ g/d}}{740.74 \text{ g/m}^2} = 231.95 \text{ cm}^2/\text{d}$$

Tabla 4. 22: Resumen del Cálculo de la Tasa Superficial (CITRAR- Año 2010)

Cálculo de la Tasa Superficial de la Lemna Minor			
Parámetro	Unidad	Reactor I	Reactor II
TP=Producción de biomasa	g/d	25.95	17.18
D=Densidad de Peso Húmedo	g/m ²	1937.78	740.74
TS=Tasa Superficial (TP/D)	cm ² /d	133.94	231.95
Promedio TS	cm ² /d	182.95	

Comentario: La tabla muestra en la primera columna los parámetros a calcular, en la segunda columna las unidades y en las dos últimas los resultados de las plantas acuáticas.

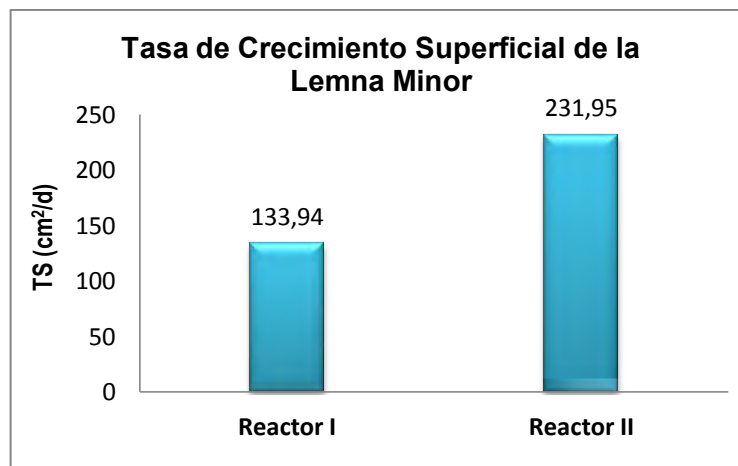


Figura 4. 75: Comportamiento del área ocupada por las plantas acuáticas versus los días (CITRAR- Año 2010)

Interpretación: La grafica muestra las tasas de crecimiento crítica o máximas de los reactores. Por lo tanto este resultado muestra la máxima cantidad de Lemna que se extiende diariamente en cada acuario.

Se demuestra que la *Lemna Minor* cultivada en el 2do Reactor se proliferaría con mayor rapidez que en el 1er Reactor en 98.01 cm² más por día. Es decir la proporción TS-2do reactor: TS-1er reactor fue de 17:10.

Según Madueño (2009), existen dos tipos de reproducción de la Lemna: sexual y asexual (vegetativa). La reproducción asexual o clonada se da cuando el medio acuático tiene altos contenidos de nutrientes donde la tasa de crecimiento superficial es mayor (con tamaño de los bulbos de 2 mm). Mientras que la reproducción sexual se lleva a cabo en medios con poco contenido de nutrientes a una menor tasa de crecimiento superficial (tamaño de los bulbos de 5 mm).



Figura 4. 76: Característica morfológica de la *Lemna Minor* en ambos reactores del sistema continuo (CITRAR- Año 2010)

En estos reactores se observa que no existió una clara diferencia con respecto al tamaño de los bulbos de la *Lemna Minor*. Estos fluctuaron de 4 a 5 mm en ambos reactores. Sin embargo en el 1er reactor, el color de esta planta acuática tuvo un aspecto más verdoso que en el 2do reactor.

Es decir a esta baja concentración de nutrientes, el tamaño de los bulbos es relativamente grande y constante; pero una diferencia es el aspecto físico de la *Lemna*, lo cual nos ayudará a percibir mejor como varía a estas bajas concentraciones de nutrientes del medio acuático donde se cultivan.

F. Valores promedios de peso alcanzado por *Lemna m.*

El aporte en biomasa fresca llegó a un valor promedio de 1.34 Kg/m² y la producción a un valor promedio de 13 veces su peso inicial en 44 días; promedios considerando de los dos estanques y según las observaciones de campo.

Tabla 4. 23: Resumen de los resultados obtenidos para la obtención del COP con *Lemna Minor* (CITRAR- Año 2010)

Resultados Promedios de la <i>Lemna Minor</i>		
Parámetro	Unidad	Lemna M.
COP_L	g/d	60.27
ΔP=Producción de biomasa	g	949.00
D=Densidad de Peso Húmedo	Kg/m ²	1.34
TS=Tasa Superficial	cm ² /d	182.95

COMENTARIO: La tabla muestra en la primera columna los parámetros; en la segunda columna, las unidades y en la tercera los valores promedios de la

Carga Operacional del Jacinto de Agua, la Producción de la biomasa, la Densidad de Peso Húmedo Superficial y la Tasa Superficial.

4.2.6.3. Sistema Continuo: Determinación de la carga Operacional con *Eichhornia Crassipes*

Se indicará la cantidad de biomasa fresca definido como COP_E en g/d para el sistema de flujo continuo con el fin de determinar el periodo óptimo de cosecha de la *Eichhornia crassipes*, y para evaluar la capacidad máxima en cuanto a la remoción de nutrientes. Sin embargo en este experimento se presentaron complicaciones en medir la evaluación en la remoción de nutrientes debido al tiempo de retención al que se trabajó.



Figura 4. 77: Estanques con *Eichhornia crassipes* para los sistemas de “flujo continuo” (CITRAR- Año 2010)

A. Tasa de Crecimiento Superficial

Por el método del cálculo de la tasa de crecimiento superficial mencionado anteriormente, se obtuvieron resultados como se muestra en la Figura 4.78, en este caso las tasa para el Jacinto de Agua.

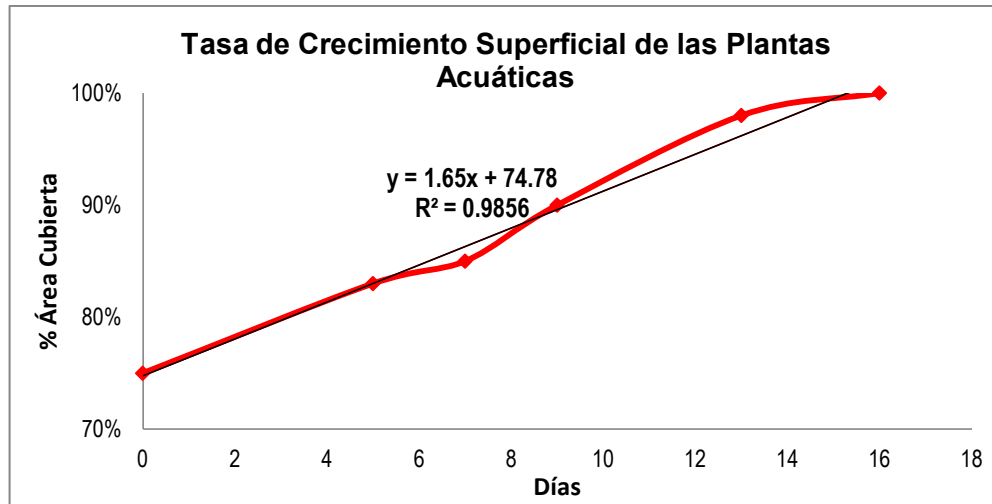


Figura 4. 78: Comportamiento del área ocupada por las plantas acuáticas versus los días (CITRAR- Año 2010)

Interpretación: La grafica muestra la curva del porcentaje del área cubierto con Jacinto de Agua en el acuario con respecto al tiempo, mostrando además una tasa de 1.7% del área total por día.

Tabla 4. 24: Resumen del Cálculo de la Tasa Superficial (CITRAR- Año 2010)

Cálculo de la Tasa Superficial del Jacinto de Agua			
Parámetro	Unidad	Reactor I	Reactor II
%Tasa Superficial	% Área/d	1.65%	1.65%
A=Área	cm ²	3600	3600
TS=Tasa Superficial	cm ² /d	59.40	59.40

Comentario: La tabla muestra en la primera columna los parámetros a calcular, en la segunda columna las unidades y en las dos últimas los resultados de las plantas acuáticas. La tasa Superficial **TS**, se obtiene de la multiplicación del %Tasa Superficial por el Área del depósito.

B. Rendimiento de Biomasa

El rendimiento máximo de biomasa indica la cantidad apropiada para la cosecha en los estanques de tratamiento y de esta manera se mantendrán las densidades adecuadas, disminuyendo la competencia entre individuos de la misma especie por nutrientes, espacio y luz.

La producción de biomasa indica la cantidad de cosecha en los estanques de tratamiento y de esta manera se obtendrán las densidades.

La tasa de cosecha en peso (**con humedad**) solo se evaluó para una sola

cosecha en ambos estanques en un periodo de cultivo de 12 días.

Tabla 4. 25: Resumen del Cálculo de la Producción de la Biomasa (CITRAR- Año 2010)

Cálculo de la Producción de biomasa del Jacinto de Agua			
Peso	Unidad	Jacinto	
		Reactor I	Reactor II
Pi=Peso inicial	g	471	470
Pf=Peso final	g	1289	991
ΔP=Producción de biomasa	g	818	521
Promedio ΔP	g	669.50	

Comentario: La tabla muestra en la primera columna los pesos de la biomasa y la diferencia de estos, en la segunda columna las unidades y en las dos últimas los resultados de las plantas acuáticas. La Producción de la biomasa ΔP , se obtiene de la diferencia de los pesos al final menos los pesos al inicio.

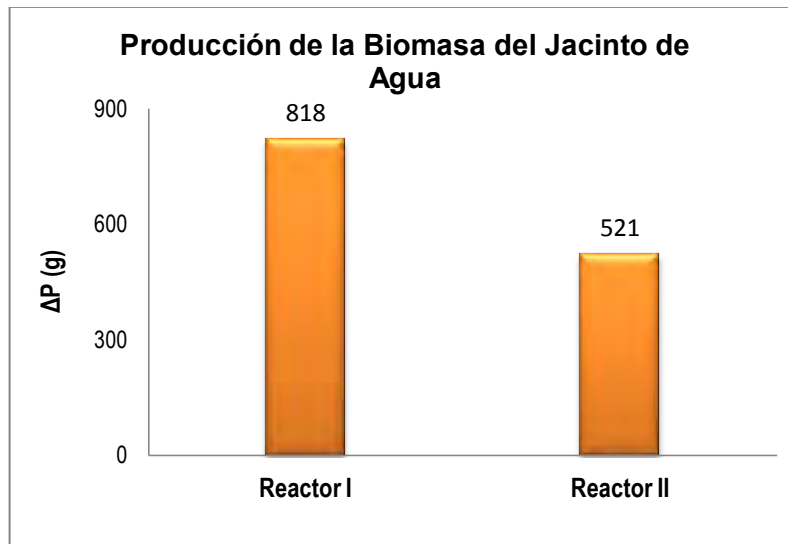


Figura 4. 79: Comportamiento de la Biomasa del Jacinto de Agua fresca en los 12 días (CITRAR- Año 2010)

Interpretación: La grafica muestra una mayor producción de la Lenteja de Agua cultivado en el 1er Reactor.

Conforme a lo citado anteriormente, en 12 días la *Eichhornia crassipes* llegó a alcanzar niveles de crecimiento que casi triplican su peso (2.42 como valor promedio) y un área de cobertura que llega al 100%, significando la máxima cantidad con la que se pueden realizar las labores de cosecha y depuración de forma adecuada para ambos estanques.

Se muestra además que en la primera semana de cultivo no hubo cosecha ya

que no llegaba a ocupar el 100% del área del estanque, es decir la *Eichhornia crassipes* estaba recientemente adecuándose al medio instalado necesitando 12 días aproximadamente después de ser colocada en los estanques.

C. Densidad de Peso Húmedo por Superficie

El tiempo de cultivo en **verano** (entre la colocación y la única cosecha de la *Eichhornia crassipes*) se determinó para 12 días.

Procedimiento:

TP: Tasa de producción diaria

TS: Tasa de Crecimiento Superficial

D: Densidad de peso húmedo por superficie

Cálculo del Reactor 1:

$$TP = \frac{818 \text{ g}}{12 \text{ días}}$$

$$D = \frac{TP}{TS} = \frac{68.17 \text{ g/d}}{59.40 \text{ cm}^2/\text{d}} = 1.15 \frac{\text{g}}{\text{cm}^2}$$

Cálculo del Reactor 2:

$$TP = \frac{521 \text{ g}}{12 \text{ días}}$$

$$D = \frac{TP}{TS} = \frac{43.42 \text{ g/d}}{59.40 \text{ cm}^2/\text{d}} = 0.73 \frac{\text{g}}{\text{cm}^2}$$

Tabla 4. 26: Resumen del Cálculo de la Densidad de Peso Húmedo por Superficie (CITRAR- Año 2010)

Cálculo de la Densidad de Peso Húmedo por Superficie del <i>Jacinto de Agua</i>			
Parámetro	Unidad	Reactor I	Reactor II
TP=Tasa de producción diaria en biomasa	g/d	68.17	43.42
TS=Tasa de Crecimiento Superficial	cm ² /d	59.40	59.40
D=Densidad de Peso Húmedo (TP/TS)	g/cm ²	1.15	0.73
Promedio D	g/cm ²	0.94	

Comentario: La tabla muestra en la primera columna los parámetros; en la segunda columna, las unidades y en las dos últimas los resultados de las plantas acuáticas.

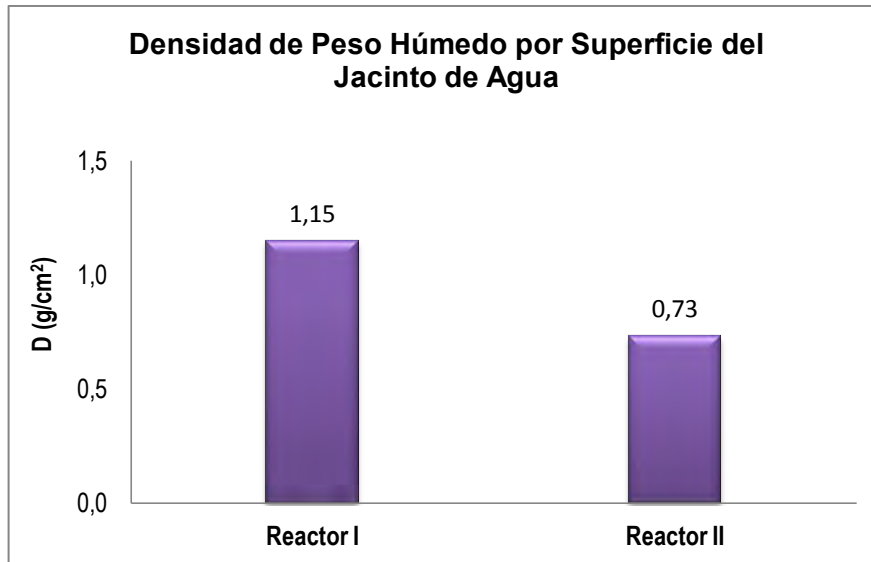


Figura 4. 80: Comportamiento de la Densidad de Peso Húmedo por Superficie del Jacinto de Agua (CITRAR- Año 2010)

Interpretación: En la época de **verano** y como se observa en la Tabla. 4.26, el crecimiento fue un poco más acelerado en el Reactor 1 de 1.15 g/m² en relación al segundo Reactor de 0.73 g/cm². En promedio se obtuvo 0.94 g/cm², es decir 9.4 Kg ocupa un área de 1m².

D. Carga Operacional

Procedimiento:

D: Densidad de peso húmedo por superficie.

A: Porcentaje de área que ocupaba la planta cosechada en el reactor aproximadamente (25%)

Área superficial del reactor =0.36 m²

T: Tiempo entre cosecha y cosecha.

COP: Carga Operacional

Cálculo del Reactor 1:

$$D = \frac{1.15 \text{ g/cm}^2 \times 0.09 \text{ m}^2}{12 \text{ días}} = 86.07 \frac{\text{g}}{\text{d}}$$

Cálculo del Reactor 2:

$$D = \frac{0.73 \text{ g/cm}^2 \times 0.09 \text{ m}^2}{12 \text{ días}} = 54.82 \frac{\text{g}}{\text{d}}$$

Tabla 4. 27: Resumen del Cálculo de la Carga Operacional

Cálculo de la Carga Operacional del <i>Jacinto de Agua</i>			
Parámetro	Unidad	Reactor I	Reactor II
D=Densidad de Peso Húmedo	g/cm ²	1.15	0.73
A=25%Área	m ²	0.09	0.09
T=Tiempo entre cosechas	d	12	12
COP = (D x A) / T	g/d	86.07	54.82
Promedio COP	g/d	70.44	

Comentario: La tabla muestra en la primera columna los parámetros; en la segunda columna, las unidades y en las dos últimas los resultados de las plantas acuáticas.

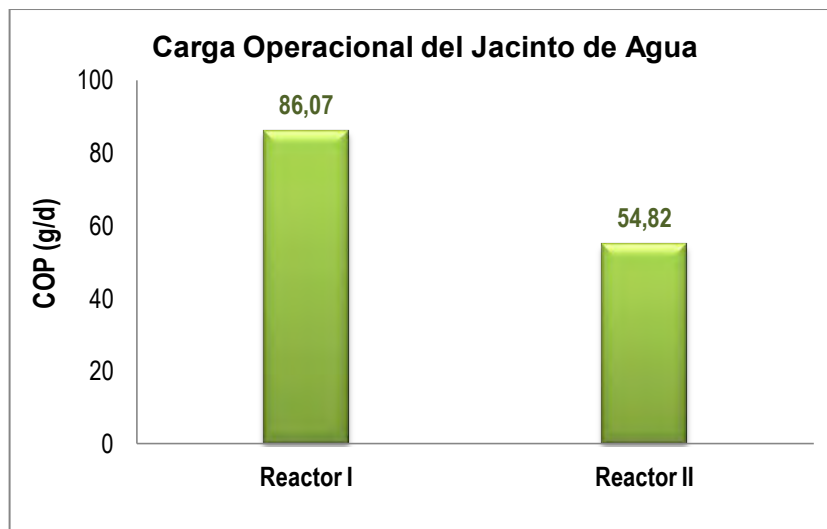


Figura 4. 81: Comportamiento de cosecha diaria de *Eichhornia Crassipes* (CITRAR- Año 2010)

Interpretación: Las gráficas muestran tasas de la *Eichhornia crassipes* haciendo posible determinar la mayor eficiencia de cosecha por día en los dos reactores. La grafica muestra una tasa operacional mayor en el 1er Reactor, es decir la cosecha en peso es casi el doble en el 1er Reactor en un área de 0.36 m²; es decir tendríamos que cosechar casi dos veces más en peso en el reactor 2 que en el reactor 1.

Se podría afirmar que el “Jacinto de agua” en estado fresco, para su mayor crecimiento y reproducción necesita de un medio y otros factores externos sin interferencias representativas, por lo que en el estanque 1 hubo considerables concentraciones de nutrientes, mostrando un crecimiento más acelerado que en

el otro estanque.

E. Valores promedios por *Eichhornia Crassipes*

El aporte en biomasa fresca llegó a un valor promedio de 59.40 cm²/d y la producción a un valor promedio de 3 veces su peso inicial en 12 días, promedios considerando de los dos estanques y según las observaciones de campo, la especie presentó buenas condiciones sin competencias ni plantas muertas.

Tabla 4. 28: Resumen de los resultados obtenidos para la obtención del COP (CITRAR- Año 2010)

Cálculo y Resultados para el Jacinto de Agua		
Parámetro	Unidad	Jacinto
TS=Tasa Superficial	cm ² /d	59.40
ΔP=Producción de biomasa	g	669.50
D =Densidad de peso húmedo	g/cm ²	0.94
COP_J	g/d	70.44

Comentario: La tabla muestra en la primera columna los parámetros; en la segunda columna, las unidades y en la tercera los valores promedios de la Tasa Superficial, Producción de la biomasa en los 12 días, la Densidad de Peso Húmedo y la Carga Operacional del Jacinto de Agua.

4.2.7. Estudio de la Capacidad de Remoción en el Sistema por Tandas

En esta parte del estudio, se compararán los comportamientos y sus capacidades de remoción de las dos plantas acuáticas, la Lenteja de Agua y Jacinto de Agua. La capacidad de remoción de cada especie se puede analizar en base de gráficas comparativas.

Tabla 4. 29: Resumen de los experimentos a comparar entre las dos plantas acuáticas (CITRAR- Año 2010)

Sistema por Tandas	Planta Acuática
Parámetros Fisicoquímicos (1ra Comparación)	<i>Lemna Minor</i>
	<i>Eichhornia crassipes</i>
Parámetros en Biomasa (2da Comparación)	<i>Lemna Minor</i>
	<i>Eichhornia crassipes</i>

Comentario: Para fines de entendimiento en esta investigación se muestra la Tabla 4.29, donde en este sistema por Tandas se limitará a analizar los

comportamientos de ambas plantas acuáticas según los parámetros fisicoquímicos y con respecto a su biomasa.

4.2.7.1. Análisis Comparativo de Parámetros Fisicoquímicos

A. Parámetro Ph Y Temperatura

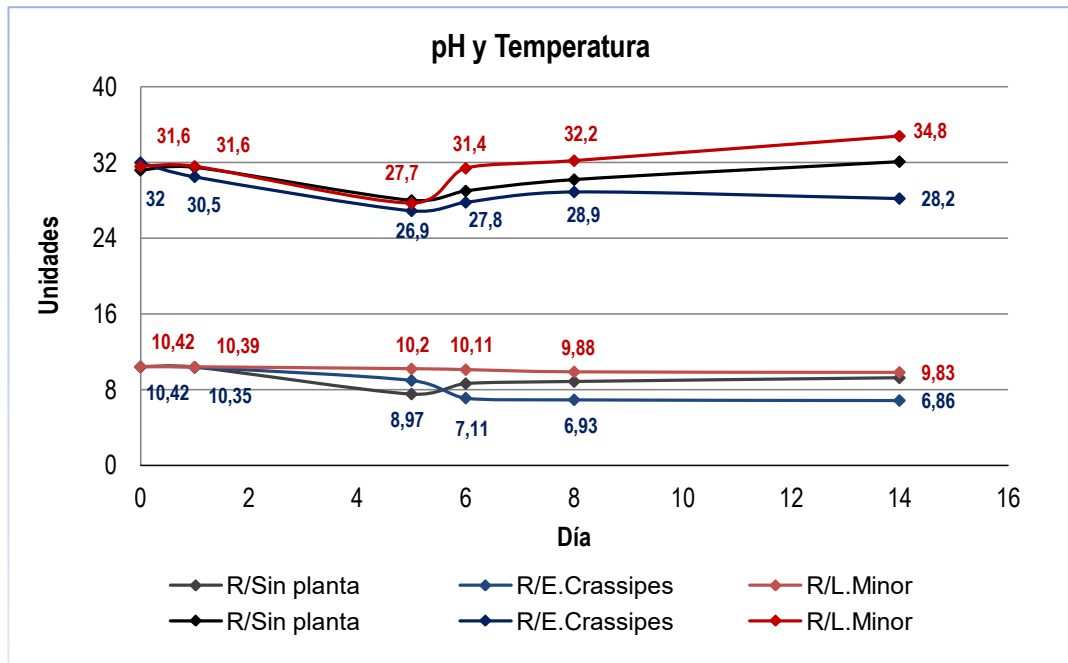


Figura 4. 82: Comportamiento de pH y temperatura en los tres estanques (CITRAR- Año 2010)

Interpretación: Esta grafica muestra los parámetros de Temperatura y pH con respecto al avance diario de cada reactor.

La utilización de plástico adherido y metal en el reactor hace que la **Temperatura** aumente en un 2.7°C más que en un reactor de vidrio.

Las plantas acuáticas no afectan en mayor proporción a la variación de la temperatura del medio en que se cultivan; sin embargo las hojas gruesas y anchas del Jacinto de Agua actúan como sombras a la superficie del agua, disminuyendo la temperatura hasta en un 3.9°C.

Ambas plantas flotantes se encuentran en un rango apropiado para su crecimiento por ser tolerantes a este parámetro.

La **Temperatura** en el cultivo de la Lemna se encuentra entre un rango óptimo y máximo ($\geq 32^{\circ}\text{C}$) donde se logra un eficiente crecimiento de Lemna, llevado a cabo entre los meses de febrero y marzo. Sin embargo para Docauer (1983), la temperatura en este experimento con *Lemna Minor* es 4°C más que la

temperatura óptima.

El comportamiento del **pH** y la **Temperatura** se asemejan sólo en el reactor "Control"; mientras que en los reactores cubiertos con plantas acuáticas, a medida que aumenta o disminuye la temperatura, el pH siempre disminuye.

Para los casos con plantas acuáticas, el valor del **pH** tuvo un valor inicial de 10.4 que va disminuyendo en el tiempo; cubierto con *Jacinto de Agua* llegó hasta 6.86 y con *Lemna Minor* descendió hasta 9.83.

Se observó además que comparando con el reactor "Control"; el descenso del **pH** es más rápido cubierto con Jacinto, llegando a 2.39 menos. Mediante una ecuación lineal se obtuvo que por cada día este parámetro disminuyera en 0.29. Mientras que el descenso de este parámetro es más lento con la Lemna, es decir por cada día el valor de pH disminuye en 0.05.

Cabe deducir que el Jacinto de Agua llega a estabilizar el **pH** en menos tiempo que la Lemna, conforme a las tasas anteriores se definió que se necesita 6 días cultivando con Lemna para llegar al mismo valor cultivando con Jacinto.

De acuerdo a este experimento, la *Lemna Minor* tuvo que adaptarse a un alto valor de pH (>10) y a sus variaciones.

Por otra parte, el medio acuático cubierto con Jacinto de Agua alcanzó un pH neutro aproximadamente, es decir es posible que los carbonatos hayan disminuido, fuente importantísima de CO₂ para las plantas.

A un pH de 10.4, los elementos como el fosfato de calcio, el hierro, el zinc, el manganeso, son menos solubles; afectando negativamente al crecimiento de la lenteja de agua. Además con respecto a la especie química ion amoniaco-amonio, la concentración de nitrógeno de amoniaco no ionizado es mayor que el amonio que representa la forma toxica del compuesto.

La Lemna se encontró dentro de un amplio rango de pH (3 a 10) donde pueden adaptarse a condiciones extremas en el agua. Sin embargo existen valores óptimos de supervivencia para *Lemna Minor* como 6 y con un pH 7 se presentan las mejores tasas de crecimiento cuando la fuente de nitrógeno es el ion amonio o el ion nitrato. Este valor óptimo no se encontró en este experimento, es decir se necesitaría más de un mes para que el pH llegue a 7.

B. Parámetro Turbiedad

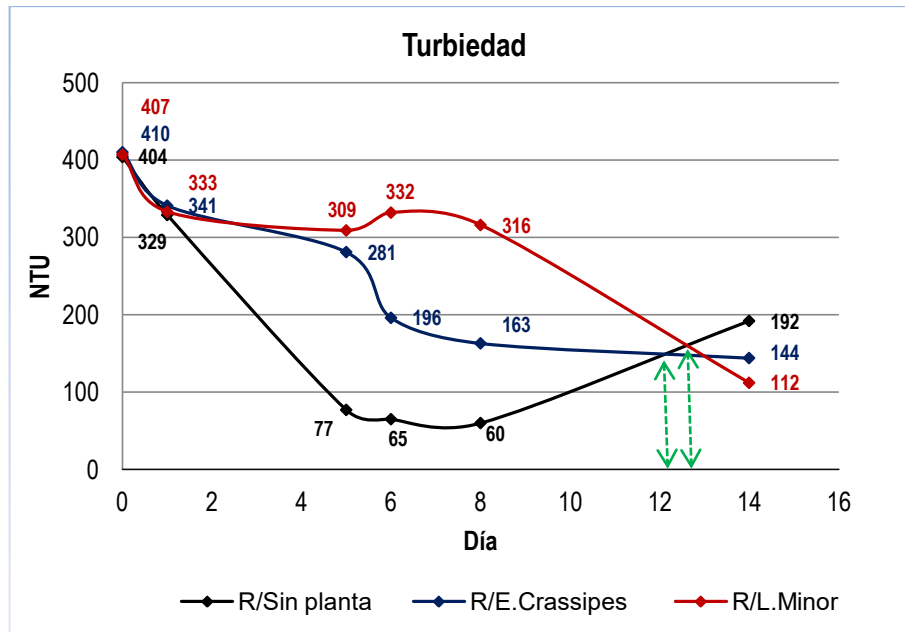


Figura 4. 83: Comportamiento de la Turbiedad en los tres estanques (CITRAR- Año 2010)

Interpretación: Se aprecia las curvas del parámetro de la Turbiedad con respecto a los días de cultivo de cada reactor.

La turbiedad hasta el 5to día en reactores con **plantas acuáticas** tiene un comportamiento similar; mientras que en el reactor "Control" la turbiedad disminuye con gran rapidez. En estos días se puede obtener un valor promedio inicial de 409 μ s y un valor promedio final de 295 μ s, que representa una remoción de 27.87%, que significa un descenso de la concentración de materia suspendida que interfería el paso de luz, debido a la asimilación por parte de las plantas acuáticas, además del efecto de la sedimentación durante el periodo de estancamiento.

A partir del 5to día la turbiedad en el reactor con **Lemna** aumenta hasta un valor de 333 μ s aproximadamente debido a que la temperatura fue más elevada a partir de este día. Luego se observó un descenso de este parámetro por efecto de asimilación de los nuevos brotes de Lemna.

Mientras que en el reactor con **Jacinto de Agua** a partir del 5to día disminuyó a mayor celeridad obteniendo una remoción de en 41.99% en solo 3 días, debido a

la descenso brusco de la Temperatura; después este parámetro disminuyó lentamente.

En el reactor “Control”, se observa mayor remoción hasta el día 12 en comparación a los reactores con plantas acuáticas debido al efecto de la sedimentación y a la sobrepoblación de algas causando mortandad de algas.

A partir del día 12.5 aproximadamente, la Turbiedad en los reactores cubierto con *Lemna Minor* y *Jacinto de Agua* es menor que en el reactor “Control”, siendo entonces los reactores con plantas acuáticas más eficientes después de dos semanas de estancamiento.

El máximo porcentaje de remoción llegó a 84.90% hasta el día 7 aproximadamente, después el valor de este parámetro aumentó debido a la producción de nuevas algas.

C. Parámetro Oxígeno Disuelto

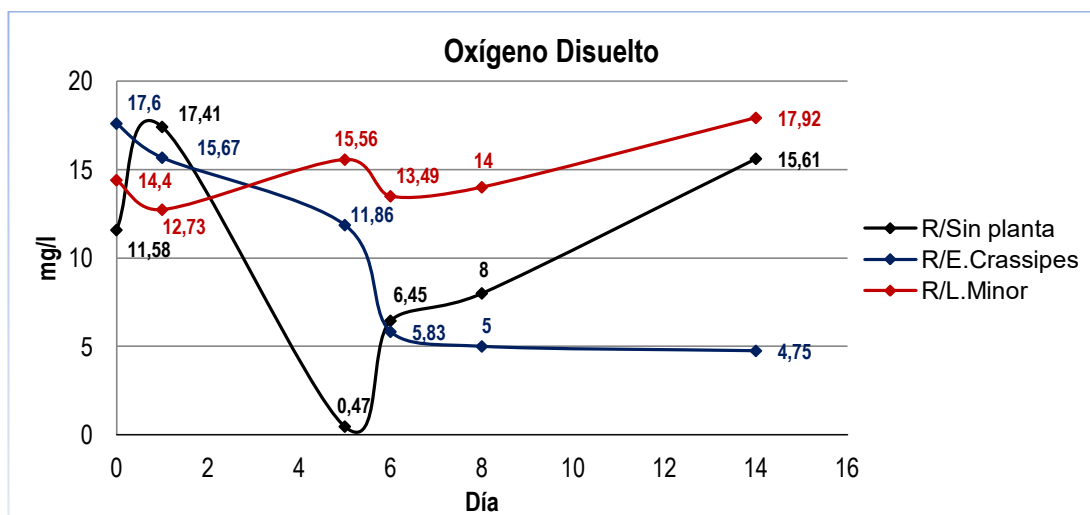


Figura 4. 84: Comportamiento de Oxígeno Disuelto en los tres estanques (CITRAR- Año 2010)

Interpretación: Se muestra el comportamiento de **Oxígeno disuelto** con respecto a los días de cultivo, realizado por plantas acuáticas y sin estas.

El reactor “Control” muestra un aumento del Oxígeno disuelto hasta el primer día (17.41 mg/L) debido a la presencia de algas, luego la concentración de este parámetro disminuye a gran celeridad hasta el 5to día (día en que la turbiedad comienza a incrementarse) que llegó a 0.47 mg/L, a partir de este día aumenta el Oxígeno disuelto nuevamente debido a las algas jóvenes.

Al principio, a diferencia del reactor Control, disminuye la concentración de Oxígeno en los reactores cubiertos con plantas acuáticas, haciendo que estas compitan con las algas e impidiendo el crecimiento de estas últimas además por la falta de luz solar para la fotosíntesis y finalmente logren sedimentarse.

La disminución de este parámetro continuó solo en el reactor cubierto con Jacinto de Agua debido al efecto de sombra por parte de sus hojas gruesas y anchas que cubren la lámina de agua evitando a la luz solar para la fotosíntesis de las algas. A partir del 6to día el descenso fue ligero o el Oxígeno disuelto se mantuvo casi constante que alcanzó niveles de 4.75 mg/L.

Por otra parte el Oxígeno disuelto presente en el reactor cubierto con Lemna, como se señaló, disminuyó hasta el 1er día para luego aumentar progresivamente hasta el 5to día donde hubo presencia de algas jóvenes, pasando solo un día para que nuevamente la concentración de este parámetro disminuir como al principio seguidamente se observa un segundo aumento; como si fuera un ciclo repetitivo manteniendo la concentración más alta debido a que alrededor de la Lemna existió un estado aerobio por estar mucho más cerca a la superficie de agua fluctuando entre 12.73 y 17.92 mg/L.

Las zonas más anaerobias e inestables se encuentran en el reactor Control, siendo esta menos efectiva que los reactores cubiertas con plantas acuáticas.

4.2.7.2. Análisis Comparativo de Parámetros en Biomasa

Según la tasa de crecimiento superficial **TS** (cm^2/d), la *Lemna Minor* puede llegar a cubrir hasta **3 veces** el área que ocuparía el *Jacinto de Agua* en un mismo periodo de tiempo de cultivo. Según algunas investigaciones, se sabe que la causa del agotamiento del Oxígeno disuelto que se generaba en un principio por la presencia de algas gracias a la luz solar a distintas profundidades del estanque es menor a 1mg/L; mientras muy cerca y debajo del nivel del agua, el Oxígeno disuelto aumenta debido al mayor contacto de la superficie con la *Lemna Minor*.

Según la producción de la biomasa **ΔP** (gramos) de estas plantas acuáticas; la obtención en peso de *Jacinto de Agua* es de **2.4 veces** el resultado obtenido por

la *Lemna Minor*, en un mismo periodo de tiempo de cultivo (12 días) y medio de cultivo (efluente de la Laguna Terciaria de CITRAR-UNI).

En esta parte de la investigación, de acuerdo a la Densidad de Peso húmedo por superficie **D** ($\text{g}/\text{cm}^2/\text{día}$), el *Jacinto de Agua* pesó **6 veces** más que la *Lemna Minor* en un misma área, tiempo de cultivo y en un medio con la misma cantidad de nutrientes. Se toma en cuenta que el porcentaje de humedad de las plantas acuáticas es mayor a un 95% de su peso.

La cosecha diaria ó **COP** ($\text{Kg}/\text{día}$), del *Jacinto de Agua* en el tratamiento de aguas residuales fue de **6 veces** la COP de la *Lemna Minor*.

4.2.8. Estudio de la Capacidad de Remoción en el Sistema Continuo

En esta parte del estudio, se compararán los comportamientos y sus capacidades de remoción de las dos plantas acuáticas, la Lenteja de Agua y Jacinto de Agua. La capacidad de remoción de cada especie se puede analizar en base de gráficas comparativas.

Tabla 4. 30: Resumen de los experimentos a comparar entre las dos plantas acuáticas (CITRAR- Año 2010)

Sistema de Flujo Continuo	Planta Acuática
Parámetros Fisicoquímicos (1ra Comparación)	<i>Lemna Minor</i>
	<i>Eichhornia crassipes</i>
Parámetros en Biomasa (2da Comparación)	<i>Lemna Minor</i>
	<i>Eichhornia crassipes</i>

Comentario: Para fines de entendimiento en esta investigación se muestra la Tabla 4.30, donde en este sistema de Flujo Continuo se limitará a analizar los comportamientos de ambas plantas acuáticas según los parámetros fisicoquímicos y con respecto a su biomasa.

4.2.8.1. Análisis Comparativo de Parámetros Fisicoquímicos

A. Parámetro Temperatura

La Figura 4.85, señala el comportamiento de la temperatura en cada estanque por especie.

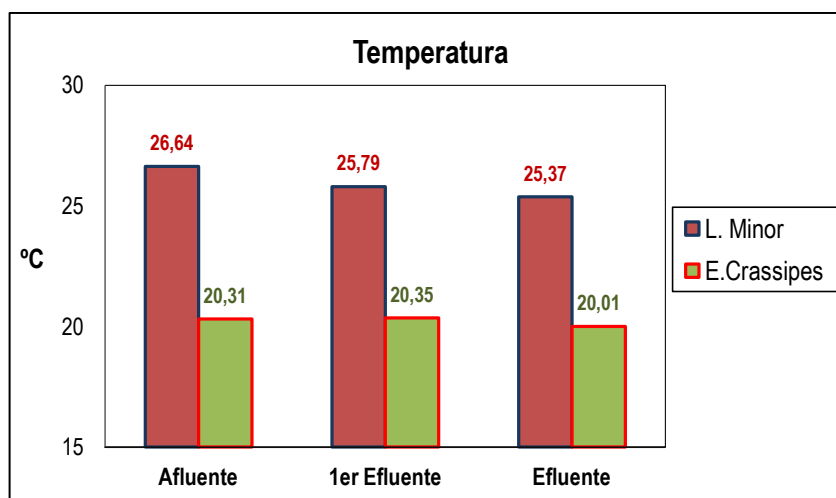


Figura 4. 85: Comportamiento de la temperatura por especie en el Sistema Continuo ubicados en CITRAR-UNI (Año 2010)

Interpretación: Las barras representan las mediciones de Temperatura promedio en los tres puntos de medición evaluados a lo largo del Sistema Continuo para cada planta acuática

Durante este estudio con plantas acuáticas se pudo observar fluctuaciones de la temperatura a través de todo el sistema entre el afluente y el efluente final. El valor de este parámetro presentó ligeras variaciones que fluctúan de 20.0°C a 20.4°C para *E. crassipes*, mientras que la *L. Minor* presentó una disminución de 26.6°C hasta 25.4°C en los estanques.

Los valores de este parámetro concuerdan favorablemente para el tratamiento de aguas residuales para ambas plantas acuáticas.

En el sistema con Lemna, la razón por la cual la temperatura es más elevada en el afluente en comparación a los siguientes puntos fue debido al material plástico que se uso para el transporte de la muestra desde la captación hasta el afluente de nuestro sistema de flujo continuo. Por lo cual se instaló cubiertas de madera para mantener en sombra a la manguera ya para el sistema con Jacinto.

La comparación de las medias de temperatura obtenidas para cada tratamiento en relación con los límites de permisibilidad, según las Normas Técnicas de Saneamiento, las aguas pueden tener temperaturas de hasta 35°C al ser eliminadas a un sistema de agua dulce natural, los resultados aquí obtenidos no representan algún peligro para estas aguas y están relativamente muy por debajo de los estándares de vertimiento, siendo este un punto a favor de los

sistemas de tratamiento.

Según estudios realizado por Valderrama (2005); los valores de temperatura en este tipo de sistemas pueden variar a diferentes horas del día según la cantidad de heliofanía que reciban los sistemas.

B. Parámetro Ph

El comportamiento del parámetro pH, se visualiza en la Figura 4.86. El pH presentó medias que oscilaron entre 8.09 en el afluente y 7.84 en el efluente de acuerdo a las dos plantas acuáticas.

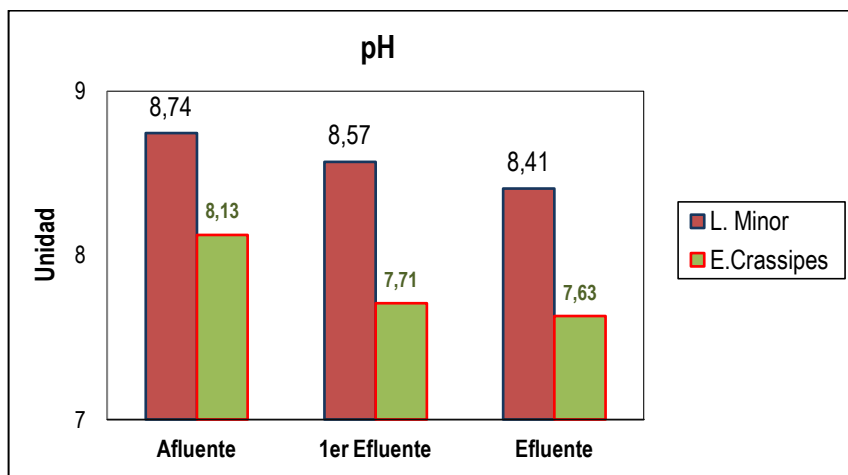


Figura 4. 86: Comportamiento del pH por especie en Sistema Continuo, ubicados en CITRAR-UNI (Año 2010)

Interpretación: Para cada planta acuática, las barras representan las mediciones de PH promedio en los tres puntos de medición, como son el Afluente, 1er Efluente y 2do Efluente (Efluente Final).

El comportamiento del **pH** y la **Temperatura** se asemejan en el reactor con Lemna; mientras que en el reactor cubierto con Jacinto, a una temperatura casi constante, el pH siempre disminuye.

Los comportamientos del pH presentan relativa similitud con *L.Minor* y *E.Crassipes* desde el afluente hasta el efluente de cada sistema. En ambas plantas acuáticas el PH decrece debido posiblemente al descenso de la concentración de carbonatos, fuente de CO₂ para las plantas.

Sin embargo la diferencia entre ambos puntos fue de 0.33 y 0.50 para cada planta acuática respectivamente, concluyéndose que la estabilidad del **pH** fue

más rápido cubierto con Jacinto de Agua.

A un pH de 8.7, los elementos como el fosfato de calcio, el hierro, el zinc, el manganeso, son más solubles; afectando positivamente al crecimiento de la lenteja de agua. Además con respecto a la especie química ion amoniaco-amonio, la concentración de nitrógeno de amoniaco no ionizado es menor que el amonio que representa la forma toxica del compuesto.

La Figura 4.86, pone en manifiesto la comparación de la permisibilidad para pH según la norma de Saneamiento, pues es necesario mencionar que a pesar de ser alto para *Lemna Minor*, los tres tratamientos no sobrepasan los límites permisibles (6.5-8.5).

C. Parámetro Turbiedad

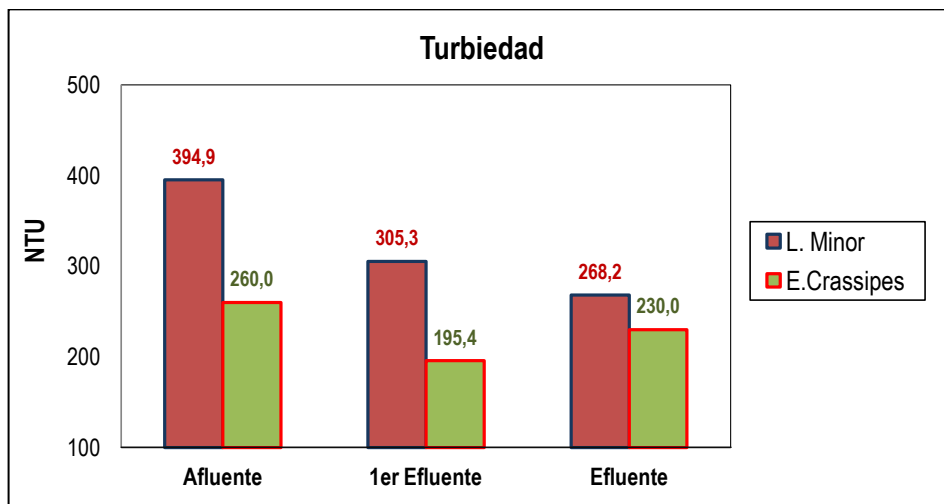


Figura 4. 87: Comportamiento de la Turbiedad por especie en Sistema Continuo, ubicados en CITRAR-UNI (Año 2010)

Interpretación: Las mediciones de Turbiedad son representadas mediante barras en los tres puntos de medición; Afluente, 1er Efluente y 2do Efluente (Efluente) para cada sistema continuo de monocultivos cubierto con *Lemna Minor* y *Jacinto de Agua*.

La turbiedad en el sistema continuo utilizando *Lemna* tiene una capacidad de remoción más eficiente que el mismo sistema cubierto con *Jacinto*.

De acuerdo al sistema con *Lemna*; la remoción hasta la mitad del proceso fue sólo de 22.69%, resultado obtenido entre el afluente y el 1er efluente, y de 32.08% a través de todo el sistema continuo cuyo valor fue extraído entre el afluente y el efluente final. Esto significa que hubo una disminución de materia

suspendida que interfería el paso de luz.

La reducción de este parámetro, se debió por la asimilación de materia suspendida por parte de la *Lemna*, además hubo sedimentación por el recorrido de las partículas a lo largo del sistema y el periodo de retención hidráulica.

Mientras que en el sistema con *Jacinto de Agua* se presencié una remoción de este parámetro del 24.85% hasta la mitad de todo el proceso continuo. El Jacinto al cubrir progresivamente el ara del espejo de agua, hizo que disminuyera el paso de la luz, a la vez redujo la actividad fotosintética en el interior del agua, lo que provocó la muerte de las algas, los cuales sedimentaron al fondo de cada acuario.

Además la temperatura se mantuvo casi constante a largo de este sistema sin ser una razón de la disminución de la Turbiedad.

Luego este parámetro aumentó en un 17.71% con respecto al 1er efluente, contradiciendo a uno de los objetivos de este tratamiento, debido a la producción de nuevas algas o posiblemente a la elevada luminosidad.

D. Parámetro Oxígeno Disuelto

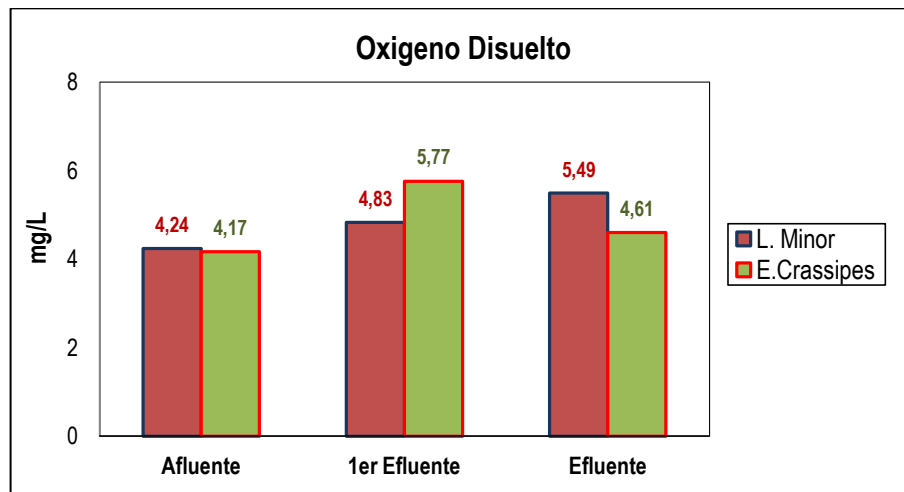


Figura 4. 88: Comportamiento del Oxígeno Disuelto por especie en Sistema Continuo, ubicados en CITRAR-UNI (Año 2010)

Interpretación: En los tres puntos de medición; afluente, 1er efluente y 2do Efluente, las barras representan mediciones de Oxígeno Disuelto para cada sistema de monocultivos con plantas acuáticas.

El sistema monocultivo con *Lemna* muestra un aumento progresivo del Oxígeno disuelto hasta el efluente en 1.25 mg/L, significando un incremento del 29.48%

de este parámetro; estos resultados se obtuvieron entre los valores del afluente y efluente final. Este comportamiento fue gracias a la presencia de algas jóvenes, además por presentar una zona aerobia alrededor de la *Lemna M*.

Sin embargo sabemos que el tratamiento a una profundidad significativa a área llena evitara el ingreso de luz solar limitando el crecimiento de algas el principal productor de Oxígeno y así también por no existir transferencia de Oxígeno atmosférico los reactores con *Lemna M*.

Según la metodología en esta investigación el COP (Carga Operacional) es un parámetro importante para la Operación y Mantenimiento de este sistema, así podrá evitarse una zona aún más anaerobia.

La concentración de Oxígeno disuelto tiene un comportamiento inverso a la concentración de la turbiedad, es decir la turbiedad no depende directamente de la cantidad de algas presentes en cada acuario; esta relación ocurrió para ambas plantas acuáticas.

Mientras que el Oxígeno disuelto aumenta en el sistema con *Lemna M*, en el sistema con Jacinto el aumento ocurre solo hasta la mitad del sistema, a causa de que el área cubierta solo fue del 80% aumentando la concentración de este parámetro debido a las algas.

Sin embargo comienza a disminuir hasta el efluente final por dos posibles razones: El efecto de sombra por parte de sus hojas gruesas y anchas que cubren la lámina de agua evitando así a la luz solar para la fotosíntesis de las algas; por el efecto de asimilación de algas por medio de los largos rizomas del Jacinto, y el efecto de la sedimentación de algas muertas en las tuberías para el transporte del agua.

E. Parámetro Conductividad

Las aguas residuales generalmente tienen tendencia a presentar niveles altos de iones como aquellos provenientes del cloruro de sodio (NaCl) sal común, muy utilizada en la alimentación y que según algunos estudios realizados pasan inalterados por el tracto digestivo, elevando el nivel de iones en las aguas residuales. La Figura 4.89, muestra una comparación de la remoción de cada especie sobre la conductividad.

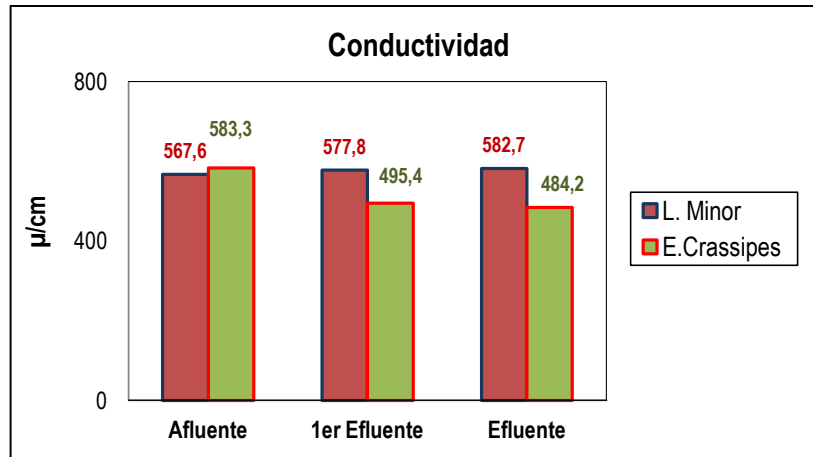


Figura 4. 89: Comportamiento de Conductividad por especie en Sistema Continuo, ubicados en CITRAR-UNI (Año 2010)

Interpretación: Las barras señalan las mediciones de Conductividad en los tres puntos de medición, afluente, 1er efluente y efluente final; en los monocultivos con *Lemna Minor* y *Jacinto de Agua*.

Sabemos que un agua es más conductora de la electricidad cuando mas minerales disueltos contengan. La medida de conductividad da una idea muy aproximada del contenido mineral del agua.

Además la conductividad eléctrica del agua se utiliza como una medida indirecta de la concentración de sólidos disueltos. Hay una relación directa entre conductividad y sólidos disueltos.

Para nuestro caso la Figura 4.89 presenta el comportamiento de conductividad evaluados para las dos plantas acuáticas en la época de verano, no presentan diferencias marcadas entre el afluente y efluente. Sin embargo para *Eichhornia crassipes*, el nivel de remoción llegó a un 15%. Por lo tanto el Jacinto de Agua es más eficiente en la remoción de sólidos disueltos que la *Lemna Minor*.

F. Parámetro N-Amoniacal

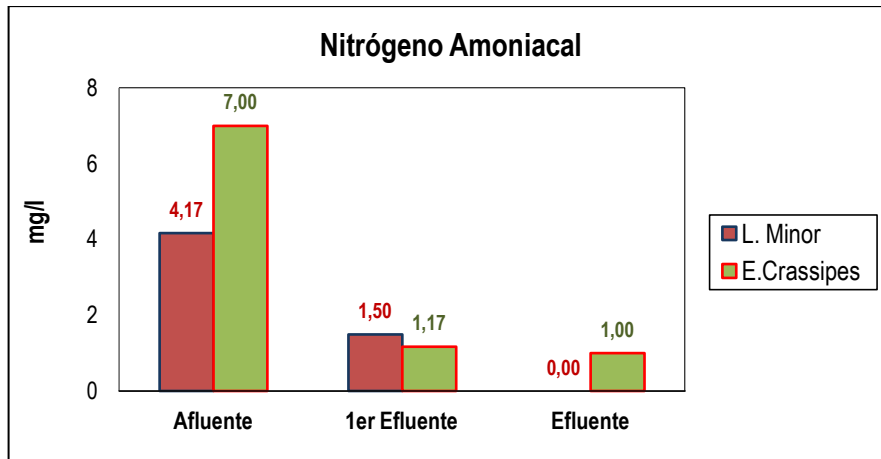


Figura 4. 90: Comportamiento en la remoción de N. Amoniacal por especie en Sistema Continuo, ubicados en CITRAR-UNI (Año 2010)

Interpretación: Las barras representan para cada planta acuática, las mediciones de Nitrógeno Amoniacal en los tres puntos de medición, como son el Afluente, 1er Efluente y 2do Efluente (Efluente).

Al contrario de *Lemna Minor* y *Eichhornia crassipes* se produce remociones significativas Además se muestra que hay predominio del ion amonio ya que el pH es menor de 9.3 según Rodier (2005). Tomando a la *Lenteja de Agua* como la favorita en absorber mas cantidades de nitrógeno amoniacal.

La *Lemna Minor* llegó a remover 64% hasta el primer reactor (1er efluente) y un 100% empleando los dos reactores, lo cual no corresponde a los estudios realizados por Monette (2006) donde emplea agua residual cruda al 60%, llegando su óptima remoción al 5.80%.

La *Eichhornia crassipes* pudo remover desde un 83% hasta el 1er Efluente a un 86% en todo el sistema, resultados obtenidos entre el afluente, 2er efluente y efluente final respectivamente.

G. Parámetro Fósforo Total

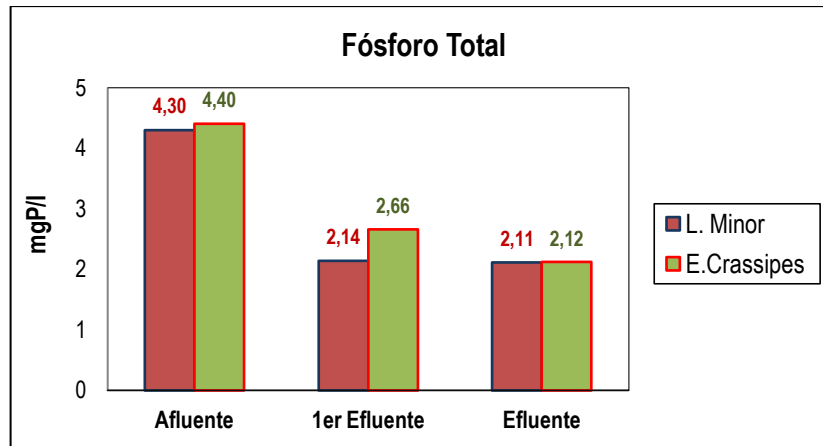


Figura 4. 91: Comportamiento de remoción de fósforo total por especie en Sistema Continuo, ubicados en CITRAR-UNI (Año 2010)

Interpretación: Las barras representan para cada planta acuática, las mediciones de Fósforo Total en los tres puntos de medición, como son el Afluyente, 1er Efluente y 2do Efluente (Efluente).

Para la *Lemna Minor*, el porcentaje de la capacidad de remoción de **fósforo total** presenta para un tiempo de retención de 2.5 días, un valor de 50%; y para 5 días, una remoción de 51%. Es decir la remoción es hecha a penas se pone en contacto con la *Lemna Minor*.

Para la *Eichhornia crassipes*, el porcentaje de la capacidad de remoción de **fósforo total** presenta para un tiempo de retención de 2.5 días, un valor de 40%; y para 5 días, una remoción de 52%.

Este estudio coincide con Monette (2006), siendo la máxima absorción óptima de fósforo en un 1.69%. Sin embargo según Rodriguez (1989), la máxima absorción por la *Lenteja de Agua* fue de un 60%, y para el *Jacinto de Agua* un 76% para el mismo tiempo de retención que se trabajó en este experimento.

H. Parámetro Ortofosfatos

La Figura 4.92, muestra el comportamiento de las especies en la remoción del parámetro Ortofosfato.

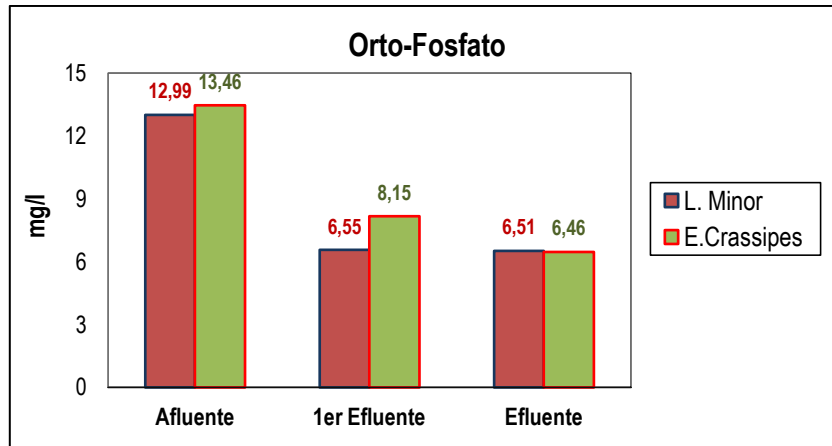


Figura 4. 92: Comportamiento en remoción de fosfatos por especie en Sistema Continuo, ubicados en CITRAR-UNI (Año 2010)

Interpretación: Las barras representan para cada planta acuática, las mediciones de Orto Fosfato en los tres puntos de medición, como son el Afluente, 1er Efluente y 2do Efluente (Efluente).

Para la *Lemna Minor*, el porcentaje de la capacidad de remoción de **orto fosfato** presenta para un tiempo de retención de 2.5 días, un valor de 50%; y para 5 días, una remoción de 100%. Es decir la remoción total ocurre utilizando dos reactores.

Para la *Eichhornia crassipes*, el porcentaje de la capacidad de remoción de **orto fosfato** presenta para un tiempo de retención de 2.5 días, un valor de 39%; y para 5 días, una remoción de 52%.

I. Otras Características

Se observaron algunas características importantes en el cultivo de la *Lemna Minor* en acuarios, en donde no se percibió olores ni hubo presencia de mosquitos ya que los reactores en monocultivos de ambas plantas acuáticas estaban cubiertos casi al 100%.

4.2.8.2. Análisis Comparativo de Parámetros en Biomasa

A. Cálculo de la Tasa de Producción Semanal

Procedimiento:

TP: Tasa de producción semanal

ΔP : Producción de biomasa

Tasa de producción de la *Lemna Minor*

$$\Delta P = \frac{\text{Biomasa inicial(g)} - \text{Biomasa Final(g)}}{\text{Tiempo de Cultivo}} = \frac{949 \text{ g}}{44 \text{ días}}$$
$$TP = \Delta P \times 1 \text{ semana} = \frac{949 \text{ g}}{44 \text{ días}} \times \frac{7 \text{ días}}{1 \text{ semana}} = 150.98 \text{ g/semana}$$

Tasa de producción del *Jacinto de Agua*

$$\Delta P = \frac{\text{Biomasa inicial(g)} - \text{Biomasa Final(g)}}{\text{Tiempo de Cultivo}} = \frac{669.5 \text{ g}}{12 \text{ días}}$$
$$TP = \Delta P \times 1 \text{ semana} = \frac{669.5 \text{ g}}{12 \text{ días}} \times \frac{7 \text{ días}}{1 \text{ semana}} = 390.54 \text{ g/semana}$$

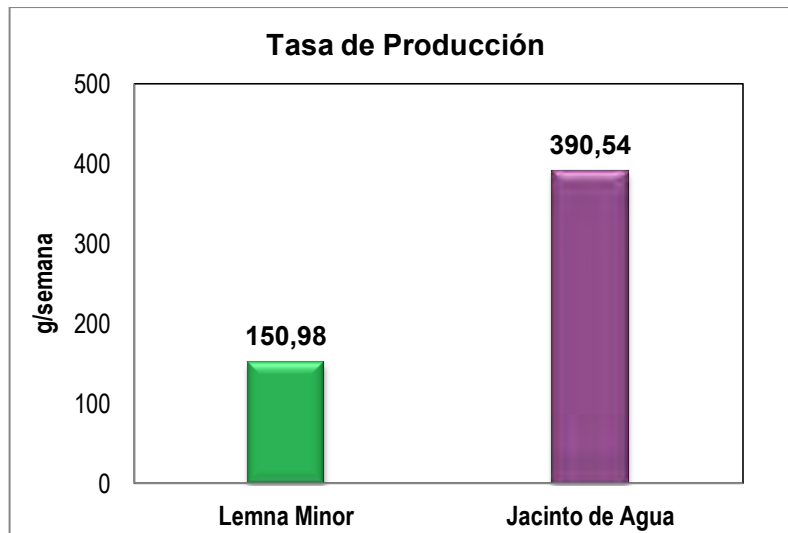


Figura 4. 93: Comportamiento de la Tasa de Producción semanalmente por cada especie (CITRAR- Año 2010)

Interpretación: La figura muestra la cantidad de biomasa que se produce durante una semana de cultivo. La proporción entre el *Jacinto de Agua* y la *Lemna Minor* es de 13:5.

B. Tasa de Crecimiento Superficial

El cálculo para la obtención de la tasa de crecimiento superficial **TS** se realizó anteriormente para cada experimento de monocultivo cubierto con *Lemna Minor* y *Jacinto de Agua*:

Tasa de crecimiento superficial de la *Lemna Minor*

Para el caso de esta planta acuática, la TS fue un dato calculado en base a la densidad de peso húmedo y la producción diaria, tal como se mostró en la Tabla 4.22 (pág. 188).

Tasa de crecimiento superficial del *Jacinto de Agua*

Para el caso de esta planta acuática, la TS fue un dato inicial calculado en base al porcentaje del área cubierto como se mostró en la Tabla 4.24 (pág. 191).

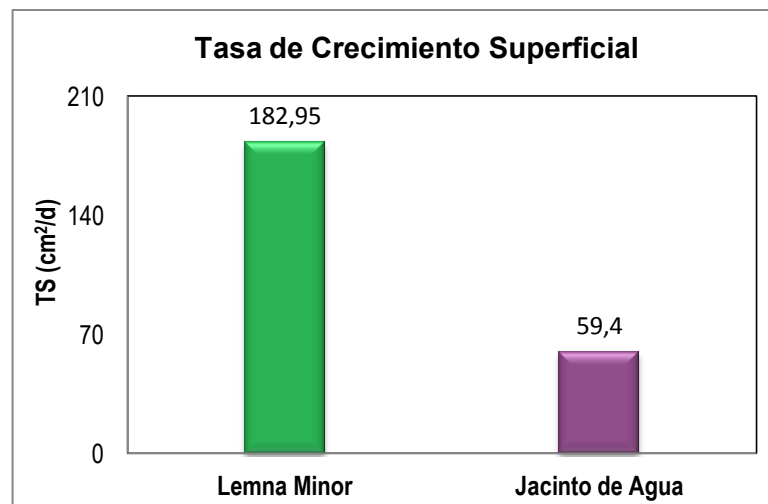


Figura 4. 94: Comportamiento de la Tasa de Crecimiento Superficial diaria por cada especie (CITRAR- Año 2010)

Interpretación: Se muestra que la tasa de crecimiento superficial es mucho más alta cubierto con *Lemna Minor* que con *Jacinto de Agua*.

El mantenimiento de una laguna cubierto con *Lenteja de Agua* sería mucho más costoso que tratar con *Jacinto de Agua*, por desarrollarse con más rapidez superficialmente, además la proporción entre estas plantas acuáticas es de 3:1.

C. Densidad de Peso Húmedo por Superficie

La densidad de peso húmedo por superficie indica la cantidad de planta acuática por unidad de superficie, se denotó mediante **D**.

Densidad de peso húmedo por superficie *Lemna Minor*

Se obtuvo del producto de la carga operacional **COP** crítica y el tiempo entre cosecha y cosecha **T**, dividida entre el área que ocuparía la planta acuática en una determinada superficie, tal como se muestra en la Figura 4.21 (pág. 106).

Densidad de peso húmedo por superficie *Jacinto de Agua*

El método inverso de obtención de este valor se realizó mediante dos pasos: En primer lugar se obtuvo la tasa de producción diaria **TP**, dividiendo la producción total entre el tiempo de cultivo.

Seguidamente la densidad de peso húmedo fue la división del resultado anterior con la Tasa de Crecimiento Superficial **TS**, tal como se muestra en la Tabla 4.26 (pág. 193).

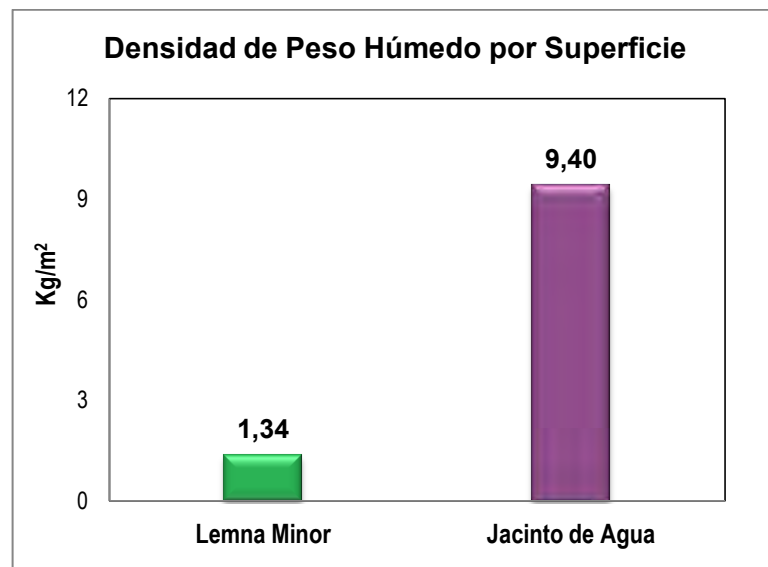


Figura 4. 95: Comportamiento de la biomasa producida en kilogramo por metro cuadrado de cada especie (CITRAR- Año 2010)

Interpretación: En esta Figura se muestran las densidades de peso húmedo por superficie en los reactores cubiertos con cada planta acuática. Como se observa en la grafica, el peso del *Jacinto de Agua* es mucho mayor que la *Lemna Minor* en una misma área y tiempo de cultivo.

D. Carga Operacional

La carga operacional indica la cantidad apropiada en peso fresco de una planta acuática que se debe cosechar en los estanques de tratamiento para un adecuado mantenimiento.

Carga Operacional de la *Lemna Minor*

Para el caso de esta planta acuática, la COP en promedio fue un dato inicial calculado en base al valor máximo como se muestra en la Tabla 4.18 (pág. 179).

Carga Operacional del *Jacinto de Agua*

Para el caso de esta planta acuática, la COP fue un dato calculado en base a la densidad de peso húmedo, el área ocupada de la cosecha y el tiempo entre cosecha y cosecha, tal como se mostró en la Tabla 4.27 (pág. 195).

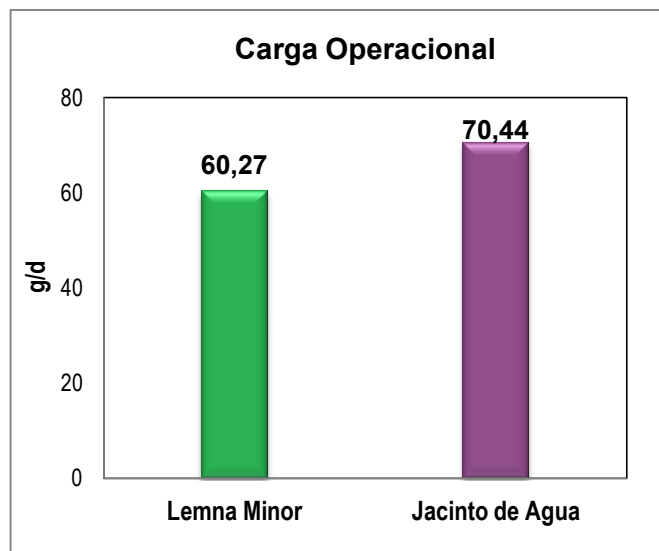


Figura 4. 96: Carga Operacional expresada por la cantidad de cosecha diaria de cada especie (CITRAR- Año 2010)

Interpretación: Se puede apreciar los resultados de COP, obtenidos para ambas plantas acuáticas; significando que el peso de la cosecha diaria entre el *Jacinto de Agua* y la *Lemna Minor* está en proporción de 6:5.

Si aplicamos valores porcentuales a la COP, a ambas plantas acuáticas obtendríamos el peso eliminando la humedad.

Según Monete, para el caso de la *Lemna Minor* se obtuvo un porcentaje en peso

seco de 6% del peso en estado húmedo, obteniendo un máximo crecimiento de biomasa. Se consideró en peso seco de 4% para el Jacinto de Agua ya que contiene menos proteína que la *Lemna*.

Se sabe además que estos valores sólo se estaría efectuando para un área de 0.36 m²; ya que si se evaluaría en una laguna con dimensiones de 52 m de ancho por 102 m de largo, semejante a la Laguna Secundaria de CITRAR-UNI y efectuando el método de proporción directa mediante la siguiente operación, obtendríamos dicho resultado:

PS: Peso seco

$$\text{Peso Seco de la Lemna Minor} \rightarrow 60.27 \frac{g}{d} \times 6\% \rightarrow 0.36 \text{ m}^2$$

$$COP_L \text{ g/d} \rightarrow 52 \text{ m} \times 102 \text{ m}$$

$$\text{Por lo tanto } COP_L = 53.3 \text{ KgPS/d}$$

$$\text{Peso seco del Jacinto de Agua} \rightarrow 70.44 \frac{g}{d} \times 4\% \rightarrow 0.36 \text{ m}^2$$

$$COP_J \text{ g/d} \rightarrow 52 \text{ m} \times 102 \text{ m}$$

$$\text{Por lo tanto } COP_L = 41.5 \text{ KgPS/d}$$

Se extraería diariamente 53.3 Kg en peso seco de Lenteja de Agua, y 41.5 Kg en peso seco de Jacinto de Agua.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones para *Azolla Filiculoides*

Se observó que a mayor temperatura atmosférica mayor es la absorción de nutrientes por la *Azolla Filiculoides*. Según Suarez (2006), la *Azolla* necesita grandes cantidades de fósforo (P) para lograr una acumulación eficiente de nitrógeno (N), además de que la eficiencia de remoción de fósforo ocurre aun después que el N haya sido consumido. La capacidad de remoción utilizando *Azolla* en este estudio previo fueron bajas para el N y altas para P presentes en el medio acuático. La relación de N/P en verano fue de 11:1 y en otoño (8°C a 17.5°C) de 8:1. Esto corrobora a lo mencionado, es decir a pesar de que la concentración de N fue mayor, no hubo altas remociones de este parámetro, debido a la baja concentración de P.

En el sistema por tandas y en el sistema continuo, el pH tuvo fluctuó de 7.0 a 8.0, siendo adecuado para el crecimiento de este helecho. Por lo tanto existió en el medio acuático, un predominio de ión amonio ya que el pH estuvo por debajo de 9.3 y la remoción de Amonio varió de un 81% a un 89%.

En la época de verano, el medio acuático presentó una temperatura máxima de 25.4°C, y un mínimo de 5°C en la época de invierno; la cual por debajo de 20°C no fueron favorables para un óptimo desarrollo de la *Azolla*, debido a la poca producción que se presentó. La luz solar fue también un pre-requisito para la germinación de la *Azolla* en estos experimentos.

En ambos sistemas con *Azolla*, la conductividad presentó diferencias marcadas para las distintas épocas y con altos niveles en concentraciones de sales fluctuando desde los 800 a 2000 $\mu\text{S/m}$, por lo que dificulta la remoción de nutrientes por la inhibición del desarrollo de la *Azolla*.

Para el tratamiento de aguas residuales, la relación DQO/COT es de 1:1 es el ideal. En este experimento la relación DQO/COT tiende a disminuir de 3.8 a 1.7, es decir la cantidad biodegradable decrece por la acción de la *Azolla*.

En un estudio, la capacidad de absorción de la *Azolla* para un crecimiento óptimo, se estimó de 2mgN/d a bajos niveles de NTK, y de 5-6 mgN/d a altos niveles de NTK. En esta investigación, la *Azolla Filiculoides* demuestra una remoción no muy significativa variando desde un 30% a un 57% debido a las bajas concentraciones de este parámetro, sin embargo en la época de invierno y con una concentración inicial de 5.29 mg/l (nivel máximo) alcanzó una remoción del 100%. Es decir la capacidad de remoción de NTK depende directamente de los niveles de concentración que exista en el medio acuático.

En el sistema continuo, no se observó remoción en concentraciones de nitritos ni de nitratos, todo lo contrario hubo un aumento en un 53% a partir de una carga inicial. A altas concentraciones de nitratos, la capacidad de la *Azolla* en remover este parámetro es menor; por ejemplo para una concentración inicial de 34.70 mg/l, la remoción solo llegó a un 13%, mientras que para 9.75 mg/l la remoción fue del 100%. Una de las causas a este tipo de comportamiento sea que los nitratos hayan reaccionado con el oxígeno brindado por el mismo helecho, convirtiéndolos en nitritos.

Las concentraciones de nitritos, elementos tóxicos para las plantas acuáticas, fueron menores a 1 mg/l; en verano (20°C a 25.4°C), la remoción fue del 95%, en otoño (8°C a 17.5°C) del 17% y en invierno del 69%. Es decir el crecimiento y desarrollo de la *Azolla* a lo largo del experimento se realizó normalmente y sin una representativa interferencia de estos iones.

A bajas concentraciones de fósforo total, la *Azolla* puede remover hasta un 89%, por ejemplo la concentración inicial fue de 1.91 mg/l disminuyendo hasta 0.20 mg/l. Esto corrobora según Ghobrial y Siam (1998) que la *Azolla Filiculoides* puede remover hasta un 80% de fósforo en diferentes concentraciones de agua residual en el medio de cultivo (20%, 40% y 60%). Entre las causas de que la especie no consuma eficientemente estos nutrientes es que necesite transformarlos en otros compuestos para su mejor absorción.

En esta investigación, la remoción de Fósforo Total fue de casi un 100% hasta el séptimo día en el Sistema por Tandas. Esto corrobora según Shiomi y Kitoh (2006), que la *Azolla* puede absorber completamente este parámetro a bajas concentraciones durante 6 días de crecimiento. Es decir es preferible tener un TRH de una semana en contacto con el helecho.

A mayor cantidad de nutrientes mayor será la concentración de sulfatos, por ejemplo a concentraciones de 38 mg/l en nutrientes de nitrógeno y fósforo hubo un incremento del 67.36% en sulfatos. Además se observa un incremento de la concentración de sulfatos en un 32%, para altas concentraciones, superiores a 41 mg/l; esto ocurre debido a la síntesis de proteínas, liberándose el sulfato cuando ocurre la degradación de las mismas.

En la caracterización del medio acuático en el Sistema Continuo, la variación de la conductividad varía dependientemente de la concentración de cloruros. Según Johson (1986), la tolerancia de salinidad es de 1773 mg/L en iones cloruros. La razón por la cual el crecimiento y desarrollo de la *Azolla* prosiguió se debió a la ausencia de altos niveles de cloruros, ya que fluctuó entre los 78 a 579 mg/L.

En verano (20°C a 25.4°C), la capacidad de remoción de la DQO por la *Azolla Filiculoides* fue más eficiente en un 52.5% que en otoño (8°C a 17.5°C) debido a la temperatura. La remoción de DBO₅ se debe en estos sistemas tratados con plantas acuáticas, a que las raíces densas proporcionan más sitios de adhesión para las colonias bacterianas degradadoras de materia orgánica y actúan como filtros de material particulado.

Según algunos estudios, la remoción de N Amoniacal fluctúa de 20.6% hasta casi completar la remoción de la carga inicial, para diferentes concentraciones de agua residual, mientras que el N orgánico fue casi totalmente removido; las remociones en el Control (sin plantas) fueron, en N Amoniacal de 16% y de N Orgánico de un 15%. En el sistema por tandas, la *Azolla filiculoides* demuestra una sola remoción de Nitrógeno (NTK) y no muy elevada que alcanzó hasta un 73.4%, donde la mayor concentración fue de nitrógeno orgánico y la concentración de amonio fue menor a 1 mg/l; y la remoción de este último parámetro llegó a 73% para bajas concentraciones. Por lo tanto el helecho pudo absorber con el mismo porcentaje, la cantidad de nitrógeno orgánico que el nitrógeno amoniacal a altos niveles de N orgánico en el medio acuático.

La Carga Operacional **COP** expresada en g/d, es la cantidad de biomasa con el que se pudo trabajar en condiciones específicas, tratando de que exista un equilibrio entre la capacidad de remoción de contaminantes y las cosechas en un área determinada ocupada por la planta acuática. Solo en verano (20°C a 25.4°C) se puede lograr una mayor eficiencia en la remoción de nutrientes ya que el crecimiento de la *Azolla* fue de 72.48 gramos por día (4.20 g PS/d). A

partir de otoño (8°C a 17.5°C), la tasa de crecimiento fue sólo de 9.79 g/d (0.53 g/d). Además se observó que en verano (20°C a 25.4°C), en solo 3 días la *Azolla* llegó hasta duplicar su peso. La materia seca contenida en el helecho *Azolla filiculoides* fue de un 5.80%, mientras que en invierno fue de 5.24%. Esto demuestra la mayor capacidad de remoción a altas temperaturas.

En el sistema continuo, la cantidad máxima de biomasa se presentó en el estanque ubicado a la mitad de este sistema en un 43.8 g/d, ya en que los estanques restantes representaron el 94% y 86% de este valor máximo. Esto significa que un crecimiento eficiente de la *Azolla* se presenta en un medio sin la mayor interferencia de movimiento del mismo fluido.

El crecimiento en biomasa de *Azolla f.* fue analizado durante 95 días; con intervalos de 4 días entre cada medición en verano (20°C a 25.4°C) representando los primeros 22 días, y 8 días en otoño (8°C a 17.5°C) representando los últimos 73 días, debido a la capacidad de producción en diferentes estaciones y fecha en la se comenzó el proyecto.

En el Sistema Continuo, la *Azolla* necesitó 11 días para adecuarse al medio instalado antes de su primera cosecha. La COP_A máxima fue de 250 g/d, es decir el crecimiento se desarrolló eficientemente en el estanque ubicado a la mitad de todo el sistema continuo, por lo que el promedio de la tasa de cosecha en los estanques restantes fue sólo de 53.3 g/d; es decir hubo mayor capacidad para remover nutrientes en una zona media del sistema, donde el helecho puede recibir compuestos químicos ya degradados listos para ser absorbidos.

La cantidad de biomasa por superficie en el 1er Reactor llegó a 0.83Kg/m²/d mientras que el 2do Reactor mostró una densidad de 0.66kg/m²/d, estos valores son importantes al igual que la COP para conocer a la *Azolla* y así evitar la eutrofización. Lo ideal es que estos valores sean aproximadamente similares; las causas pudieron ser la mano del operador y la otra el tamaño de las hojas en cada reactor.

En verano (20°C a 25.4°C) la cosecha de la *Azolla* se realizó cada 4 días, extrayendo 3 Kg por cada metro cuadrado; mientras que en otoño (8°C a 17.5°C) se realizó cada 8 días; así obtendríamos un promedio de 1.44 Kg/m², sin embargo, el helecho en la temporada de otoño presenta una tasa de crecimiento

máxima de 0.20Kg/m²/d. Igualmente en verano, diariamente apareció sobre la superficie del agua casi 44 gramos en peso seco en un metro cuadrado de superficie; mientras que en otoño sólo 9 gramos en 1 m². Esto se debió a que las hojas del helecho fueron más grandes y pesadas a una temperatura mayor a 20°C.

Con respecto al porcentaje en materia seca de la biomasa, es mayor en la macrofita *Azolla Filiculoides* en sí que cubre el espejo de agua que en los rizomas que precipitaron; por lo tanto en un periodo de cultivo, la materia sedimentada no sería significativa en un reactor para el tratamiento.

La remoción real tratando con *Azolla Filiculoides* en la superficie del medio acuático fue de 49.63 mg de fósforo por metro cuadrado que se absorbió en un mes aproximadamente; valor de remoción muy deficiente para un reactor de un metro de profundidad, por lo que la cantidad de fósforo presente en aguas residuales domésticas varía de 4 a 12 mg de fósforo por litro, según Rodier (2005).

En el sistema por tandas mediante acuarios, no hubo presencia de algas, la única interferencia fue la cantidad de fósforo depositado al fondo de cada acuario; esto sirvió para la evaluación de una absorción mucho más real de la *Azolla*, debido los distintos procesos físicos y químicos.

La cantidad de fosforo presente en los sólidos sedimentables representa un 11.38%, mientras que los rizomas sedimentados representa sólo un 4.76%. Lo que significa que un 16% se encuentran al fondo de cada acuario. La remoción total en este sistema fue debido a la *Azolla Filiculoides* en un 86% y por otros factores en un 14%. Esto quiere decir efectivamente que el tratamiento con este helecho es eficiente en un 86%.

En el Sistema Continuo, se presentó una remoción del 10% en Nitrógeno Amoniacal y un 5% en Fósforo Total en el Sistema Continuo cubierto con *Azolla Filiculoides*. Las razones son las mismas que en el Sistema por Tandas.

Particularmente en estas macrófitas o *Azolla* no se han encontrado factores antinutricionales que pudieran limitar su uso en alimentación animal, lo que las hace muy atractivas en este sentido.

5.2. Conclusiones para *Lemna Minor* y *Jacinto De Agua*

El periodo de estancamiento en el Sistema por Tandas abarcó 13 días. La capacidad de remoción de la turbiedad fue de 52% en el Control, en el reactor con Lenteja de Agua de un 72%, y en el reactor con *Jacinto de Agua* en un 65%.

Con respecto al parámetro de Oxígeno Disuelto, solo hubo presencia de remoción en un 73% en el reactor cubierto con *Jacinto de Agua*, mientras que para el Control y Lenteja de Agua existió un incremento de 35% y 24% respectivamente.

En el sistema continuo, el tiempo de retención en cada reactor fue de 2.5 días, haciendo un total de 5 días en los dos reactores.

La remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno, DBO₅ fue del 96.7% y la capacidad de remoción de nutrientes fluctuó de un 50% a un 100%, con un periodo de retención de 5 días utilizando *Lemna Minor*.

El tratamiento con *Eichhornia crassipes* mostró una remoción de nutrientes que osciló entre los 52% al 86% con un periodo de retención de 5 días; mientras que el parámetro microbiológico DBO₅ presentó una remoción de 26.7% en un periodo de retención de 2.5 días.

Se comprueba que la eficiencia de la especie es afectada por los periodos de cosecha; ocasionando a la vez incremento de sedimentos y elevación de la concentración de otros parámetros por los procesos de descomposición que se dan en el medio acuático. La precipitación también ocurre en una laguna con plantas acuáticas. Los compuestos en solución y otras, como el Fosfato combinado con Calcio que precipita como Fosfato de Calcio. Además la disminución de la concentración de algas reduce la DBO, DQO, sólidos en suspensión y turbidez.

Según algunos estudios, se presenta mejores resultados de desarrollo en pH de 7, para esta investigación el pH se mantuvo entre 7.54 y 10.40 que en este caso presenta una baja eficiencia en la remoción de nutrientes.

Se han observado en otros estudios las mejores tasas de desarrollo de la *Lemna Minor* cuando el ion amonio y nitrato son la fuente principal de nitrógeno, con una capacidad de crecimiento donde su peso se duplicaba solo en dos días.

Se considera a la *Eichhornia crassipes* una especie promisoría en los procesos de desinfección de las aguas residuales debido a la alta eficiencia en niveles de remoción.

En el sistema por tandas, el parámetro de la turbiedad representó un alto el porcentaje de remoción por parte de *Lemna Minor* en un 72% y un 65% por parte del Jacinto de Agua; sin embargo hubo remoción sin plantas acuáticas en un 52%. Es decir la remoción de este parámetro tratando con plantas acuáticas no sería significativa al no utilizar plantas acuáticas.

En el sistema de Flujo Continuo con *Lemna Minor*, el comportamiento de la conductividad (concentraciones de sales), demuestra la tolerancia a altas concentraciones de sales, ya que este parámetro varió de 568 a 583 $\mu\text{s}/\text{cm}$ a la entrada y salida respectivamente.

La turbiedad a elevada temperatura provoca incrementos en el parámetro de la turbiedad al ingreso del sistema continuo con *Lemna*, siendo el nivel de remoción menor al 9%. Sin embargo el tratamiento luego de haber instalado el pequeño filtro muestra valores de menores concentraciones al ingreso removiendo hasta un 69% respectivamente, este valor se obtuvo entre la salida del filtro y la salida del sistema. La turbiedad decrece debido a la competencia para la supervivencia entre las algas con la macrofita, siendo la más beneficiada esta última a causa de la luz solar que le favorece para su desarrollo.

A diferencia de las algas, la biomasa generada por *Lemna Minor* en una laguna, podrá ser retirada con más facilidad. Además la disminución de la concentración de algas reducen los parámetros de DBO_5 , DQO, sólidos en suspensión y turbiedad.

El tratamiento con *Lemna Minor* convierte al medio aerobio cada vez a un medio anaerobio, disminuyó hasta $0.56 \text{ mgO}_2/\text{L}$, a causa de la macrofita por impedir la transferencia de oxígeno a 10 cm por debajo de esta.

Tratando con *Lemna Minor*, la capacidad de remoción del Nitrógeno Amoniacal hasta un periodo de retención de 2.5 días presentó un 67%, mientras que para 5 días presentó una remoción del 100%; teniendo presente que esta absorción no es netamente debido a la planta acuática. En el caso del parámetro de Fósforo Total la remoción casi no varía a un tiempo de retención de 2.5 ó de 5 días (50%).

Tratando con *Jacinto de Agua*, la capacidad de remoción del Nitrógeno Amoniacal tanto para periodo de retención de 2.5 días como para 5 días presentó un 86%. En el caso del parámetro de Fosforo Total, la remoción varió según el tiempo de retención de 2.5 días (39%) a 5 días (52%).

Se puede decir que tratando con ambas plantas acuáticas, el N. Amoniacal se consume antes que el Fosforo Total y la absorción de este último parámetro es más lenta que el N. Amoniacal.

Al contrario de la *Lemna Minor*, el *Jacinto de Agua* tiene un comportamiento de remoción con respecto a la conductividad ya que el nivel de remoción llegó hasta un 20%.

En el sistema continuo, la reproducción del *Jacinto de Agua* comenzó a partir del tercer día incrementando el oxígeno disuelto en cada acuario, nuevamente este parámetro disminuye hasta llegar a la misma concentración del afluente manteniéndose casi constante después en 5 mg/l.

En el Sistema Por Tandas, la *Lemna Minor* puede llegar a cubrir un área de 3 veces la que ocuparía el *Jacinto de Agua* en un mismo periodo de tiempo. La *Lemna* presentó un crecimiento de 545.2 en cm² por día, mientras que el *Jacinto* de 207.36 cm² por día. Una de las características que poseen estas plantas acuáticas es de formar un colchón sobre la superficie del agua donde no permitirían hacer pasar la luz solar e incluso habría condiciones anaerobias en la masa de agua a tratar. Sin embargo tenemos que observar que estas plantas acuáticas también cumplen su ciclo de vida de las cuales la absorción se hace una limitante a la capacidad de remoción de nutrientes, para ello se removerá periódicamente las plantas flotantes.

La relación entre la carga de cosecha del *Jacinto de Agua* y la *Lemna Minor* fue de 6:1, significando mayor costo en la Operación y Manteniendo tratando con *Jacinto de Agua* que tratando con *Lemna Minor*.

La adaptación de la *Lemna Minor* en un medio con el efluente de la Laguna Terciaria de CITRAR, se obtuvo en los primeros 20 días, por lo que a partir de este día la cosecha se desarrolló con mayor rapidez.

Los resultados de la Carga Operacional dependieron del operador, es decir el día de cosecha y la cantidad de *Lemna* cosechada se obtuvo bajo el criterio de evitar que el Sistema entre a condiciones extremas de eutrofización.

En un sistema continuo con lagunas de tratamiento utilizando *Lemna*, el primer contacto en una laguna cubierto con esta planta acuática significaría un costo mayor obteniendo una mayor eficiencia en el tratamiento de nutrientes. Por lo tanto estos resultados nos dan a entender que si deseáramos adaptar una laguna para el tratamiento de aguas residuales conviene tener altas concentraciones de nutrientes.

La densidad en peso por superficie en el 1er Reactor llegó a 1.94Kg/m^2 mientras que el 2do Reactor mostró una densidad de 0.74Kg/m^2 , es decir que la mayor absorción de sólidos suspendidos ocurrió en el primer reactor debido al primer contacto con nutrientes.

En el sistema continuo, la reproducción sexual se llevó a cabo en medios con poco contenido de nutrientes a una menor tasa de crecimiento superficial a diferencia de un medio de agua residual cruda; como ocurrió en estos reactores donde además no hubo una clara diferencia con respecto al tamaño de los bulbos de la *Lemna*. Sin embargo en el 1er reactor, el color de esta planta acuática tuvo un aspecto más verdoso que en el 2do reactor, debido a los nutrientes.

La relación de Producción de la biomasa de *Eichhornia Crassipes* en el sistema continuo del 1er reactor y 2do reactor fue de 8:5, manteniendo esta misma relación para la Carga Operacional.

Las plantas acuáticas no afectan en mayor proporción a la variación de la temperatura del medio en que se cultivan; sin embargo las hojas gruesas y anchas del *Jacinto de Agua* actúan como sombras a la superficie del agua, disminuyendo la temperatura hasta en un 3.9°C . Ambas plantas flotantes se encuentran en un rango apropiado para su crecimiento por ser tolerantes a este parámetro.

La Temperatura en el cultivo de la *Lemna* se encuentra entre un rango óptimo y máximo ($\geq 32^\circ\text{C}$) donde se logra un eficiente crecimiento de la *Lemna*. Sin embargo en otros estudios la temperatura en este experimento con *Lemna Minor* es 4°C más que la temperatura óptima.

Otras dos variables a la absorción de nutrientes, son el clima y el tipo de efluente utilizado, ya que son aspectos que varían la capacidad de remoción. La

temperatura más baja reduce la eficiencia en la capacidad de absorción de nutrientes por plantas acuáticas como el fósforo y el nitrógeno.

El comportamiento del pH y la Temperatura se asemejan sólo en el reactor "Control"; mientras que en los reactores cubiertos con plantas acuáticas, a medida que aumenta ó disminuye la temperatura, el pH siempre disminuye.

Para los casos con plantas acuáticas, el valor del pH tuvo un valor inicial de 10.4 que va disminuyendo en el tiempo; cubierto con *Jacinto de Agua* llegó hasta 6.86 y con *Lemna Minor* descendió hasta 9.83. De acuerdo a este experimento, la *Lemna Minor* tuvo que adaptarse a un alto valor de pH (>10) y a sus variaciones. Las plantas acuáticas como *Lemna* y *Jacinto de Agua* llegan a presentar niveles cercanos a la neutralidad, y no presenta variaciones como las algas que al realizar la fotosíntesis remueven el CO₂ y altera el equilibrio Buffer Ácido carbónico-carbonatos, elevando el pH.

Solo en el estanque con *Jacinto de Agua* se obtuvo una remoción de la conductividad en un 42% en sólo 3 días, debido a que esta planta puede absorber más elementos y cantidad de sólidos en suspensión.

Las zonas más anaerobias e inestables se encuentran en el reactor sin plantas acuáticas, siendo entonces esta menos efectiva que los reactores cubiertas con plantas acuáticas, siempre y cuando la altura no se grande dándole un buen mantenimiento.

En ambas plantas acuáticas el PH decrece debido posiblemente al descenso de la concentración de carbonatos, fuente de CO₂ para las plantas. La estabilidad del pH fue más rápido cubierto con *Jacinto de Agua* que con *Lemna Minor*.

La turbiedad en el sistema continuo utilizando *Lemna Minor* tiene una capacidad de remoción más eficiente que el mismo sistema cubierto con *Jacinto de Agua*.

La especie más eficiente en la capacidad de depuración de nutrientes para el tratamiento del efluente de la Laguna de estabilización Terciaria (CITRAR) de las aguas residuales domésticas para esta investigación fue la *Eichhornia crassipes* siendo capaz de remover un 100% en Nitrógeno Amoniacal. Mientras la *Lemna Minor* presentó remociones del 86% de este parámetro. Sin embargo en el parámetro del Fosforo Total, la capacidad de depuración fue casi similar en un 52% y *Lemna Minor*, debido al número de parámetros removidos.

La tasa de crecimiento de la *Lemna Minor* es de 0.2 m² por día y del Jacinto de Agua de 0.06 m² por día; ambas plantas cultivadas en verano, a temperaturas desde los 18.2°C a 40.9°C.

El mantenimiento de una laguna cubierta con *Lenteja de Agua* sería mucho más laborioso si fuera a mano, que tratar con *Jacinto de Agua*; por desarrollarse superficialmente esta última con menos celeridad, además la proporción entre las tasas de crecimiento superficial de estas plantas acuáticas está en relación de 3:1.

La cantidad de biomasa en peso por unidad de superficie, utilizando *Lemna Minor* fue de 1.34 Kg/m² y utilizando *Jacinto de Agua* de 9.40 Kg/m²; debido a la morfología de cada planta, ya que el desarrollo de esta última es mayormente vertical.

La relación del peso de cosecha que se extraería diariamente entre el Jacinto de Agua y la *Lemna Minor* está en proporción de 6:5.

Tratando con plantas acuáticas en una laguna (monocultivo: una sola especie) con las mismas dimensiones que la Laguna Secundaria de la planta de tratamiento CITRAR-UNI, se extraerían diariamente 53.3Kg en peso seco de *Lemna Minor* y con *Jacinto de Agua* de 41.5Kg en peso seco.

Los valores de remoción con respecto a los nutrientes no pudieron ser comparados con los límites permisibles vertidos en cuerpos de agua dulce referentes a fósforo y nitrógeno de la norma técnica del Ministerio de Ambiente (MINAM), ni con las normas de Saneamiento del Ministerio de Construcción y Saneamiento; por no estar especificado.

5.3. RECOMENDACIONES

Sería recomendable hacer un análisis de la capacidad de absorción de metales. En la India, las plantas acuáticas flotantes adultas *Azolla* y *Lemna* pueden remover metales pesados. En comparación con la *Lemna Minor*, la *Azolla* puede absorber un 12% más en promedio de estos metales.

Es importante notar que el tiempo de retención dependerá de la capacidad de absorción de estas plantas acuáticas. En la mayoría de los casos de tratamiento de aguas residuales mediante plantas acuáticas, los nutrientes como el fósforo total seguirá siendo absorbida aun después que el NTK fuera consumido del efluente, sin embargo al sexto día el fósforo es consumido totalmente.

Sería recomendable hacer además los análisis de nitratos y nitritos, ya que el *Jacinto de agua* también se observa para mejorar la nitrificación en las aguas residuales tratadas con células de tecnología viva. Una desventaja de esta planta acuática es que producen además problemas sanitarios al constituir un hábitat propicio para los mosquitos, el clásico vector de las enfermedades y una especie de caracol (de los géneros *Biomphalaria* y *Oncomelania*) conocido por albergar un parásito platelminto que provoca la esquistosomiasis.

Es preferible saber que los iones amonio tienen una escasa acción tóxica por sí mismo, pero su existencia aún en bajas concentraciones, puede significar un alto contenido de bacterias fecales, patógenas, etc.

En estudios anteriores, la *Azolla filiculoides* pudo remover la DBO₅ para diferentes concentraciones de agua residual doméstica de 20%, 40% y 60%, obteniéndose remociones de 84%, 90% y 74% respectivamente; sin embargo se observó que a concentraciones menores a 5 mg/l en el afluente del Sistema Continuo, llega a remover casi el 100%; por lo tanto sería recomendable experimentar con agua residual doméstica.

Es recomendable hacer las mediciones desde el inicio de los experimentos medir los parámetros de DBO₅ y DQO ya que según Fresenius et al. (1989), los valores de la relación DBO₅/DQO en aguas residuales municipales no tratadas oscilan entre 0.3 y 0.8. Generalmente, los procesos de descomposición biológica comienzan y ocurren de manera rápida con proporciones de DBO₅:DQO de 0.5 o mayor. Las proporciones entre 0.2 y 0.5 son susceptibles al

tratamiento biológico; sin embargo, la descomposición puede ocurrir de manera más lenta debido a que los microorganismos degradantes necesitan aclimatarse a las aguas residuales. Si esta relación es menor de 0.3, el residuo puede contener constituyentes tóxicos o se pueden requerir microorganismos aclimatados para su estabilización.

Si se desea tratar en una laguna con *Eichhornia Crassipes*, una de las plantas que más nutrientes remueve y el consumo de NTK puede disminuir en el agua de un 29 a 8 mg/l. Tenemos que notar que en algunos casos la *Lemna Minor* es la especie que requiere más cantidad de nutrientes, y que los requerimientos de nitrógeno con *Jacinto de Agua* son menores que en *Lemna sp.*

Sería importante desarrollar una planta de tratamiento, con tratamiento primario en monocultivos a base de *Lemna y Jacinto, y combinado*; ya que tiene altas remociones de DBO_5 , como se señala en otros estudios.

Aprovechar los recursos naturales y que no tienen ningún costo para el bienestar y salud de la sociedad. La *Lemna* nos ofrece una alternativa de tratamiento de aguas residuales, y que sería una tecnología de bajo costo, razón por la que su uso debe ser difundido como un recurso para el saneamiento.

El uso de *Lemna Minor* como enmienda para la agricultura compost podría llevarse a cabo tomando precauciones respecto a los metales pesados de importancia toxicológica, dado que esta planta acumula grandes cantidades de dicho metales Fe, Cu, Pb, As, Mn, B, Al y puede influenciar en la calidad de los suelos y cultivos.

Las cosechas periódicas de las plantas acuáticas pueden ser utilizadas para la producción de biogás sin riesgo toxicológico.

Aplicar un sistema terciario alternativo para la remoción de parámetros microbiológicos como por ejemplo las microalgas, que las especies de plantas acuáticas flotantes no pueden remover.

Para la medición del Oxígeno Disuelto en el medio acuático, es preferible medir directamente debajo de toda la planta acuática y a diferentes alturas del reactor, evaluando de esta manera las condiciones anaerobias con respecto a la profundidad de un reactor.

Desarrollar tecnología dirigida al uso posterior de la biomasa *Lemna* colectada en las plantas de tratamiento con el objetivo de hacer atractivos económicamente estas alternativas de la remoción de nutrientes en aguas. Por ejemplo el uso de *Lemna* en la medicina humana, alimento de animales, fertilizante, etc.

Se recomienda medir la composición química de todas las plantas acuáticas de importancia económica como alimento o como depuradoras de ambientes contaminados, esto es para el caso donde existan efluentes de minas cercanos a cuerpos de agua receptores para evitar problemas de bioacumulación de metales pesados en las plantas acuáticas.

Se debe hacer pruebas de tratamiento con *Lemna*, en diferentes condiciones de clima, altitud, para verificar la efectividad de tratamiento del agua residual. Ya que la *Lemna Minor* se adecua por encima de los 5°C de temperatura.

Se recomienda construir sistemas de mayor escala de flujo por gravedad y con una distribución homogénea del agua a lo ancho del reactor. En este sistema continuo se podría trabajar con mayor volumen de agua y con menor periodo de retención.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. MADUEÑO HUARUCO R.J. y SALVADOR TIXE J.C. (2009). “Evaluación del uso de la Planta acuática Lemna para determinar la eficiencia remocional de nutrientes a escala reactor del efluente de la laguna Secundaria de la planta CITRAR” Tesis para Optar el Título Profesional. Lima, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Ambiental. Pág. 123 – 125.
- [2]. VARGAS SOLIS D.B. (2003). “Mejoramiento y Ampliación de la Planta de Tratamiento del Pueblo Joven Julio C. Tello de Lurín” Tesis para Optar el Título Profesional. Lima, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Ambiental. Pág.129.
- [3]. CUPE FLORES E.D. y PORTOCARRERO CONTRERAS C.J. (2009). “Evaluación de la eficiencia de plantas acuáticas flotantes Lemna Minor (Lenteja de agua), Eichhorna Crassipes(Jacinto de agua) y Pistia Stratoides (Lechuga de agua), para el tratamiento de aguas residuales domésticas” Tesis para Optar el Título Profesional. Lima, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Ambiental. Pág.8 y 205.
- [4]. MONELLO D. (2009). Proyecto de Investigación sobre “Estudio sobre los resultados en la purificación de una laguna con macrofitas”. Lima, Perú, CITRAR. Pág.35 – 39.
- [5]. HODGSON G.L. (1969). “Effects of Temperature on the Growth and Development of Lemna minor, under Conditions of Natural Daylight”. Scottish Horticultural Research Institute, Dundee. Scotland –Inglaterra. Pág 1-3.
- [6]. MONETTE FRÉDERIC, (2006). “Comprehensive modelling of mat density effect on duckweed (Lemna minor) growth under controlled eutrophication”. École de technologie supérieure and École Polytechnique de Montréal. Canada. Pág.1-2.

- [7]. JAIN S.K. (1991). "Production of Biogas from *Azolla pinnata* R.Br. and *Lemna minor* L.:Effects of Heavy Metal Contamination". Centre for Rural Development and appropriate Technology. Indian Institute of technology. New Delhi – India. Pág. 1-4.

- [8]. M. STEVEN DRIEVER, (2004). "Growth limitation of *Lemna minor* due to high plant density". Department of Environmental Sciences, Aquatic Ecology and Water Quality Management Group. Wageningen University – Holanda. Pág.2-5.

- [9]. METCALF & EDDY, (2004). Wasterwater Engineering - Treatment and Reuse -Fourth Edition-Pág. 63.

- [10]. KUNST S., KRUSE T. y BURMESTER A, (2002). Sustainable Water and Soil Management-Springer-Pág. 106.

- [11]. SIGMUND REHM - GUSTAV ESPIG, (2009). Several others species besides the cultivated plants of the tropics and subtropics(3).

- [12]. VERLAG JOSEF MARGRAVE, (1991). Institute of Agronomus in the tropics IAT University of Göttingen. Scientific Books.

- [13]. MARIANO MONTAÑO ARMIJOS, (2011). Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) en el Instituto de Ciencias Químicas y Ambientales (ICQA)-Ing. Químico, MAE.

- [14]. ALVARO OROZCO JARAMILLO AND ALVARO SALAZAR ARIAS, (1985). Tratamiento Biológico de las Aguas Residuales-CEPIS.

- [15]. PAUL E.A. - F.E, (1996). Clark-Soil Microbiology and Biochemistry-Second Edition. Page. 22.

- [16]. GLAWE, (2005). "Azolla Utilization : Proceedings. The Fujian Academy of Agricultural Sciences", The International Rice Research Institute. Pág. 66-69.

- [17]. JOHSON G.V. (1986). "Evaluation of Salt Tolerance in „Azolla”.
- [18]. Ley N° 17752, Ley General de Aguas del 24.JUL.1969; y sus modificatorias. Decretos Supremos N° 261-69-AP y N° 007-83-SA del 17.MAR.1983
- [19]. Reglamento Nacional de Edificaciones (2007 . Plantas de Tratamiento de Agua para Consumo Humano OS 020. Viceministerio de Construcción y Saneamiento Dirección Nacional de Saneamiento. Pág. 191-210.
- [20]. MARTÍN W. (2009 . "Uso racional del agua" Tesis de Maestría en Eficiencia Energética. Cuba, Universidad Cienfuegos. Pág. 23.
- [21]. CEPES, Centro Peruano de Estudios Sociales (2000). "Los biofertilizantes". Manejo Ecológico de Suelos. Pág.5.
- [22]. RODRIGUES PEREZ C. (1995). "Acción Depuradora de algunas plantas acuáticas sobre las Aguas Residuales". Centro de Investigación Hidráulicas y facultad de Ingeniería Química. Ciudad de la Habana – Cuba. Pág.1-3.
- [23]. VALDERRAMA L.T. (2005). "Evaluación del Efecto del Tratamiento con Plantas Acuáticas en la Remoción de Indicadores de Contaminación Fecal en Aguas Residuales Domésticas". Unidad de Saneamiento y Biotecnología Ambiental – Universidad Javeriana. Bogotá – Colombia. Pág.3-7.
- [24]. SHIOMI N., SITO S. (2005). "Azolla Utilization : Proceedings. The Fujian Academy of Agricultural Sciences - Use of Azolla as a decontaminant in sewage treatment". Department of applied Biology – radiation Center of Osaka Prefecture. Osaka – Japón. Pág.170-175.
- [25]. GHOBRIAL M.G. (1998). "The Use of the Water Velvet Azolla filiculoides in Wastewater Treatment". Department of Hydro- The fresh weights of the water velvet were biology, National Institute of Oceanography and Fisheries, Kayet Bay, Alexandria - Egypt. Pág.170-175.

Anexo 1. Mediciones (CITRAR- Año 2010)

Anexo 1.1. Equipos de Medición



Foto.1. Centrifugadora del laboratorio FIA



Foto.2. Reactor 60Hz del laboratorio CITRAR



Foto.3. Potenciómetro del laboratorio CITRAR



Foto.4. Microscopio del laboratorio CITRAR

Comentario: Se muestran los equipos electrónicos calibrados que se utilizaron para la medición de los parámetros: PH, temperatura, Oxígeno Disuelto, Conductividad, Nitrógeno Amoniacal, Fosforo total y turbiedad, en este estudio de investigación.



Foto.5. Medidor de Oxígeno Disuelto del laboratorio CITRAR



Foto.6. Balanza utilizada en el laboratorio CITRAR para la medición de los pesos de las plantas acuáticas.



Foto.7. Espectrofotómetro multiparamétrico del laboratorio CITRAR



Foto.8. Conductímetro del laboratorio CITRAR

Comentario: Se muestran los equipos digitales calibrados que se utilizaron para la medición de los parámetros: PH, temperatura, Oxígeno Disuelto, Conductividad, Nitrógeno Amoniacal, Fosforo total y turbiedad, en este estudio de investigación.

Anexo 1.2. Medición de Fósforo Total y Nitrógeno Amoniacal



Foto.9. Set de prueba para las mediciones de los nutrientes: Fósforo total y Nitrogeno Amoniacal.

Comentario: Se empleó dos kits de pruebas y medio (2 ½) de la marca HACH con un Costo Total de 1225 nuevos soles. Con respecto al parámetro de Fósforo Total se utilizaron 75 viales, mientras que para el parámetro Nitrógeno Amoniacal se utilizaron 50 viales.

A. Medición de Fósforo Total



Foto.10. Medición de Fósforo Total en el laboratorio CITRAR



Foto.11. Viales de reactivos Ácido Hidrolizable

Foto.12. Reactivos en polvo: PhosVer 3 y Persulfato de potasio.





Foto.13. Solución Hidróxido de sodio 1.54 N (HACH)

Comentario: La medición de Fósforo Total tomaba un tiempo de 4 horas desde la toma de muestras hasta la obtención de los resultados que se medía cada 48 horas para los tres puntos de muestreo. Para este parámetro se necesitó el Reactor a 150°C para la digestión.

Se tuvo que tener mucho cuidado y además medirse lo más rápido como sea posible por ser sustancias cancerígenas y volátiles. Evitar que en el laboratorio exista flujo de viento ya que los reactivos están en polvo.

B. Medición de Nitrógeno Amoniacal



Foto.14. Medición de Nitrógeno Amoniacal en el laboratorio CITRAR



Foto.15. Reactivo diluyente (viales HACH)

Foto.16. Reactivos en polvo: Ammonia Salicylate y Ammonia Cyanurate



Comentario: La medición de Nitrógeno Amoniacal tomaba un tiempo de 2 horas desde la toma de muestras hasta la obtención de los resultados que se medía cada 48 horas para los tres puntos de muestreo.

Anexo 2. Cuadros de Resultados (CITRAR- Año 2010)

Anexo 2.1. Sistema Por Tandas: Resultados de Medición

CUADRO: Resultados de los parámetros fisicoquímicos en el reactor Control (Sin planta acuática) medidos en un período de 14 días.

	Días	pH	T °C	Turbiedad	OD mg/l
Sin planta acuática	0	10.40	31.2	404	11.58
	1	10.36	31.5	329	17.41
	5	7.54	28.0	77	0.47
	6	8.64	29.0	65	6.45
	8	8.86	30.2	60	8.00
	14	9.25	32.1	192	15.61

CUADRO: Resultados de los parámetros fisicoquímicos en el reactor cubierto con Jacinto de Agua medidos en un período de 14 días.

	Días	pH	T °C	Turbiedad	OD mg/l
E.Crassipes	0	10.42	32.0	410	17.60
	1	10.35	30.5	341	15.67
	5	8.97	26.9	281	11.86
	6	7.11	27.8	196	5.83
	8	6.93	28.9	163	5.00
	14	6.86	28.2	144	4.75

CUADRO: Resultados de los parámetros fisicoquímicos en el reactor cubierto con Lenteja de Agua medidos en un período de 14 días.

	Días	pH	T °C	Turbiedad	OD mg/l
L. Minor	0	10.42	31.6	407	14.4
	1	10.39	31.6	333	12.73
	5	10.20	27.7	309	15.56
	6	10.11	31.4	332	13.49
	8	9.88	32.2	316	14.00
	14	9.83	34.8	112	17.92

CUADRO: Resultados de los parámetros fisicoquímicos del efluente de la Laguna Terciaria de CITRAR.

	Fecha	OD mg/l	T °C
Efluente de la Laguna Terciaria	26/02/2010	19.74	31.5
	02/03/2010	23.43	-
	03/03/2010	22.38	29.8
	05/03/2010	26.92	31.4

Anexo 2.2. Sistema de Flujo Continuo: Resumen de los resultados de Medición de la Lenteja de Agua y Jacinto de Agua.

CUADRO: Resultados promedios de los parámetros fisicoquímicos en el reactor cubierto con **Lemna Minor** medidos para el Sistema Continuo en los tres puntos a lo largo del proceso de depuración de aguas residuales.

L. Minor	pH	Temp °C	Conduct.	P mg/l	PO ₄ mg/l	NH ₃ -N mg/l	Turbiedad	OD mg/l
Afluente	8.74	26.64	567.58	4.30	12.99	4.17	394.86	4.24
1er Efluente	8.57	25.79	577.76	2.14	6.55	1.50	305.29	4.83
2do Efluente	8.41	25.37	582.68	2.11	6.51	0.00	268.17	5.49

CUADRO: Resultados promedios de los parámetros fisicoquímicos en el reactor cubierto con **Jacinto de Agua** medidos para el Sistema Continuo en los tres puntos a lo largo del proceso de depuración de aguas residuales.

E.Crassipes	pH	Temp °C	Conduct.	P mg/l	PO ₄ mg/l	NH ₃ -N mg/l	Turbiedad	OD mg/l
Afluente	8.13	20.31	583.30	4.40	13.46	7.00	259.97	4.17
1er Efluente	7.71	20.35	495.42	2.66	8.15	1.17	195.35	5.77
2do Efluente	7.63	20.01	484.23	2.12	6.46	1.00	230.03	4.61

CUADRO: Resultados de la **biomasa** extraída manteniendo así el área cubierta en un 100% de la **Lemna Minor** según las fechas y número de reactor.

Medición de la Biomasa (g)		
Peso de la Lemna(g)	Reactor I	Reactor II
Fecha	07/04/2010	
Peso	80	80
Fecha	27/04/2010	
Extraído	93	147
Fecha	30/04/2010	
Extraído	0	100
Fecha	07/05/2010	
Extraído	71	160
Fecha	12/05/2010	
Extraído	436	126
Fecha	17/05/2010	
Extraído	121	0
Fecha	18/05/2010	
Extraído	0	223
Fecha	20/05/2010	
Extraído	421	308

CUADRO: Resultados de la **biomasa** extraída manteniendo así el área cubierta de 80 a un 100% de **Jacinto de Agua** según las fechas y número de reactor.

Medición de la Biomasa		
Peso (g)	Reactor I	Reactor II
Fecha	24/05/2010	
Peso	471	470
Fecha	05/06/2010	
Extraído	1289	991

CUADRO: Resultados de los parámetros fisicoquímicos en tres en el reactor cubierto con *Lemna Minor* medidos a la **entrada** del Sistema Continuo, de acuerdo a las horas: 9:00, 13:00 y 16:00; señalando el promedio al final de cada parámetro.

Afluente	pH				Turbiedad				Temp °C				OD mg/l				Conduct.			
	Horas	09:00	13:00	16:00	prom	09:00	13:00	16:00	prom	09:00	13:00	16:00	prom	09:00	13:00	16:00	prom	09:00	13:00	16:00
07/04/2010	9.2	9.0	9.6	9.2	493	475	462	476.7	29.4	40.9	31.7	34.0	6.3	4.6	8.5	6.4	598	745	628	657.0
08/04/2010	8.9	8.8	9.1	8.9	509	591	473	524.3	32.4	36.4	29.3	32.7	2.4	6.1	4.5	4.3	560	606	502	556.0
09/04/2010	8.9	9.7	10.3	9.6	392	636	503	510.3	37.3	34.1	27.9	33.1	1.7	9.3	12.2	7.7	681	654	603	646.0
10/04/2010	9.0	9.3	9.8	9.4	558	506	470	511.2	34.7	36.3	28.2	33.1	1.6	6.6	10.9	6.4	670	677	602	649.7
12/04/2010	9.5	9.2	9.3	9.3	749	441	436	542.0	28.4	30.6	28.5	29.2	5.5	11.3	9.7	8.8	606	695	601	634.0
14/04/2010	8.9	9.2	9.1	9.1	408	418	448	424.5	31.9	33.3	29.5	31.6	9.3	13.1	9.3	10.6	575	706	584	621.5
16/04/2010	8.9	9.5	8.9	9.1	418	421	459	432.7	28.3	32.5	30.4	30.4	7.5	15.0	8.9	10.5	499	623	566	562.7
19/04/2010	9.0	9.1	9.2	9.1	397	413	407	405.7	24.8	27.4	27.2	26.5	6.5	9.3	10.4	8.7	490	584	546	540.0
20/04/2010	9.1	8.9	8.8	8.9	376	441	433	416.7	21.3	26.0	28.0	25.1	5.5	10.5	6.9	7.6	481	614	535	543.3
21/04/2010	9.2	8.8	8.6	8.9	308	436.5	432	392.2	22.9	29.1	29.1	27.0	4.4	9.5	7.4	7.1	608	589.5	542	579.8
22/04/2010	8.8	8.7	9.0	8.8	299	432	444	391.7	24.0	32.1	30.1	28.7	6.6	8.5	7.4	7.5	502	565	583	550.0
23/04/2010	9.0	8.9	9.0	9.0	445	412	426	427.5	31.5	31.7	29.8	31.0	10.1	17.8	5.1	11.0	513	539	588	546.6
27/04/2010	8.6	9.0	9.2	8.9	457	421	392	423.3	26.5	32.5	29.2	29.4	1.6	9.3	1.3	4.1	499	579	610	562.5
29/04/2010	8.7	9.2	9.3	9.1	383	430	481	431.3	24.6	33.3	32.3	30.1	0.9	0.8	0.8	0.8	604	619	622	615.0
30/04/2010	8.7	9.5	9.2	9.1	401	443	392	412.0	24.0	31.0	29.2	28.1	0.9	1.2	1.3	1.1	618	548	610	591.8
03/05/2010	8.3	8.9	9.1	8.8	360	356	303	339.7	22.0	23.8	26.0	23.9	0.2	0.8	1.8	0.9	516	545	597	552.7
04/05/2010	8.5	8.9	8.6	8.7	277	282	266	275.0	22.9	23.2	23.4	23.2	0.7	0.7	1.7	1.0	503	556	501	520.0
05/05/2010	8.9	8.9	8.9	8.9	324	327	329	326.7	20.7	20.8	21.0	20.8	0.2	0.4	0.6	0.4	504	511	513	509.3
06/05/2010	8.6	8.6	8.7	8.6	374	378	376	376.0	21.4	22.0	23.1	22.2	0.6	0.6	0.8	0.7	492	498	506	498.7
07/05/2010	8.5	8.0	7.8	8.1	345	314	275	311.3	21.2	22.5	22.0	21.9	0.6	0.4	8.5	3.2	580	502	497	526.3
10/05/2010	8.0	8.1	8.3	8.1	195	259	399	284.3	20.5	24.1	26.8	23.8	0.6	0.4	0.9	0.6	536	615	705	618.7
11/05/2010	8.0	8.4	8.4	8.3	299	321	334	318.0	20.5	23.2	27.0	23.6	0.6	0.8	1.0	0.8	490	508	540	512.7
12/05/2010	8.8	8.2	8.4	8.5	420	359	327.5	368.8	25.8	24.0	25.1	25.0	1.2	3.7	0.9	1.9	592	499	524	538.3
13/05/2010	8.6	8.0	8.4	8.4	421	397	321	379.7	27.5	24.8	23.2	25.2	1.2	6.5	0.8	2.8	627	490	508	541.7
17/05/2010	7.8	7.7	7.8	7.7	401	397	388	395.3	20.5	21.0	21.0	20.8	1.2	0.6	0.6	0.8	593	596	592	593.7
18/05/2010	7.8	7.9	7.9	7.9	304	309	307	306.7	19.4	19.9	20.2	19.8	0.6	0.6	0.6	0.6	497	499	501	499.0
19/05/2010	8.8	8.2	8.2	8.4	420	295	307	340.7	25.8	21.6	21.5	23.0	1.2	1.2	1.2	1.2	592	514	519	541.7
20/05/2010	8.0	8.3	8.2	8.1	292	337	307	312.0	21.6	25.5	21.5	22.9	0.5	1.2	1.2	0.9	598	634	519	583.7
	Promedio			8.7	Promedio			394.9	Promedio			26.6	Promedio			4.2	Promedio			567.6

CUADRO: Resultados de los parámetros fisicoquímicos en tres en el reactor cubierto con *Lemna Minor* medidos a la **salida del primer reactor** del Sistema Continuo, de acuerdo a las horas: 9:00, 13:00 y 16:00; señalando el promedio al final de cada parámetro.

1er Efluente	pH				Turbiedad				Temp °C				OD mg/l				Conduct.								
	Horas	09:00	13:00	16:00	prom	09:00	13:00	16:00	prom	09:00	13:00	16:00	prom	09:00	13:00	16:00	prom	09:00	13:00	16:00	prom				
07/04/2010	10.2	10.6	10.6	10.5	443	497	508	482.7	28.0	32.2	30.2	30.1	14.9	12.3	11.6	12.9	520	635	742	632.3					
08/04/2010	10.1	10.5	10.6	10.4	463	478	505	482.0	26.3	30.3	29.2	28.6	9.3	13.1	4.5	9.0	495	586	591	557.3					
09/04/2010	10.4	10.7	10.5	10.5	479	499	506	494.7	29.3	31.9	26.8	29.3	10.3	10.1	6.1	8.8	556	747	601	634.7					
10/04/2010	10.1	10.3	10.2	10.2	475	476	496	482.2	30.5	32.1	27.1	29.9	7.6	7.4	8.2	7.7	660	726	605	663.7					
12/04/2010	9.7	9.8	9.9	9.8	463	473	485	473.7	26.6	30.0	27.3	28.0	5.7	12.2	10.3	9.4	614	654	609	625.7					
14/04/2010	9.2	9.9	9.9	9.7	426	472	462	453.3	30.2	32.0	28.4	30.2	8.7	13.4	9.5	10.5	603	727	608	646.0					
16/04/2010	9.2	9.9	9.8	9.6	446	435	439	440.0	28.3	31.2	29.4	29.6	8.8	14.5	8.7	10.7	534	642	607	594.3					
19/04/2010	9.2	9.3	9.5	9.4	383	531	344	419.3	25.0	26.7	27.4	26.4	7.9	8.2	8.5	8.2	513.5	521	493	509.2					
20/04/2010	9.3	9.4	9.4	9.4	320	388	365	357.7	21.6	27.1	27.1	25.3	7.1	8.6	7.2	7.6	493	516	609	539.3					
21/04/2010	9.3	9.2	9.4	9.3	322	383	341	348.7	21.8	28.8	28.2	26.3	7.1	10.7	10.1	9.3	408	540.5	615	521.2					
22/04/2010	8.1	9.0	9.0	8.7	260	378	401	346.3	33.9	30.4	31.1	31.8	6.3	12.9	10.1	9.8	530	565	590	561.7					
23/04/2010	8.8	8.9	9.5	9.1	336	361	416	370.8	30.8	31.3	29.3	30.5	6.6	9.0	5.0	6.8	513	547	608	556.1					
27/04/2010	7.7	8.8	9.2	8.5	263	303	392	319.3	26.2	31.1	29.2	28.8	3.6	6.8	1.3	3.9	594	645	610	616.2					
29/04/2010	7.7	8.7	8.7	8.3	217	245	248	236.7	23.5	30.9	31.1	28.5	1.6	4.6	4.9	3.7	642	743	749	711.3					
30/04/2010	7.7	8.5	8.2	8.1	246	276	217	246.3	23.6	27.6	28.2	26.5	1.7	4.7	3.4	3.3	659	650	642	650.2					
03/05/2010	7.1	7.2	7.7	7.4	201	246	186	211.0	21.5	22.9	25.2	23.2	0.6	0.7	1.9	1.0	519	570	534	541.0					
04/05/2010	7.2	7.4	7.3	7.3	152	192	145	163.0	22.1	23.1	23.3	22.8	1.0	1.1	2.0	1.4	576	590	522	562.7					
05/05/2010	7.2	7.2	7.2	7.2	171	170	172	171.0	20.6	20.5	21.3	20.8	0.6	0.6	0.7	0.6	544	539	553	545.3					
06/05/2010	7.3	7.4	7.5	7.4	166	169	171	168.7	21.5	21.9	22.9	22.1	1.8	1.9	2.2	2.0	503	508	517	509.3					
07/05/2010	7.4	7.8	7.2	7.5	160	168	168	165.3	20.6	23.6	21.9	22.0	1.0	0.7	0.8	0.8	504	510	507	507.0					
10/05/2010	7.2	7.3	7.8	7.4	112	148	135	131.7	20.2	24.9	26.4	23.8	0.8	2.1	1.0	1.3	489	516	670	558.3					
11/05/2010	7.6	7.5	7.6	7.6	82	101	172	118.3	20.6	22.7	26.3	23.2	0.6	0.7	0.7	0.7	579	519	664	587.3					
12/05/2010	8.2	7.9	8.0	8.1	357	211	246.5	271.5	23.3	23.0	24.8	23.7	2.0	0.8	0.8	1.2	572	513.5	586	557.2					
13/05/2010	8.0	8.4	8.4	8.3	405	321	321	349.0	27.3	23.2	23.2	24.6	1.2	0.8	0.8	0.9	541	508	508	519.0					
17/05/2010	7.3	7.2	7.3	7.3	193	190	191	191.3	20.3	21.2	21.3	20.9	2.0	0.3	0.4	0.9	557	554	553	554.7					
18/05/2010	7.4	7.5	7.5	7.4	199	201	203	201.0	20.1	20.4	20.6	20.4	0.4	0.4	0.4	0.4	573	591	583	582.3					
19/05/2010	8.2	8.0	7.8	8.0	347	206	210	254.3	23.3	21.6	21.2	22.0	2.0	1.2	1.2	1.5	572	507	566	548.3					
20/05/2010	7.6	8.1	7.8	7.8	188	197	210	198.3	21.8	25.8	21.2	22.9	0.3	1.2	1.2	0.9	592	599	566	585.7					
	Promedio				8.6	Promedio				305.3	Promedio				25.8	Promedio				4.8	Promedio				577.8

CUADRO: Resultados de los parámetros fisicoquímicos en tres en el reactor cubierto con *Lemna Minor* medidos a la **salida del segundo reactor** del Sistema Continuo, de acuerdo a las horas: 9:00, 13:00 y 16:00; señalando el promedio al final de cada parámetro.

2do Efluente	pH				Turbiedad				Temp °C				OD mg/l				Conduct.								
	Horas	09:00	13:00	16:00	prom	09:00	13:00	16:00	prom	09:00	13:00	16:00	prom	09:00	13:00	16:00	prom	09:00	13:00	16:00	prom				
07/04/2010	9.3	9.6	10.6	9.8	366	485	498	449.7	28.0	32.2	28.6	29.6	3.5	4.4	10.7	6.2	539	555	736	610.0					
08/04/2010	9.9	10.2	10.1	10.1	468	514	469	483.7	30.1	32.4	28.1	30.2	5.8	6.1	6.3	6.1	527	583	544	551.3					
09/04/2010	10.4	10.3	10.6	10.4	488	548	515	517.0	29.7	33.7	25.1	29.5	9.3	8.5	10.5	9.4	604	741	690	678.3					
10/04/2010	10.3	10.3	10.2	10.3	481	491	510	494.0	30.2	31.2	26.1	29.2	12.4	11.8	10.5	11.5	704	737	631	690.5					
12/04/2010	9.3	9.7	9.8	9.6	453	469	505	475.7	26.5	29.2	27.1	27.6	5.9	9.0	10.4	8.4	620	671	571	620.7					
14/04/2010	9.2	9.9	9.1	9.4	433	586	456	491.7	28.1	30.2	28.4	28.9	13.3	11.1	10.5	11.6	677	709	616	667.3					
16/04/2010	8.9	9.8	8.5	9.0	402	415	407	408.0	28.0	30.4	29.7	29.4	8.3	13.2	10.5	10.7	577	673	661	637.0					
19/04/2010	9.0	9.2	9.2	9.2	348.5	304	299	317.2	24.8	26.8	26.9	26.2	9.0	4.3	12.7	8.7	552.5	655	531	579.5					
20/04/2010	9.2	8.3	8.5	8.6	295	339	356	330.0	21.6	21.6	26.9	23.4	9.7	9.8	10.7	10.0	528	533	638	566.3					
21/04/2010	9.2	8.9	9.2	9.1	294	364.5	300	319.5	21.9	25.7	29.3	25.6	9.7	10.6	10.6	10.3	526	558	643	575.7					
22/04/2010	8.5	9.6	9.8	9.3	312	390	393	365.0	23.4	29.7	30.3	27.8	10.4	11.5	10.6	10.9	528	583	606	572.3					
23/04/2010	8.9	8.7	8.8	8.8	324	299	400	340.8	30.6	30.7	29.4	30.2	8.8	15.8	5.9	10.2	523	558	635	572.1					
27/04/2010	7.4	8.8	9.2	8.4	196	251	392	279.7	25.2	30.7	29.2	28.3	2.9	10.9	1.3	5.0	552	583.5	610	581.7					
29/04/2010	7.6	8.8	9.0	8.5	196	203	216	205.0	23.5	30.6	31.2	28.4	3.2	6.0	6.1	5.1	570	609	616	598.3					
30/04/2010	7.6	8.8	8.4	8.2	219	237	197.5	217.8	23.4	27.6	28.3	26.4	4.9	6.0	4.9	5.3	752	689	627	689.3					
03/05/2010	7.2	7.3	7.8	7.4	175	175	179	176.3	21.9	22.8	25.4	23.4	1.7	2.3	3.8	2.6	518	522	638	559.3					
04/05/2010	7.2	7.2	7.3	7.2	142	143	168	151.0	23.2	23.2	23.2	23.2	1.6	1.7	2.5	1.9	585	548	524	552.3					
05/05/2010	7.3	7.3	7.3	7.3	144	142	144	143.3	20.8	20.9	21.5	21.1	1.1	1.2	1.3	1.2	509	518	518	515.0					
06/05/2010	7.1	7.1	7.2	7.1	115	118	123	118.7	21.4	22.1	22.8	22.1	2.0	2.1	2.4	2.1	556	561	589	568.7					
07/05/2010	7.2	7.4	7.1	7.2	119	115	110	114.7	21.0	22.7	21.9	21.9	1.5	2.3	2.2	2.0	587	618	513	572.7					
10/05/2010	7.5	7.4	7.8	7.6	98	112	86	98.7	20.2	25.1	25.7	23.7	1.2	4.7	6.7	4.2	548	556	551	551.7					
11/05/2010	7.2	7.4	7.5	7.3	83	90	95	89.3	20.6	22.7	25.4	22.9	1.5	2.0	2.6	2.0	508	517	555	526.7					
12/05/2010	7.6	7.9	7.9	7.8	234	205.5	208	215.8	21.4	23.0	24.3	22.9	2.2	1.7	1.7	1.9	555	512.5	532	533.0					
13/05/2010	8.5	8.4	8.4	8.4	224	321	321	288.7	24.6	23.2	23.2	23.7	1.2	1.5	0.8	1.2	605	508	508	540.3					
17/05/2010	7.3	7.1	7.2	7.2	93	81	82	85.3	20.6	21.1	21.2	21.0	2.2	1.1	1.0	1.4	504	503	502	503.0					
18/05/2010	7.2	7.2	7.2	7.2	99	97	98	98.0	20.2	20.3	20.5	20.3	1.0	1.0	1.0	1.0	597	602	596	598.3					
19/05/2010	7.6	7.4	7.2	7.4	234	110	93	145.7	21.4	21.5	21.2	21.4	2.2	1.2	1.2	1.5	555	508	506	523.0					
20/05/2010	7.2	7.9	7.2	7.4	94	79	93	88.7	20.4	25.2	21.2	22.3	1.7	1.2	1.2	1.4	596	640	506	580.7					
	Promedio				8.4	Promedio				268.2	Promedio				25.4	Promedio				5.5	Promedio				582.7

CUADRO: Resultados promedios de los parámetros fisicoquímicos de **nutrientes** en el reactor cubierto con **Lenteja de Agua** medidos para el Sistema Continuo en los tres puntos a lo largo del proceso de depuración de aguas residuales.

Resultados de Nutrientes en presencia de L.Minor						
Fecha	Punto	P	PO ₄	P ₂ O ₅	NH ₃	NH ₃ -N
07-abr	c/alga	8.5	17	17	-	-
07-abr	Afluente	3.06	9.70	7.15	-	-
	Efluente N°1	-	-	-	-	-
	Efluente N°2	-	-	-	-	-
10-abr	Afluente	6.04	16.10	12.08	-	-
	Efluente N°1	3.06	9.45	7.09	-	-
	Efluente N°2	-	-	-	-	-
14-abr	Afluente	4.29	13.35	10.01	-	-
	Efluente N°1	1.94	5.90	4.36	-	-
	Efluente N°2	1.99	6.05	4.52	-	-
30-abr	Afluente	3.40	10.4	7.80	-	-
	Efluente N°1	2.95	9	6.70	-	-
	Efluente N°2	2.35	7.25	5.40	-	-
07-may	Afluente	4.30	13.2	9.85	1	1
	Efluente N°1	2.90	8.85	6.6	-	-
	Efluente N°2	2.20	6.7	5	-	-
08-may	Afluente	5.00	15.3	11.5	5	4
	Efluente N°1	-	-	-	-	-
	Efluente N°2	-	-	-	-	-
09-may	Afluente	3.70	11.4	8.5	5	4
	Efluente N°1	2.20	6.75	5.05	0	0
	Efluente N°2	-	-	-	-	-
10-may	Afluente	4.60	14.1	10.5	9	7
	Efluente N°1	0.00	0.05	0.05	1	1
	Efluente N°2	-	-	-	-	-
11-may	Afluente	5.40	16.6	12.4	8	7
	Efluente N°1	2.10	6.5	4.85	3	2
	Efluente N°2	2.45	7.5	5.6	0	0
12-may	Afluente	3.20	9.85	7.35	2	2
	Efluente N°1	2.20	6.75	5.05	3	3
	Efluente N°2	2.25	7.35	5.50	0	0
13-may	Afluente	-	-	-	-	-
	Efluente N°1	2.30	7	5.25	1	1
	Efluente N°2	2.20	6.8	5.1	0	0
14-may	Afluente	-	-	-	-	-
	Efluente N°1	2.45	7.5	5.6	2	2
	Efluente N°2	2.05	6.25	4.65	0	0
15-may	Afluente	-	-	-	-	-
	Efluente N°1	-	-	-	-	-
	Efluente N°2	2.10	6.45	4.8	0	0
16-may	Afluente	-	-	-	-	-
	Efluente N°1	-	-	-	-	-
	Efluente N°2	1.40	4.25	3.2	0	0

CUADRO: Resultados de los parámetros fisicoquímicos en tres en el reactor cubierto con *E.Crasipies* medidos a la **entrada** del Sistema Continuo, de acuerdo a las horas: 9:00, 13:00 y 16:00; señalando el promedio al final de cada parámetro.

Afluente	pH				Turbiedad				Temp °C				OD mg/l				Conduct.								
	Horas	9:00	13:00	16:00	prom	9:00	13:00	16:00	prom	9:00	13:00	16:00	prom	9:00	13:00	16:00	prom	9:00	13:00	16:00	prom				
24/05/2010	8.0	7.9	7.9	7.9	171	308	293	257.3	19.2	19.7	19.5	19.5	4.8	4.8	4.1	4.5	648	630	613	630.3					
25/05/2010	8.0	8.0	7.9	8.0	227	258	241	242.0	18.6	18.6	19.0	18.7	4.0	3.9	4.0	4.0	494	497	553	514.7					
26/05/2010	8.0	8.0	8.0	8.0	184	184	189	185.7	18.2	18.4	18.5	18.4	4.0	3.9	3.9	3.9	488	491	493	490.7					
27/05/2010	7.9	8.0	8.5	8.1	259	306	259	274.7	20.8	22.3	19.9	21.0	4.8	4.9	4.4	4.7	518	610	563	563.7					
28/05/2010	8.1	8.2	9.1	8.5	243	238	242	241.0	23.1	24.2	21.2	22.8	5.0	5.0	4.9	5.0	530	631	633	598.0					
31/05/2010	8.0	8.0	8.0	8.0	241	243	253	245.7	19.7	19.6	20.3	19.9	1.8	1.9	2.0	1.9	801	787	685	757.7					
01/06/2010	8.0	7.9	7.8	7.9	278	275	274	275.7	18.6	19.2	20.0	19.3	3.3	3.3	3.2	3.3	572	563	585	573.3					
02/06/2010	8.3	8.2	8.1	8.2	259	289	310	286.0	19.6	21.2	20.8	20.5	4.3	4.4	4.4	4.4	568	475	558	533.7					
03/06/2010	8.3	8.3	8.3	8.3	289	301	303	297.7	20.6	22.3	22.2	21.7	4.9	5.0	4.9	4.9	583	589	588	586.7					
04/06/2010	8.3	8.9	8.3	8.5	288	291	303	294.0	20.5	21.3	22.2	21.3	5.2	5.3	4.9	5.1	582	583	588	584.3					
	Promedio				8.1	Promedio				260.0	Promedio				20.3	Promedio				4.2	Promedio				583.3

CUADRO: Resultados de los parámetros fisicoquímicos en tres en el reactor cubierto con *E.Crasipies* medidos a la **salida del primer reactor** del Sistema Continuo, de acuerdo a las horas: 9:00, 13:00 y 16:00; señalando el promedio al final de cada parámetro.

1er Efluente	pH				Turbiedad				Temp °C				OD mg/l				Conduct.								
	Horas	9:00	13:00	16:00	prom	9:00	13:00	16:00	prom	9:00	13:00	16:00	prom	9:00	13:00	16:00	prom	9:00	13:00	16:00	prom				
24/05/2010	7.6	7.7	7.7	7.7	322	328	326	325.3	19.1	19.6	19.7	19.5	3.5	3.5	3.3	3.4	459	462	451	457.3					
25/05/2010	7.8	7.8	7.7	7.8	290	297	286.5	291.2	18.5	18.4	19.0	18.6	3.1	3.1	2.7	2.9	450	453	455	452.5					
26/05/2010	7.9	7.9	7.8	7.9	243	245	247	245.0	18.0	18.3	18.3	18.2	2.1	2.1	2.1	2.1	443	497	458	466.0					
27/05/2010	7.8	7.8	7.8	7.8	237	309	227	257.7	19.8	22.4	20.4	20.9	4.8	4.9	4.7	4.8	478	605	487	523.3					
28/05/2010	7.9	8.5	7.7	8.0	188	189	197	191.3	23.3	24.2	22.5	23.3	7.3	7.4	7.3	7.3	494	596	516	535.3					
31/05/2010	7.2	7.2	7.2	7.2	105	115	122	114.0	19.8	19.9	20.1	19.9	4.1	4.2	4.2	4.2	446	449	441	445.3					
01/06/2010	7.6	7.5	7.4	7.5	139	136	133	136.0	18.9	19.3	19.9	19.4	5.2	5.2	5.1	5.2	540	535	534	536.3					
02/06/2010	7.9	7.5	7.6	7.7	136	137	138	137.0	19.6	20.8	20.7	20.4	6.6	6.8	6.0	6.5	450	416	539	468.3					
03/06/2010	7.9	8.0	8.0	8.0	126	128	129	127.7	20.8	22.6	22.4	21.9	5.2	5.7	5.7	5.5	531	537	541	536.3					
04/06/2010	7.9	7.2	8.0	7.7	127	129	129	128.3	20.4	21.4	22.4	21.4	4.8	5.9	5.7	5.5	537	522	541	533.3					
	Promedio				7.7	Promedio				195.4	Promedio				20.4	Promedio				4.7	Promedio				495.4

CUADRO: Resultados de los parámetros fisicoquímicos en tres en el reactor cubierto con *E.Crasipies* medidos a la **salida del segundo reactor** del Sistema Continuo, de acuerdo a las horas: 9:00, 13:00 y 16:00; señalando el promedio al final de cada parámetro.

2do Efluente	pH				Turbiedad				Temp °C				OD mg/l				Conduct.			
	Horas	9:00	13:00	16:00	prom	9:00	13:00	16:00	prom	9:00	13:00	16:00	prom	9:00	13:00	16:00	prom	9:00	13:00	16:00
24/05/2010	7.8	7.7	7.8	7.8	343	337	339	339.7	19.2	19.8	19.6	19.5	2.6	2.5	2.1	2.4	460	449	453	454.0
25/05/2010	7.6	7.6	7.8	7.7	311	306	313	310.0	18.3	18.5	19.1	18.6	2.2	2.2	2.2	2.2	465	468	475	469.3
26/05/2010	7.9	7.9	7.9	7.9	295	296	287	292.7	18.1	18.3	18.6	18.3	2.2	2.2	2.2	2.2	447	502	497	482.0
27/05/2010	7.6	7.7	7.9	7.7	289	318	335	314.0	19.7	22.5	20.8	21.0	4.5	4.6	5.7	4.9	458	633	509	533.3
28/05/2010	7.8	8.8	7.9	8.2	270	280	298	282.7	21.3	24.4	23.0	22.9	9.0	9.1	9.2	9.1	472	542	521	511.7
31/05/2010	7.1	7.1	7.1	7.1	183	194	186	187.7	20.0	19.8	20.2	20.0	5.0	5.0	4.9	4.9	444	443	439	442.0
01/06/2010	7.2	7.1	7.1	7.1	157	155	150	154.0	18.7	19.3	19.8	19.3	5.0	5.0	5.0	5.0	538	502	436	492.0
02/06/2010	7.1	7.1	8.4	7.5	138	144	150	144.0	11.3	20.8	20.2	17.4	4.9	5.2	5.2	5.1	479	424	513	472.0
03/06/2010	7.6	7.7	7.7	7.7	137	139	138	138.0	19.5	22.4	22.3	21.4	4.9	5.6	5.5	5.3	492	492	497	493.7
04/06/2010	7.6	7.7	7.7	7.7	137	138	138	137.7	20.5	21.9	22.3	21.6	4.6	4.7	5.5	4.9	493	487	497	492.3
	Promedio			7.6	Promedio			230.0	Promedio			20.0	Promedio			4.6	Promedio			484.2

CUADRO: Resultados promedios de los parámetros fisicoquímicos de nutrientes en el reactor cubierto con **Jacinto de Agua** medidos para el Sistema Continuo en los tres puntos a lo largo del proceso de depuración de aguas residuales.

Resultados de Nutrientes en presencia de E.Crasipies						
Fecha		P	PO ₄	P ₂ O ₅	NH ₃	NH ₃ -N
24-may	c/alga					
24-may	Afluente	4.9	15.05	11.25	11	9
	Efluente N°1	-	-	-	-	-
	Efluente N°2	-	-	-	-	-
25-may	Afluente	4.4	13.5	10.1	9	8
	Efluente N°1	-	-	-	-	-
	Efluente N°2	-	-	-	-	-
26-may	Afluente	5.15	15.7	11.75	8	7
	Efluente N°1	3.6	11.05	8.25	0	0
	Efluente N°2	-	-	-	-	-
27-may	Afluente	4.05	12.4	9.3	11	9
	Efluente N°1	3.6	10.95	8.2	3	2
	Efluente N°2	-	-	-	-	-
28-may	Afluente	4.25	12.95	9.7	11	9
	Efluente N°1	3.05	9.35	7	2	1
	Efluente N°2	3	9.1	6.8	2	2
29-may	Afluente	3.65	11.15	8.35	0	0
	Efluente N°1	2.1	6.45	4.8	1	1
	Efluente N°2	1.45	4.5	3.35	1	1
30-may	Afluente	-	-	-	-	-
	Efluente N°1	1.8	5.55	4.15	1	1
	Efluente N°2	1.5	4.6	3.4	0	0
31-may	Afluente	-	-	-	-	-
	Efluente N°1	1.8	5.55	4.15	1	1
	Efluente N°2	2.3	6.85	5.15	2	1
01-jun	Afluente	-	-	-	-	-
	Efluente N°1	-	-	-	-	-
	Efluente N°2	2.3	7.05	5.25	2	2
02-jun	Afluente	-	-	-	-	-
	Efluente N°1	-	-	-	-	-
	Efluente N°2	2.15	6.65	4.95	0	0

NOTA: - significa sin medición

Anexo 2.1. Sistema de Flujo Continuo: Resultados para la obtención del TRH

CUADRO: Cálculo del caudal teórico y del TRH teórico en cada acuario con respecto al volumen del medio acuático.

Medición del Caudal	Nº	T (seg)	V(ml)	Q (ml/s)	Caudal Promedio: 0,73 cm ³ /s	Área(cm ²)= 7200
	1	10.78	8.5	0.79		H (cm)= 15
	2	32.44	24	0.74		Q(cm ³ /s)= 0.73
	3	22.82	17	0.74		TR (s)= 147945
	4	31.25	22.5	0.72		TR (h)= 41.1
	5	26.13	19.2	0.73		TR (d)= 1.7
	6	39.09	28	0.72		
	7	25.87	18.9	0.73		
	8	35.82	25.8	0.72		

CUADRO: Cálculo del TRH en cada acuario con respecto a las concentraciones de sal de cocina (conductividad), empleado como traza.

		Conductividad (ms)						
Fecha		26/3/10	27/3/10	29/3/10	30/3/10	31/3/10	1/4/10	5/4/10
Días	Unidad	0	1	3	4	5	6	7
Afluente	ms	12	0.90	0.79	0.68	0.70	0.60	0.66
Punto 1	ms	1.168	9.05	12.89	11.72	11.13	9.72	7.84
Punto 2	ms	*	7.69	13.05	12.23	11.12	9.69	8.07
Punto 3	ms	*	7.65	13.11	12.18	11.09	9.68	8.10
Punto 4	ms	*	7.48	13.10	12.25	11.06	9.66	8.05
Efluente 1	ms	0.651	7.46	13.03	12.28	10.68	9.48	8.14
Punto 5	ms	0.747	1.37	2.68	3.88	4.44	4.71	6.25
Punto 5	ms	*	1.30	2.16	3.50	4.42	4.71	6.22
Punto 6	ms	*	1.31	2.17	3.52	4.40	4.72	6.22
Punto 7	ms	*	1.31	2.14	3.45	3.78	4.60	6.21
Efluente	ms	0.732	1.31	2.17	3.42	3.98	4.72	6.22

NOTA: * significa sin medición

Anexo 3. Fotografías de las tres plantas acuáticas y experimentos en Flujo Continuo

Anexo 3.1. Fotografías de las plantas acuáticas



Foto 1. Plantas acuáticas: (a) *Azolla Filiculoides*, (b) *Lemna Minor* y (c) *Eichhornia Crassipes*

Anexo 3.2. Fotografías de las experimentos en Flujo Continuo



Foto 2. Vista de los sistemas de flujo continuo utilizando Azolla F. en la PTAR-Suderburgo (Alemania)



Foto 3. Vista de los sistemas de flujo continuo utilizando Lemna M. y Eichhornia C. en la PTAR-CITRAR (Perú)



Foto 4. Se muestran las plantas acuáticas conocidas como Lenteja de agua y Jacinto de agua.

Anexo 4. PTAR de Suderburgo

La PTAR está en la capacidad de efectuar la depuración y descontaminación de un 95% de contaminantes físico químicos y biológicos superando el nivel exigido por la ordenanza municipal y contribuyendo a mejorar las condiciones ambientales. A continuación se muestra una vista panorámica de la PTAR de Suderburgo señalando los componentes en los procesos de tratamiento de aguas residuales.



Figura 1: Vista panorámica de la PTAR de lodos activados de Suderburgo señalando las partes del sistema.

La ciudad de Suderburgo genera un caudal promedio máximo de aguas residuales de 100 m³/h en tiempos secos y 156 m³/h en tiempos de lluvia, de las cuales todo recibe tratamiento. Los receptores del efluente de la PTAR son dos lagunas llamadas Raber y Hardau.



Figura 2: Vista amplia donde se muestra el curso hidrográfico de vertimiento del efluente de la PTAR de Suderburgo.

1. Objetivos de la PTAR-Suderburgo

- ✓ Brindar un adecuado tratamiento de aguas residuales a la población de la ciudad más grande del distrito de Uelzen, operando con un caudal promedio anual de 35.56 l/s.
- ✓ Evacuación de efluentes al río cumpliendo con las normas medioambientales de este país.
- ✓ Utilización de lodos secados y tratados, especialmente para el uso agrícola de la misma ciudad.
- ✓ Permitir a los estudiantes y profesores de la facultad de llevar a cabo trabajos de investigación como tesis doctorales.

2. Ubicación

La PTAR se encuentra en la ciudad de Suderburgo, ubicada en el norte de Alemania. Según la división geográfica de la ciudad de Suderburgo pertenece a la región Bajo Sajonia y tiene una extensión territorial de 129.84 km² siendo su elevación de 57 m sobre el nivel del mar. Suderburgo es la ciudad más grande en el distrito de Uelzen y los habitantes de esta ciudad se dedican principalmente a la agricultura y ganadería. Esta ciudad tiene una población estimada de 4,559 (31 Diciembre 2009) y una densidad poblacional de 35 hab/km².



Figura 3: Vista panorámica de la PTAR de Suderburgo y sus alrededores, parte de la ciudad cubierta mayormente de áreas agrícolas.

Las eficiencias de remociones de contaminantes físico químicas y biológicas varían ampliamente dependiendo de la temporada, observándose cambios en el tanque clarificador (color).

4. Procesos de tratamiento

El sistema de tratamiento se puede clasificar según sus procesos de tratamiento como se muestra a continuación.

A. Mecanismo de verificación

La entrada de agua cruda es mediante el bombeo desde un tanque de recepción de aguas residuales domésticas (sistema de alcantarillado) y de agua de lluvia (sistema pluvial).

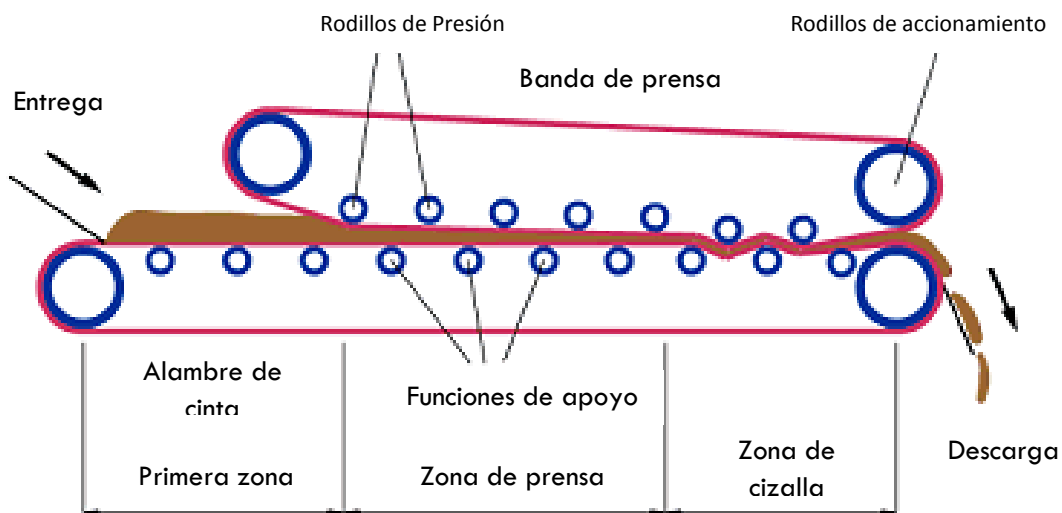


Figura 5: Se muestra el sistema de retención de arena mediante rodillos en el pretratamiento de la PTAR de Suderburgo.

Para el Pretratamiento (hidrocribados, colector de arena y retención de grasas) Microfiltración: Trabajan a baja carga, con muy poco desnivel, y están basados en una pantalla giratoria de acero o material plástico a través de la cual circula el agua. Las partículas sólidas quedan retenidas en la superficie interior del microfiltro que dispone de un sistema de lavado continuo para mantener las mallas limpias.



Figura 6: Se muestra a la izquierda la extracción de arena a un contenedor y a la derecha la caseta del sistema de pretratamiento de la PTAR de Suderburgo (Año 2009).

El concentrador de grasas extrae de manera continua las grasas separadas en el desarenador-desengrasador, las cuales se recogen con una elevada cantidad de agua. En el concentrador se produce una flotación natural de las grasas, procediéndose a su extracción mediante un mecanismo de rasquetas de barrido superficial.

Los clasificadores de arenas extraen de manera continua las arenas enviadas desde el desarenador-desengrasador por la bomba de arenas, con una elevada cantidad de agua entran en el clasificador, donde por medio de un tornillo sinfín, son extraídas, escurridas y descargadas sobre un contenedor.

B. Tratamiento Secundario: Procesos de Clarificación

El proceso biológico aerobio tipo lodos activados está formado por: Tratamiento Anaerobio, zanjas de oxidación y un clarificador secundario de alto rendimiento.

Las Zanjas de oxidación (**retorno de lodos del clarificador**) consiste en el tanque de aireación donde es realizada la reacción biológica aerobia, y la materia orgánica proveniente del tanque anaeróbica es transformada en CO_2 y H_2O por acción de los microorganismos aerobios, es decir en presencia de oxígeno, lográndose la reproducción de millones de bacterias vivas y activas que se encargarán de degradar la materia orgánica, reduciendo así los niveles de contaminación. En este tanque se mantiene en equilibrio la biomasa (bacterias y

materia orgánica) para que se lleve a cabo el proceso de degradación y a la vez exista la formación de flóculos.



Figura 7: Clarificador Automático del Sistema de Lodos Activados, sistema final de la PTAR de la ciudad de Suderburgo (Año 2009).

En el **Clarificador** o decantador circular secundario llamado también desnatador o sedimentador, los flóculos formados en el tanque de oxidación biológica pasan al tanque de sedimentación, debido a que adquieren mayor peso, por gravedad precipitan al fondo de este tanque y el agua se clarifica por flujo ascendente, recolectándose el agua clara en una canaleta que se encuentra en la superficie de dicho tanque, mientras que los flóculos que pasaron al fondo, una parte se recircula nuevamente a los tanques de oxidación biológica para mantener el equilibrio.



Figura 8: Clarificador del Sistema de Lodos Activados de donde se extrajo la muestra. Eliminación de algas y natas formadas en la superficie del agua (Año 2009).

C. Disposición final de lodos

El tratamiento de lodos es una parte de los lodos activados referido al proceso de retiro de lodos, lo que comúnmente se conoce como “Lodos Excedentes”. Además consta de un digestor de lodos o biosólidos, un espesador (eliminación de agua) y un lecho de lodos (Recolectado como abono).

El “**Espesador mecánico de lodos**” permite el espesamiento de los lodos recogidos por el decantador. El efecto se consigue gracias al lento giro de brazos compuestos de puntales y crucetas en los que se fijan a su vez las gradas verticales y los raspadores de lodo ajustables. En el fondo se monta rasquetas en forma de espina de pez que recogen el fango del fondo del espesador y lo envían al reactor central.



Figura 9: Se muestra a la izquierda el lecho de secado y a la derecha el digestor de lodos (Año 2009)

A continuación se muestra en la Fig. 1.14 un esquema, señalando criterios del diseño de esta PTAR como el caudal de entrada y las respectivas dimensiones de cada sistema de tratamiento.

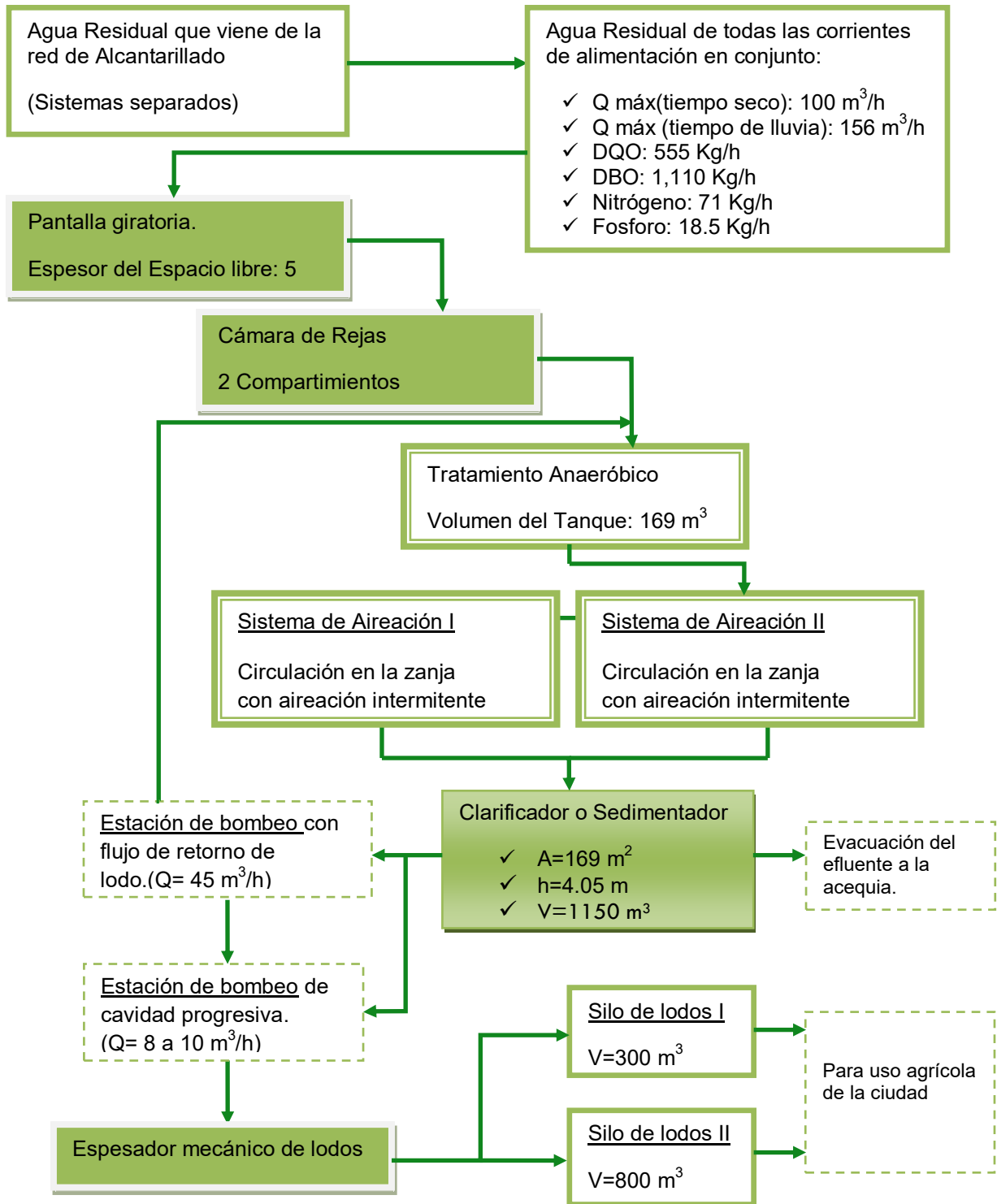


Figura 10: Diagrama de flujo de la PTAR de Suderburgo, ciudad con un tamaño poblacional de 9,250 habitantes –Año 2009.

5. Misión en la PTAR-Suderburgo

La misión fue analizar el funcionamiento de la PTAR, detectar sus fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas.

Por otra parte y más importante fue el realizar un proyecto de investigación denominado "Utilización de la planta acuática *Azolla filiculoides* para la remoción de nutrientes del efluente de la PTAR de Suderburgo" donde se analizaron los efectos ambientales en un sistema de tratamiento con plantas acuáticas.

6. Metas Alcanzadas

Entre las metas alcanzadas tenemos: concluir que hay una excelente operación tecnificada de la PTAR, además de su alta eficiencia en la remoción de contaminantes de las aguas residuales a pesar de la alta influencia ambiental como la temperatura y la precipitación.

Se realizaron diferentes tipos de pilotos para observar la eficiencia de la planta acuática *Azolla filiculoides*.

7. Normas Alemanas

La PTAR está afiliada y supervisada por el Departamento de Agua y Medio Ambiente de la Universidad de Ciencias Aplicadas de la Escuela Técnica Superior de la Baja Sajonia conjuntamente con la Municipalidad de Suderburgo.

Las condiciones especiales de descarga de aguas residuales no domésticas, para el vertimiento de aguas residuales de empresas industriales y comerciales o entidades públicas (por ejemplo, hospitales), se muestran en el cuadro siguiente.

Para determinar las características físicas y químicas de las aguas residuales, las investigaciones necesarias de acuerdo con los métodos estándar alemanas para aguas residuales y lodos, se utilizan en la versión actual, las normas pertinentes de DIN de la Comisión de Normas Técnicas de Gestión del Agua del Instituto Alemán de Normalización de Berlín.

Además, en su reglamento establece los límites máximos permisibles. En la siguiente Tabla se presenta un resumen de los principales parámetros a tenerse en cuenta en la descarga de las aguas residuales a un cuerpo de agua:

Tabla 2: Resumen de las Normas Actuales Alemanas para Aguas Receptoras.

	Parámetros	Métodos de medición	Dimensión	Límite
1.	Parámetros físicos			
1.1	Temperatura	DIN 38404-4	°C	35
1.2	pH-Wert	DIN 38404-5	-	6.5 - 10
2.	Inorgánicos (disuelto)			
2.1	Amonio, calculado como el nitrógeno	DIN 38406-5 o DIN EN ISO 11732	mg N/l	100
2.2	Nitritos, calculado como el nitrógeno	DIN EN 26777	mg N/l	5
2.3	Sulfato	DIN 38405-5	mg/l	400
3.	Sustancias inorgánicas (total)			
3.1	Arsénico	DIN EN ISO 11969	mg/l	0.1
3.2	Plomo	DIN 38406-2	mg/l	0.5
3.3	Cadmio	DIN EN ISO 5961	mg/l	0.1
3.4	Cromo	DIN EN 1233	mg/l	0.5
3.5	Cromo-VI	DIN 38405-24	mg/l	0.1
3.6	Cobre	DIN 38406-7	mg/l	0.5
3.7	Níquel	DIN 38406-11	mg/l	0.5
3.8	Mercurio	DIN EN 1483	mg/l	0.05
3.9	Plata	DIN 38406-18	mg/l	0.1
3.10	Zinc	DIN 38406-8	mg/l	2
3.11	Estaño	DIN EN ISO 11969	mg/l	2

Anexo 5. Normas Nacionales

La calidad del agua residual depende del uso de las aguas del cuerpo receptor al cual se vierte, o del uso directo de las aguas residuales tratadas.

La ley general de Aguas Decreto Ley N° 17752 y los Decretos supremos N° 261-69-AP y N° 007-83-SA clasifica los cuerpos de agua en general ya sea terrestre o marítima del país respecto a sus usos de la siguiente manera:

- II. Aguas de abastecimiento doméstico con simple desinfección.
- III. Aguas de abastecimientos domésticos con tratamiento equivalente a procesos combinados de mezcla y coagulación, sedimentación, filtración y cloración, aprobados por el Ministerio de Salud.
- IV. Aguas para riego de vegetales de consumo crudo y bebida de animales.
- V. Aguas de zonas recreativas de contacto primario (baños y similares).
- VI. Aguas de zonas de pesca de mariscos bivalvos.
- VII. Aguas de zonas de Preservación de Fauna Acuática y Pesca
- VIII. Recreativa o Comercial.

Además, en su reglamento establece los límites máximos permisibles para cada curso de agua. En la Tabla siguiente se presenta un resumen de los principales parámetros a tenerse en cuenta en la descarga de las aguas residuales a un cuerpo de agua:

Tabla: Resumen de las Normas Peruanas para Aguas Receptoras

Parámetros	Clase I	Clase II	Clase III	Clase IV	Clase V	Clase VI
Coliformes Termotolerantes, NMP/100mL	0	4000	1000	1000	200	4000
Coliformes Totales, NMP/100mL	8.8	20 000	5 000	5 000	1 000	20 000
Oxígeno Disuelto, mg/L	3	3	3	3	5	4
DBO, mg/L	5	5	15	10	10	10
Metales, mg/L						
Cromo (+6)	0.05	0.05	1	n/d	0.05	0.05
Mercurio	0.002	0.002	0.01	n/d	0.0001	0.0002 96h
Cobre	1.0	1.0	0.5	n/d	0.01	LC50x0.1
Plomo	0.05	0.05	0.1	n/d	0.01	0.03
Cadmio	0.01	0.01	0.05	n/d	0.0002	0.004
Niquel	0.002	0.002	1+	n/d	0.002	96h LC50x0.02
Cianuro	0.08	0.08	0.10	n/d	0.022	0.022
Fenoles	0.0005	0.001	1+	n/d	0.001	0.10

NOTA: n/d significa valor no disponible

1+ significa valor a ser determinado, en caso de sospechar su presencia usar provisionalmente los valores de la columna V.

Los resultados en este trabajo de investigación fueron comparados con la información del cuadro anterior brindada por la Ley General de Aguas, especialmente en los experimentos de monocultivos (Sistemas, Por Tandas y de Flujo Continuo) realizados con la *Lemna Minor* y *Eichhornia Crassipes*.

ÍNDICE

CAPITULO I	- 0 -
MARCO TEÓRICO	- 9 -
1.1. AGUAS RESIDUALES.....	- 9 -
1.2. CONSTITUYENTES DEL AGUA RESIDUAL	- 9 -
1.3. NUTRIENTES.....	- 9 -
1.4. REMOCIÓN DE NUTRIENTES	- 1 -
1.5. DISMINUCIÓN DE LAS ALGAS	- 2 -
1.6. CLASES DE PLANTAS ACUÁTICAS	- 2 -
1.7. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON PLANTAS ACUÁTICAS	- 3 -
1.8. PROPIEDADES DE LAS PLANTAS ACUÁTICAS EN SISTEMAS DE TRATAMIENTO	- 4 -
1.8.1. Propiedades para utilizar <i>Azolla Filiculoides</i> en el tratamiento de aguas residuales domésticas y como reúso.....	- 8 -
1.8.2. Propiedades para utilizar <i>Lemna Minor</i> en el tratamiento de aguas residuales domésticas y como reúso.....	- 9 -
1.8.3. Propiedades para utilizar <i>Eichornia Crassipes</i> en el tratamiento de aguas residuales domésticas y como reúso.....	- 10 -
1.9. PARÁMETROS QUE SE ANALIZAN EN LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS	- 11 -
1.9.1. Parámetros físicos.....	- 11 -
1.9.2. Parámetros químicos	- 12 -
1.9.3. Parámetros biológicos	- 16 -
1.9.4. Organismos patógenos.....	- 17 -
1.10. NORMAS NACIONALES	- 19 -
CAPÍTULO II	- 21 -
DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	- 21 -
2.1. ANTECEDENTES DEL PROYECTO	- 21 -
2.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	- 21 -
2.2.1. Identificación del Problema	- 21 -
2.2.2. Formulación del Problema.....	- 22 -
2.2.3. Justificación de la investigación.....	- 23 -
2.3. OBJETIVO PRINCIPAL	- 24 -
2.4. OBJETIVOS SECUNDARIOS.....	- 24 -
2.5. HIPÓTESIS	- 24 -
2.6. VARIABLES DEL ESTUDIO	- 26 -
2.6.1. Variables Dependientes	- 26 -
2.6.2. Variables Independientes.....	26
2.6.3. Variables Intervinientes.....	26
CAPÍTULO III	27
3.1. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN UTILIZANDO AZOLLA F.....	27

3.1.1. Escenario de la Investigación	27
3.1.2. Metodología del Cultivo	27
3.1.3. Infraestructura de los sistemas.....	28
3.1.3.1. Sistema Por tandas	28
3.1.3.2. Sistema Continuo	28
3.1.3.3. Sistema Por tandas en acuarios.....	29
3.1.4. Crecimiento de la <i>Azolla Filiculoides</i>	29
3.1.4.1. Ubicación de los Reactores para el Cultivo de la <i>Azolla. f.</i>	29
3.1.4.2. Elección de la Planta Acuática <i>Azolla Filiculoides</i>	30
3.1.4.3. Descripción de las Tinajas y Acuarios de Cultivo	31
3.1.4.4. Frecuencia y puntos de medición del Peso de la biomasa.....	32
3.1.5. Descripción de los Experimentos realizados.....	33
3.1.5.1. Primer Experimento – Por Tandas	33
3.1.5.2. Segundo Experimento – Flujo Continuo.....	39
3.1.5.3. Tercer Experimento – Por Tandas en Acuarios	45
3.1.6. Pruebas de Laboratorio	51
3.1.6.1. Pruebas de Laboratorio con la Biomasa	51
3.2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN UTILIZANDO LEMAN M. Y EICHHORNIA C.	57
3.2.1. Escenario de la Investigación	57
3.2.2. Metodología en el Cultivo	57
3.2.3. Crecimiento de las Plantas Acuáticas en Acuarios.....	58
3.2.3.1. Ubicación de los acuarios de Cultivo	58
3.2.3.2. Descripción de los reactores de cultivo	58
3.2.3.3. Descripción del medio acuático para el cultivo	59
3.2.4. Infraestructura de los Sistemas	59
3.2.4.1. Sistema Por tandas	60
3.2.4.2. Sistema Continuo	63
CAPÍTULO IV	82
DISCUSION DE RESULTADOS	82
4.1. DISCUSIÓN DE RESULTADOS UTILIZANDO AZOLLA.....	82
4.1.1. Diagnóstico de los Sistemas de Tratamiento	82
4.1.2. Calidad de las aguas tratadas.....	82
4.1.3. Funcionamiento de los Experimentos.....	83
4.1.4. Estudio Fisiológico de la <i>Azolla Filiculoides</i>	84
4.1.5. Análisis Comparativo del Comportamiento de <i>Azolla Filiculoides</i>	92
4.1.5.1. Sistema Por Tandas	92
4.1.5.2. Sistema de Flujo Continuo.....	100
4.1.5.3. Sistema por Tandas en Acuarios	107
4.1.6. Comportamiento de la Biomasa.....	115
4.1.6.1. Determinación de la carga en sistemas por Tandas	115

4.1.6.2.	Determinación de la carga en flujo continuo	120
4.1.6.3.	Determinación de la carga Por tandas en Acuarios	129
4.1.7.	Estudio de la Capacidad de Remoción.....	134
4.1.7.1.	Análisis en el Sistema Por Tandas.....	134
4.1.7.2.	Análisis en el Sistema Flujo Continuo	134
4.2.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS UTILIZANDO LENTEJA DE AGUA Y JACINTO DE AGUA	137
4.2.1.	Calidad de las Aguas Tratadas	137
4.2.2.	Diagnóstico de los Sistemas por Tandas	137
4.2.2.1.	Diseño y Ejecución del Sistema por Tandas	137
4.2.2.2.	Funcionamiento del Sistema Por Tandas.....	138
4.2.3.	Diagnóstico de los Sistemas Continuo	139
4.2.3.1.	Diseño y Ejecución del Sistema Continuo	139
4.2.3.2.	Puesta en marcha del Sistema Continuo con <i>Lemna y Jacinto</i>	139
4.2.3.3.	Desarrollo del Tratamiento mediante <i>Lemna y Jacinto</i>	140
4.2.3.4.	Parámetros en el Sistema de Flujo Continuo.....	140
4.2.4.	Estudio Fisiológico de las Especies Aplicadas	143
4.2.4.1.	Sistema por Tandas: Análisis fisiológico de <i>Lemna Minor y Eichhornia Crassipes</i>	143
4.2.4.2.	Sistema de Flujo Continuo: Análisis fisiológico de <i>Lemna minor</i>	145
4.2.4.3.	Sistema de Flujo Continuo: Análisis fisiológico de <i>Eichhornia Crassipes</i> 149	
4.2.5.	Interpretación de Resultados Físicos-Químicos	152
4.2.5.1.	Sistema Por tandas con <i>Lemna Minor y Eichhornia crassipes</i>	152
4.2.5.2.	Sistema de Flujo Continuo con <i>Lemna Minor</i>	156
4.2.5.3.	Sistema de Flujo Continuo con <i>Eichhornia crassipes</i>	164
4.2.6.	Comportamiento de la Biomasa de las Plantas Acuáticas	172
4.2.6.1.	Sistema Por Tandas: Determinación de la carga de <i>Lemna Minor y Eichhornia Crassipes</i>	172
4.2.6.2.	Sistema Continuo: Determinación de la Carga Operacional con <i>Lemna Minor</i> 177	
4.2.6.3.	Sistema Continuo: Determinación de la carga Operacional con <i>Eichhornia Crassipes</i>	189
4.2.7.	Estudio de la Capacidad de Remoción en el Sistema por Tandas.....	195
4.2.7.1.	Análisis Comparativo de Parámetros Físicoquímicos	196
4.2.7.2.	Análisis Comparativo de Parámetros en Biomasa	200
4.2.8.	Estudio de la Capacidad de Remoción en el Sistema Continuo	201
4.2.8.1.	Análisis Comparativo de Parámetros Físicoquímicos	201
4.2.8.2.	Análisis Comparativo de Parámetros en Biomasa	211
CAPÍTULO V	216	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	216	
5.1.	Conclusiones para <i>Azolla Filiculoides</i>	216
5.2.	Conclusiones para <i>Lemna Minor y Jacinto De Agua</i>	221

5.3. RECOMENDACIONES	227
BIBLIOGRAFÍA.....	230
Anexo 1. Mediciones (CITRAR- Año 2010).....	233
Anexo 2. Cuadros de Resultados (CITRAR- Año 2010).....	237
Anexo 3. Fotografías de las tres plantas acuáticas y experimentos en Flujo Continuo	247
Anexo 3.1. Fotografías de las plantas acuáticas	247
Anexo 3.2. Fotografías de las experimentos en Flujo Continuo.....	248
Anexo 4. PTAR de Suderburgo.....	250
1. Objetivos de la PTAR-Suderburgo	251
2. Ubicación.....	251
3. Clima.....	252
4. Procesos de tratamiento.....	253
5. Misión en la PTAR-Suderburgo	258
6. Metas Alcanzadas.....	258
7. Normas Alemanas	258
Anexo 5. Normas Nacionales.....	260

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. 1: Principales plantas acuáticas. Fuente EPA (2003).....	3
Figura 1. 2: Notación científica de los helechos en estudio.	5
Figura 1. 3: Características físicas de los helechos en estudio.	6
Figura 1. 4: Hábitat de cultivo o crecimiento de los helechos en estudio.	7
Figura 1. 5: Vista panorámica de la PTAR de lodos activados de Suderburgo señalando las partes del sistema.	250
Figura 1. 6: Vista amplia donde se muestra el curso hidrográfico de vertimiento del efluente de la PTAR de Suderburgo.	250
Figura 1. 7: Vista panorámica de la PTAR de Suderburgo y sus alrededores, parte de la ciudad cubierta mayormente de áreas agrícolas.	251
Figura 1. 8: El mapa izquierdo muestra el país dividido en regiones y la derecha el distrito de Uelzen con sus ciudades.	252
Figura 1. 9: Se muestra el sistema de retención de arena mediante rodillos en el pretratamiento de la PTAR de Suderburgo.	253
Figura 1. 10: Se muestra a la izquierda la extracción de arena a un contenedor y a la derecha la caseta del sistema de pretratamiento de la PTAR de Suderburgo (Año 2009).	254
Figura 1. 11: Clarificador Automático del Sistema de Lodos Activados, sistema final de la PTAR de la ciudad de Suderburgo (Año 2009).	255
Figura 1. 12: Clarificador del Sistema de Lodos Activados de donde se extrajo la muestra. Eliminación de algas y natas formadas en la superficie del agua (Año 2009).	255
Figura 1. 13: Se muestra a la izquierda el lecho de secado y a la derecha el digestor de lodos (Año 2009)	256
Figura 1. 14: Diagrama de flujo de la PTAR de Suderburgo, ciudad con un tamaño poblacional de 9,250 habitantes – Año 2009.	257
Figura 3. 1: Se señala la ubicación de los reactores utilizados en los dos primeros experimentos en el Año 2009.	29
Figura 3. 2: Se muestra el reactor que se uso en los dos primeros experimentos (Año 2009).	31
Figura 3. 3: Se muestra el reactor que se utilizó en el tercer experimento (Año 2009).	31
Figura 3. 4: Se muestra las distintas balanzas utilizadas en laboratorio y en campo (Año 2009).	32
Figura 3. 5: Se muestra la captación para los sistemas por tandas y de flujo continuo (Año 2009).	33
Figura 3. 6: El 1er mes se cultivo sin cubierta en contacto con la lluvia (Año 2009).	34
Figura 3. 7: A partir del segundo mes se cultivo con cubierta evitando el contacto con la lluvia (Año 2009).	35
Figura 3. 8: Fotografía del primer experimento en pleno funcionamiento (Año 2009).	37
Figura 3. 9: Se señala el cultivo de la Azolla f. al inicio del primer experimento (julio 2009) con un crecimiento favorable de 72.48 g/d.	37
Figura 3. 10: Se señala el cultivo de la Azolla f. del primer experimento (Agosto 2009) con un crecimiento menor de 9.90 g/d.	38
Figura 3. 11: Se señala el cultivo de la Azolla f. del primer experimento (Septiembre 2009) con un crecimiento poco favorable de 12.29 g/d.	38
Figura 3. 12: Se señala el cultivo de la Azolla f. del primer experimento (Octubre 2009) con un crecimiento mucho menor de 7.18 g/d.	38
Figura 3. 13: Segundo experimento para la determinación de remoción de nutrientes (Suderburgo- Año 2009).	39
Figura 3. 14: Primer reactor con Azolla del segundo experimento para la determinación de la remoción de nutrientes (Año 2009).	44
Figura 3. 15: Segundo reactor con Azolla de la planta piloto para la determinación de la remoción de nutrientes (Año 2009).	44
Figura 3. 16: Tercer reactor con Azolla de la planta piloto para la determinación de la remoción de nutrientes (Año 2009).	44
Figura 3. 17: Vista de las muestras que se utilizó en este experimento (Suderburgo-Año 2009).	45

Figura 3. 18: Vista del tercer experimento en pleno funcionamiento, haciendo la medición del pH (Sudburgo-Año 2009).	48
Figura 3. 19: Muestras de las plantas extraídas de cada acuario, colocadas en vasos de vidrio (Año 2009).	52
Figura 3. 20: Vista de la balanza electrónica utilizada para la medición de los pesos en cada capsula (Año 2009).	52
Figura 3. 21: Las seis capsulas con la Azolla filiculoides listas para llevarlas a la estufa (Año 2009).	52
Figura 3. 22: Vista exterior de la Estufa utilizada a una temperatura de 105°C (Año 2009).	52
Figura 3. 23: Estufa para una temperatura de 105°C (Año 2009).	52
Figura 3. 24: Mufla para una temperatura de 550°C (Año 2009).	52
Figura 3. 25: Microscopio utilizado en el laboratorio de la Universidad de Sudburgo (Año 2009).	54
Figura 3. 26: Microorganismo encontrado en el helecho Azolla Filiculoides (Año 2009).	54
Figura 3. 27: Microorganismos encontrados en el fondo de cada acuario (Año 2009).	54
Figura 3. 28: Vista de un acuario, con tres distintas muestras, Azolla filiculoides, rizomas y lodo depositado en cada acuario (Año 2009).	55
Figura 3. 29: Extracción del medio mediante una bombilla, dejando a las rizomas y al lodo depositado en cada acuario (Año 2009).	55
Figura 3. 30: Rizomas y lodo depositado mediante la acción de sedimentación, después de retirarse el medio (Año 2009).	55
Figura 3. 31: Conos Inhoff utilizados para la extracción de los lodos que se depositaron en cada acuario (Año 2009).	56
Figura 3. 32: Cada cono depositó un volumen promedio de 14 ml de lodo en cada acuario (Año 2009).	56
Figura 3. 33: Colador utilizado para la extracción de las rizomas del conjunto de biomasa depositado al fondo de cada acuario (Año 2009).	56
Figura 3. 34: Llevado a la estufa a 105°C con el fin de obtener la materia seca (Año 2009).	56
Figura 3. 35: Acuario empleado para los sistemas por tandas y de flujo continuo (CITRAR-Año 2010).	58
Figura 3. 36: Se muestra la captación para los sistemas por tandas y de flujo continuo (CITRAR-Año 2010).	59
Figura 3. 37: Medición de Oxígeno Disuelto en los tres estanques (CITRAR-Año 2010).	62
Figura 3. 38: Muestras de los estanques con Lemna, Eichhorna y sin ninguna planta acuática (CITRAR-Año 2010).	62
Figura 3. 39: Sistema de flujo continuo que se diseñó para el cultivo de la Lenteja de agua y Jacinto en CITRAR-UNI (Año 2010).	65
Figura 3. 40: Comportamiento del caudal de ingreso al sistema en CITRAR-UNI (Año 2010).	66
Figura 3. 41: Comportamiento de la conductividad en distintos puntos del sistema utilizando un trazador en CITRAR-UNI (Año 2010).	67
Figura 3. 42: Medición de Caudal en el afluente del sistema de remoción (CITRAR-Año 2010).	68
Figura 3. 43: Muestreo en los tres puntos del sistema de tratamiento (CITRAR-Año 2010).	72
Figura 3. 44: Primer punto de medición del sistema de tratamiento (CITRAR-Año 2010).	73
Figura 3. 45: Segundo punto de medición del sistema de tratamiento (CITRAR-Año 2010).	74
Figura 3. 46: Tercer punto de medición del sistema de tratamiento (CITRAR-Año 2010).	75
Figura 3. 47: Interferencias de organismos vivos en los reactores con Lemna Minor (CITRAR-Año 2010).	76
Figura 3. 48: Medición del peso de la macrofitas Lemna Minor en los reactores (CITRAR-Año 2010).	77
Figura 3. 49: Observación de la macrofitas Lemna Minor mediante un microscopio (CITRAR-Año 2010).	78
Figura 4. 1: Dimensionamiento en el desarrollo de Azolla filiculoides (Sudburgo-Año 2009).	85
Figura 4. 2: Comportamiento en el desarrollo de Azolla f. en el sistema por tandas (Sudburgo-Año 2009).	86
Figura 4. 3: Comportamiento en el desarrollo de Azolla f. en el sistema de flujo continuo (Sudburgo-Año 2009).	87
Figura 4. 4: Comportamiento en el desarrollo de Azolla f. en el sistema de flujo continuo (Sudburgo-Año 2009).	88
Figura 4. 5: Área ocupada por la Azolla f. en el sistema Por tandas en acuarios del 2do intento con una tasa de crecimiento de un 7.88 g/m ² /d (Sudburgo-Año 2009).	89
Figura 4. 6: Área ocupada por la Azolla f. en el sistema Por tandas en acuarios del 1er intento con una tasa de crecimiento de un 12.22 g/m ² /d (Sudburgo-Año 2009).	90
Figura 4. 7: Estanque con Azolla Filiculoides para los sistemas "por tandas" (Sudburgo-Año 2009).	92

Figura 4. 8: Comportamiento de pH y temperatura en el cultivo de Azolla f. (Suderburgo-Año 2009).	93
Figura 4. 9: Comportamiento de conductividad y cloruros en el cultivo de Azolla f. (Suderburgo-Año 2009).	94
Figura 4. 10: Comportamiento de COT, DQO y DQO/COT en el cultivo de Azolla f. (Suderburgo-Año 2009).	95
Figura 4. 11: Remoción de N. amoniaco (Amonio) y NTK en el cultivo de Azolla f. (Suderburgo-Año 2009).	96
Figura 4. 12: Remoción de nitritos y nitratos en el cultivo de Azolla f. (Suderburgo-Año 2009).	97
Figura 4. 13: Remoción de fósforo total y fosfatos en el cultivo de Azolla f. (Suderburgo-Año 2009).	98
Figura 4. 14: Comportamiento de Fluoruro y sulfato en el cultivo de Azolla f. (Suderburgo-Año 2009).	99
Figura 4. 15: Estanques con Azolla Filiculoides para los sistemas “de flujo continuo” (Suderburgo-Año 2009).	100
Figura 4. 16: Comportamiento de pH y temperatura en el cultivo de Azolla f. (Suderburgo-Año 2009).	100
Figura 4. 17: Remoción de conductividad y cloruros en el cultivo de Azolla f. (Suderburgo-Año 2009).	101
Figura 4. 18: Comportamiento de DQO, DBO ₅ y COT en el cultivo de Azolla f. (Suderburgo-Año 2009).	102
Figura 4. 19: Comportamiento de N. amoniaco (Amonio) y NTK en el cultivo de Azolla f. (Suderburgo-Año 2009).	103
Figura 4. 20: Comportamiento de nitritos y nitratos en el cultivo de Azolla f. (Suderburgo-Año 2009).	104
Figura 4. 21: Comportamiento de Orto-Fosfato, Fosfato y Fósforo total en el cultivo de Azolla f. (Suderburgo-Año 2009).	105
Figura 4. 22: Comportamiento de Fluoruro y sulfato en el cultivo de Azolla Filiculoides (Suderburgo-Año 2009).	106
Figura 4. 23: Evaluación de concentraciones de cationes en solución, en el cultivo de Azolla (Suderburgo-Año 2009).	106
Figura 4. 24: Estanques con Azolla Filiculoides para el sist. en acuarios “por tandas” del 1er intento-13% en Solución de nutrientes (Suderburgo-Año 2009).	108
Figura 4. 25: Estanques con Azolla Filiculoides para el sist. en acuarios “por tandas” del 2do intento-15% en Solución de nutrientes (Suderburgo-Año 2009).	109
Figura 4. 26: Comportamiento de pH y temperatura en el cultivo de Azolla f. (Suderburgo-Año 2009).	110
Figura 4. 27: Comportamiento de conductividad y cloruros en el cultivo de Azolla f. (Suderburgo-Año 2009).	111
Figura 4. 28: Comportamiento de Amonio, NTK, Nitritos y Nitratos en el cultivo de Azolla f. (Suderburgo-Año 2009).	112
Figura 4. 29: Comportamiento de DQO y COT en el cultivo de Azolla f. (Suderburgo-Año 2009).	113
Figura 4. 30: Comportamiento de Orto-Fosfato y Fósforo total (Suderburgo-Año 2009).	114
Figura 4. 31: Comportamiento de Fluoruro y sulfato en el cultivo de Azolla f. (Suderburgo-Año 2009).	115
Figura 4. 32: Comportamiento del Peso húmedo en el cultivo de Azolla filiculoides (Suderburgo-Año 2009).	117
Figura 4. 33: Comportamiento del Peso seco en el cultivo de Azolla filiculoides (Suderburgo-Año 2009).	118
Figura 4. 34: Comportamiento de la Biomasa de Azolla filiculoides durante 95 días desde verano a otoño (Suderburgo-Año 2009).	120
Figura 4. 35: Comportamiento de la cosecha en materia seca de Azolla filiculoides (Suderburgo-Año 2009).	121
Figura 4. 36: Comportamiento de la Carga Operacional con Azolla filiculoides fresca (Suderburgo-Año 2009).	123
Figura 4. 37: Comportamiento de la Carga Operacional con Azolla filiculoides en peso seco (Suderburgo-Año 2009).	124
Figura 4. 38: Comportamiento de la tasa de crecimiento en peso húmedo en la época de verano (Suderburgo-Año 2009).	126
Figura 4. 39: Comportamiento de la tasa de crecimiento en peso húmedo en la época de otoño (Suderburgo-Año 2009).	127
Figura 4. 40: Comportamiento del Peso húmedo en el cultivo de Azolla filiculoides (Suderburgo-Año 2009).	129
Figura 4. 41: Comportamiento del Peso húmedo cubierto con Azolla filiculoides (Suderburgo-Año 2009).	130
Figura 4. 42: Comportamiento del Peso seco cubierto con Azolla filiculoides (Suderburgo-Año 2009).	130
Figura 4. 43: Comportamiento de los sistemas por tandas ubicadas en CITRAR, sin planta acuática, con L. Minor y con E. Crassipes (Año 2010).	144
Figura 4. 44: Comportamiento de Lemna Minor en sistema de flujo continuo ubicada en CITRAR (Año 2010).	146

Figura 4. 45: Comportamiento de <i>Eichhornia Crassipes</i> en sistema de flujo continuo ubicada en CITRAR (Año 2010)	150
Figura 4. 46: Sistemas por tandas, con <i>Lemna minor</i> , <i>Eichhornia crassipes</i> y sin planta acuática (del 25 de Febrero al 12 de Marzo) ubicadas en CITRAR-UNI (Año 2010)	152
Figura 4. 47: Comportamiento de pH y temperatura en los estanques (del 25 de Febrero al 12 de Marzo del 2010) ubicadas en CITRAR-UNI.	153
Figura 4. 48: Remoción de la Turbiedad en los estanques (del 25 de Febrero al 12 de Marzo del 2010) ubicadas en CITRAR-UNI.	155
Figura 4. 49: Comportamiento de Oxígeno Disuelto en los estanques (del 25 de Febrero al 12 de Marzo del 2010) ubicadas en CITRAR-UNI.	155
Figura 4. 50: Estanques con Sistemas de "flujo continuo" cubierto con <i>Lemna Minor</i> ubicada en CITRAR-UNI (del 07 de Abril al 20 de Mayo del 2010)	156
Figura 4. 51: Comportamiento de pH y temperatura de los 3 puntos de muestreo cubierto con <i>Lemna M</i> en el Sistema Continuo (del 07 de Abril al 20 de Mayo del 2010 en CITRAR)	157
Figura 4. 52: Comportamiento de la Conductividad medido en los 3 puntos del Sistema Continuo cubierto con <i>Lemna M</i> . (del 07 de Abril al 20 de Mayo del 2010) en CITRAR-UNI.	158
Figura 4. 53: Remoción de la Turbiedad medida en los 3 puntos del Sistema Continuo cubierto con <i>Lemna M</i> . (del 07 de Abril al 20 de Mayo del 2010) en CITRAR-UNI.	159
Figura 4. 54: Comportamiento del Oxígeno Disuelto medidos en los 3 puntos de muestreo del Sistema Continuo cubierto con <i>Lemna M</i> . (del 07 de Abril al 20 de Mayo del 2010) en CITRAR-UNI.	160
Figura 4. 55: Resultados de las mediciones de concentración en N. Amoniacal en los 3 puntos del Sistema Continuo cubierto con <i>Lemna M</i> . (del 07 de Abril al 20 de Mayo del 2010) en CITRAR-UNI.	161
Figura 4. 56: Remoción de fósforo total en el cultivo de <i>Lemna M</i> . (del 07 de Abril al 20 de Mayo del 2010) en CITRAR-UNI.	162
Figura 4. 57: Remoción de orto fosfatos en el cultivo de <i>Lemna M</i> . (del 07 de Abril al 20 de Mayo del 2010) en CITRAR-UNI.	163
Figura 4. 58: Estanques con Sistemas de "flujo continuo" cubierto con <i>Eichhornia crassipes</i> ubicada en CITRAR-UNI (del 24 de Mayo al 4 de Junio del 2010)	164
Figura 4. 59: Comportamiento de pH y temperatura de los 3 puntos de muestreo cubierto con <i>Eichhornia Crassipes</i> en el Sistema Continuo (del 24 de Mayo al 4 de Junio del 2010 en CITRAR)	165
Figura 4. 60: Comportamiento de conductividad en el cultivo de <i>Eichhornia crassipes</i> (del 24 de Mayo al 4 de Junio del 2010 en CITRAR)	166
Figura 4. 61: Remoción de la Turbiedad en el cultivo de <i>Eichhornia crassipes</i> (del 24 de Mayo al 4 de Junio del 2010 en CITRAR)	167
Figura 4. 62: Comportamiento del Oxígeno disuelto en el cultivo de <i>Eichhornia crassipes</i> (del 24 de Mayo al 4 de Junio del 2010 en CITRAR)	168
Figura 4. 63: Remoción de N. amoniacal en el cultivo de <i>Eichhornia crassipes</i> (del 24 de Mayo al 4 de Junio del 2010 en CITRAR)	169
Figura 4. 64: Remoción de fósforo total y fosfatos en el cultivo de <i>Eichhornia crassipes</i> (del 24 de Mayo al 4 de Junio del 2010 en CITRAR)	170
Figura 4. 65: Remoción de orto fosfatos en el cultivo de <i>Eichhornia crassipes</i> (del 24 de Mayo al 4 de Junio del 2010 en CITRAR)	171
Figura 4. 66: Sistemas por tandas, con <i>Lemna minor</i> , <i>Eichhornia crassipes</i> y sin planta acuática ubicadas en CITRAR (Año 2010)	172
Figura 4. 67: Comportamiento del área ocupada por las plantas acuáticas versus los días (CITRAR- Año 2010)	173
Figura 4. 68: Comportamiento de las Cargas Operacionales de ambas plantas acuáticas (CITRAR- Año 2010)	175
Figura 4. 69: Estanques con <i>Lemna Minor</i> para los sistemas de "flujo continuo" (CITRAR- Año 2010)	177
Figura 4. 70: Tasa de Cosecha de la <i>Lemna Minor</i> en el 1er Reactor del Sistema Continuo (CITRAR- Año 2010)	179
Figura 4. 71: Tasa de Cosecha de la <i>Lemna Minor</i> en el 2do Reactor del Sistema Continuo (CITRAR- Año 2010)	180
Figura 4. 72: Comportamiento de las Cargas Operacionales Crítica de la <i>Lemna Minor</i> fresca (CITRAR- Año 2010)	180
Figura 4. 73: Comportamiento de la Biomasa de la <i>Lemna Minor</i> fresca en los 44 días (CITRAR- Año 2010)	184

Figura 4. 74: Comportamiento de la Densidad de Peso Húmedo por Superficie de la Lemna Minor (CITRAR- Año 2010)	186
Figura 4. 75: Comportamiento del área ocupada por las plantas acuáticas versus los días (CITRAR- Año 2010) ...	187
Figura 4. 76: Característica morfológica de la Lemna Minor en ambos reactores del sistema continuo (CITRAR- Año 2010)	188
Figura 4. 77: Estanques con Eichhornia crassipes para los sistemas de “flujo continuo” (CITRAR- Año 2010)	189
Figura 4. 78: Comportamiento del área ocupada por las plantas acuáticas versus los días (CITRAR- Año 2010) ...	190
Figura 4. 79: Comportamiento de la Biomasa del Jacinto de Agua fresca en los 12 días (CITRAR- Año 2010)	191
Figura 4. 80: Comportamiento de la Densidad de Peso Húmedo por Superficie del Jacinto de Agua (CITRAR- Año 2010)	193
Figura 4. 81: Comportamiento de cosecha diaria de Eichhornia Crassipes (CITRAR- Año 2010)	194
Figura 4. 82: Comportamiento de pH y temperatura en los tres estanques (CITRAR- Año 2010)	196
Figura 4. 83: Comportamiento de la Turbiedad en los tres estanques (CITRAR- Año 2010)	198
Figura 4. 84: Comportamiento de Oxígeno Disuelto en los tres estanques (CITRAR- Año 2010)	199
Figura 4. 85: Comportamiento de la temperatura por especie en el Sistema Continuo ubicados en CITRAR-UNI (Año 2010)	202
Figura 4. 86: Comportamiento del pH por especie en Sistema Continuo, ubicados en CITRAR-UNI (Año 2010)	203
Figura 4. 87: Comportamiento de la Turbiedad por especie en Sistema Continuo, ubicados en CITRAR-UNI (Año 2010)	204
Figura 4. 88: Comportamiento del Oxígeno Disuelto por especie en Sistema Continuo, ubicados en CITRAR-UNI (Año 2010)	205
Figura 4. 89: Comportamiento de Conductividad por especie en Sistema Continuo, ubicados en CITRAR-UNI (Año 2010)	207
Figura 4. 90: Comportamiento en la remoción de N. Amoniacal por especie en Sistema Continuo, ubicados en CITRAR-UNI (Año 2010)	208
Figura 4. 91: Comportamiento de remoción de fósforo total por especie en Sistema Continuo, ubicados en CITRAR-UNI (Año 2010)	209
Figura 4. 92: Comportamiento en remoción de fosfatos por especie en Sistema Continuo, ubicados en CITRAR-UNI (Año 2010)	210
Figura 4. 93: Comportamiento de la Tasa de Producción semanalmente por cada especie (CITRAR- Año 2010) ...	211
Figura 4. 94: Comportamiento de la Tasa de Crecimiento Superficial diaria por cada especie (CITRAR- Año 2010)	212
Figura 4. 95: Comportamiento de la biomasa producida en kilogramo por metro cuadrado de cada especie (CITRAR- Año 2010)	213
Figura 4. 96: Carga Operacional expresada por la cantidad de cosecha diaria de cada especie (CITRAR- Año 2010)	214

LISTA DE TABLAS

No se encuentran elementos de tabla de ilustraciones.

Tabla 3. 1: Detalle de materiales, equipos de muestreo y materiales de siembra (Año 2009)	34
Tabla 3. 2: Condiciones ambientales mensuales que afectan en la remoción de nutrientes (Año 2009).	35
Tabla 3. 3: Condiciones ambientales mensuales que afectan en la remoción de nutrientes (Suderburgo- Año 2009).	40
Tabla 3. 4: Detalle de materiales, equipos de muestreo y materiales de siembra (Suderburgo- Año 2009).	40
Tabla 3. 5: Detalle de materiales, equipos de muestreo y materiales de siembra (Suderburgo-Año 2009).	46
Tabla 3. 6: Adición de nutrientes en los acuarios del 1er intento (Año 2009).	47
Tabla 3. 7: Adición de nutrientes en los acuarios del 2do intento (Año 2009).	47
Tabla 3. 8: Detalle de materiales, equipos de muestreo y materiales de siembra (CITRAR-Año 2010).....	61
Tabla 3. 9: Detalle de materiales, equipos de muestreo y materiales de siembra (CITRAR-Año 2010).....	69
Tabla 4. 1: Diagnóstico de la calidad de las aguas tratadas con Azolla filiculoides en el sistema por tandas (Suderburgo-Año 2009).....	83
Tabla 4. 2: Resumen de concentraciones de metales en solución con bajas concentraciones en el cultivo de Azolla f. (Suderburgo-Año 2009).....	107
Tabla 4. 3: Resumen del Cálculo de la Producción de la Biomasa en estado fresco (Suderburgo-Año 2009).	116
Tabla 4. 4: Resumen de resultados obtenidos en el Producción de la biomasa de la Azolla (Suderburgo-Año 2009).	116
Tabla 4. 5: Resumen del Cálculo de la Densidad de Peso Húmedo por Superficie de la Azolla F. en la estación de Verano (Suderburgo-Año 2009).....	125
Tabla 4. 6: Resumen del Cálculo de la Densidad de Peso Húmedo por Superficie de la Azolla F. en la estación de Otoño (Suderburgo-Año 2009).	125
Tabla 4. 7: Cálculos y resultados de la cantidad de Fósforo presente en la Azolla filiculoides (Suderburgo-Año 2009).	132
Tabla 4. 8: Cálculos y resultados de la cantidad de fósforo presente en el fondo en los acuarios (Suderburgo-Año 2009).	133
Tabla 4. 9: Cálculos y resultados del Porcentaje de la cantidad de fósforo (Suderburgo-Año 2009).	133
Tabla 4. 10: Diagnóstico de la calidad de las aguas tratadas con Lemna Minor en el Sistema de Flujo Continuo en CITRAR (Año 2010).....	138
Tabla 4. 11: Resumen de resultados de parámetros de los Análisis Físicoquímicos y microbiológicos con Lemna Minor en el Sistema de Flujo Continuo en CITRAR (Año 2010).	141
Tabla 4. 12: Diagnóstico de la calidad de las aguas tratadas con Eichhornia crassipes en el Sistema de Flujo Continuo en CITRAR (Año 2010).	142
Tabla 4. 13: Resumen del Cálculo de la Tasa Superficial (CITRAR- Año 2010)	173
Tabla 4. 14: Resumen del Cálculo de la Producción de la Biomasa (CITRAR- Año 2010).....	174
Tabla 4. 15: Resumen del Cálculo de la Densidad de Peso Húmedo por Superficie (CITRAR- Año 2010) ...	174
Tabla 4. 16: Resumen del Cálculo de la Carga Operacional (CITRAR- Año 2010).....	175
Tabla 4. 17: Evapotranspiración en los acuarios con/sin las plantas acuáticas (CITRAR- Año 2010).....	176
Tabla 4. 18: Resultados para el Cálculo de la Carga Operacional (CITRAR- Año 2010).....	178
Tabla 4. 19: Resumen del Cálculo de la Producción de la Biomasa (CITRAR- Año 2010).....	182
Tabla 4. 20: Resumen del Cálculo de la Producción de la Biomasa de la Lemna Minor (CITRAR- Año 2010)....	184
Tabla 4. 21: Resumen del Cálculo de la Densidad de Peso Húmedo por Superficie de la Lemna Minor (CITRAR- Año 2010)	185
Tabla 4. 22: Resumen del Cálculo de la Tasa Superficial (CITRAR- Año 2010)	187
Tabla 4. 23: Resumen de los resultados obtenidos para la obtención del COP con Lemna Minor (CITRAR- Año 2010)	188

<i>Tabla 4. 24: Resumen del Cálculo de la Tasa Superficial (CITRAR- Año 2010)</i>	190
<i>Tabla 4. 25: Resumen del Cálculo de la Producción de la Biomasa (CITRAR- Año 2010)</i>	191
<i>Tabla 4. 26: Resumen del Cálculo de la Densidad de Peso Húmedo por Superficie (CITRAR- Año 2010)</i> ...	192
<i>Tabla 4. 27: Resumen del Cálculo de la Carga Operacional</i>	194
<i>Tabla 4. 28: Resumen de los resultados obtenidos para la obtención del COP (CITRAR- Año 2010)</i>	195
<i>Tabla 4. 29: Resumen de los experimentos a comparar entre las dos plantas acuáticas (CITRAR- Año 2010)</i> ...	195
<i>Tabla 4. 30: Resumen de los experimentos a comparar entre las dos plantas acuáticas (CITRAR- Año 2010)</i> ..	201