

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

Profesor Patrocinante: Dr. Pedro Cisterna Osorio



**INCIDENCIA DE LA COMPOSICIÓN DEL MEDIO
GRANULAR DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL SOBRE
UN CUERPO RECEPTOR DE AGUAS TRATADAS.**

PROYECTO DE TÍTULO PRESENTADO EN CONFORMIDAD A LOS REQUISITOS
PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

FELIPE FERMÍN FIGUEROA ENCINA

CONCEPCIÓN, 2016

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	1
ÍNDICE DE FIGURAS	3
ÍNDICE DE TABLAS	3
RESUMEN	5
ABSTRACT	6
1. INTRODUCCIÓN	7
1.1. Justificación:.....	7
1.2. Alcance:.....	8
2. OBJETIVOS.....	8
2.1. Objetivo general.	8
2.2. Objetivos específicos.....	8
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	9
3.1. Bioma Acuático.....	9
3.2. Comunidades Bióticas.....	9
3.2.1. <i>Fitoplancton:</i>	9
3.2.2. <i>Zooplancton:</i>	10
3.3. Lagos y Lagunas.....	10
3.4. Cuenca Hidrográfica	11
3.5. Importancia de los nutrientes en un ecosistema acuático	11
3.5.1. <i>Nitrógeno:</i>	12
3.5.2. <i>Fósforo:</i>	12
3.6. Ciclo del nitrógeno	12
3.6.1. <i>Amonificación:</i>	12
3.6.2. <i>Nitrificación:</i>	12
3.6.3. <i>Desnitrificación:</i>	13
3.6.4. <i>Asimilación por los microorganismos:</i>	13
3.7. Ciclo del fósforo.....	13
3.8. Eutrofización	14
3.8.1. <i>Causas de la eutrofización:</i>	15
3.8.2. <i>Niveles tróficos:</i>	15
3.8.3. <i>Efectos de la eutrofización:</i>	17

3.8.4.	<i>Indicadores de eutrofización</i>	17
3.9.	Grado de eutrofización en cuerpos receptores de Chile y Concepción	18
3.9.1.	<i>Eutrofización en cuerpos receptores de Chile</i>	18
3.9.2.	<i>Eutrofización en cuerpos receptores de Concepción</i>	18
3.10.	Balance de masas	19
3.11.	Tiempo de Residencia Hidráulico	20
3.12.	Test de la Toalla	20
3.13.	Óxido de cal	21
4.	METODOLOGÍA	22
4.1.	Selección del sitio.....	23
4.2.	Componentes utilizados.	23
4.2.1.	<i>Material de contención</i>	23
4.2.2.	<i>Malla raschel</i>	23
4.2.3.	<i>Afluente</i>	23
4.3.	Parámetros de diseño.....	24
4.4.	Caudal (Q).....	24
4.5.	Tiempo de residencia hidráulico	24
4.6.	Construcción de cuerpos receptores	24
4.7.	Operación de cuerpos receptores y toma de muestras.....	25
4.7.1.	<i>Condición Inicial</i>	25
4.7.2.	<i>Parámetros a medir</i>	26
4.7.3.	<i>Campañas de muestreo</i>	26
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	28
5.1.	Efectos de los afluentes sobre los cuerpos receptores.....	28
5.1.1.	<i>Registro fotográfico de los cuerpos receptores</i>	28
5.1.2.	<i>Registro fotográfico de probetas</i>	29
5.1.3.	<i>Material Sedimentado</i>	30
5.1.4.	<i>Registro fotográfico a través de microscopio</i>	31
5.2.	Análisis de resultados de muestras Laguna 1 (sin óxido de cal)	35
5.3.	Análisis de resultados de muestras Laguna 2 (con óxido de cal)	39
6.	CONCLUSIONES	44
	REFERENCIAS	45
	ANEXO A: CONSTRUCCIÓN CUERPOS RECEPTORES	48

ANEXO B: OPERACIÓN Y REGISTRO FOTOGRÁFICO LAGUNAS	52
---	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema general de una cuenca hidrográfica	11
Figura 2: Esquema proceso de Eutrofización	15
Figura 3: Niveles tróficos	16
Figura 4: Test de la toalla	21
Figura 5: Esquema general.	22
Figura 6: Construcción definitiva.	22
Figura 7: Condición inicial lagunas.....	25
Figura 8: Evolución de los cuerpos receptores.	28
Figura 9: Probetas evolución del agua de cuerpos receptores.	29
Figura 10: Test de la toalla en Laguna 1.	30
Figura 11: Test de la toalla en Laguna 2.	31
Figura 12: Vista microscópica muestra Laguna 1 (40x).....	32
Figura 13: Vista microscópica muestra Laguna 1 (100x).....	32
Figura 14: Vista microscópica muestra Laguna 1 (1000x).....	33
Figura 15: Vista microscópica muestra Laguna 2 (40x).....	33
Figura 16: Vista microscópica muestra Laguna 2 (100x).....	34
Figura 17: Vista microscópica muestra Laguna 2 (200x).....	34
Figura 18: Nitrógeno en Laguna 1	36
Figura 19: Comparación remoción de Nitrógeno en muestras versus efecto dilución en Laguna 1	37
Figura 20: Fósforo en Laguna 1	38
Figura 21: Comparación remoción de Fósforo en muestras versus efecto dilución en Laguna 1	38
Figura 22: Clorofila <i>a</i> Laguna 1	39
Figura 23: Nitrógeno en Laguna 2.....	40
Figura 24: Comparación remoción de nitrógeno en muestras versus efecto dilución.....	41
Figura 25: Fósforo Laguna 2	42
Figura 26: Comparación remoción de fósforo empírico versus efecto dilución	43
Figura 27: Clorofila <i>a</i> Laguna 2	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Indicadores de eutrofización	17
Tabla 2: Clasificación trófica de lagos a nivel país	18
Tabla 3: Calidad de agua cuerpos lacustres en Concepción.....	19

Tabla 4: Parámetros de diseño.....	24
Tabla 5: Cronograma toma de muestras.	26
Tabla 6: Nitrógeno en Laguna 1	36
Tabla 7: Fósforo en Laguna 1.....	38
Tabla 8: Clorofila <i>a</i> en Laguna 1.....	39
Tabla 9: Nitrógeno en Laguna 2.....	40
Tabla 10: Fósforo en Laguna 2.....	42
Tabla 11: Clorofila <i>a</i> en Laguna 2.....	43

INCIDENCIA DE LA COMPOSICIÓN DEL MEDIO GRANULAR DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL SOBRE UN CUERPO RECEPTOR DE AGUAS TRATADAS

Autor: Felipe Fermín Figueroa Encina

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

Correo electrónico: felfigue@alumnos.ubiobio.cl

Profesor Patrocinante: Dr. Pedro Cisterna Osorio

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

Correo electrónico: pcisterna@ubiobio.cl

RESUMEN

Esta investigación se basa en simular un cuerpo receptor de aguas estancadas, como lo son los lagos y lagunas, que reciben aguas tratadas provenientes de un humedal artificial de flujo subsuperficial. Se analiza la incidencia que tiene la utilización de óxido de calcio adicional al medio granular utilizado habitualmente (grava) en un humedal artificial.

Esta experiencia se realizó en las dependencias de la Universidad del Bío-Bío, campus Concepción. Se construyó un cuerpo receptor del curso de agua para cada humedal artificial, donde uno de ellos recibe las aguas tratadas de un humedal de flujo subsuperficial que utiliza grava y el otro desde un humedal que utiliza óxido de cal y grava como medio granular. Para establecer la incidencia del tratamiento, se realizaron análisis de nutrientes, clorofila y registros fotográficos en ambos cuerpos receptores, constatando que el cuerpo que recibe las aguas desde el humedal con óxido de cal tuvo una remoción de fósforo aproximadamente dos veces mayor que el otro cuerpo receptor, además de coloraciones no deseadas, material en suspensión e inhibición de la proliferación de microorganismos, no obstante, la remoción de nitrógeno fue similar en ambas lagunas.

Palabras clave: lagos, lagunas, humedal artificial, óxido de calcio, remoción de nitrógeno, remoción de fósforo, clorofila *a*

Cantidad de palabras: 7345 + 38 Figuras/Tablas*250 = 16845.-

COMPOSITION INCIDENCE OF THE GRANULAR MEDIA OF AN ARTIFICIAL WETLAND OVER A RECEPTOR BODY OF TREATED WATER

Author: Felipe Fermín Figueroa Encina

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bio-Bio

Email: felfigue@alumnos.ubiobio.cl

Teacher Guide: Dr. Pedro Cisterna Osorio

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bio-Bio

Email: pcisterna@ubiobio.cl

ABSTRACT

This research is based on simulating a receptor body of stack water, as are lakes and lagoons, which receive treated waters from an artificial wetland of subsurface flowing. The incidence that has the utilization of additional calcium oxide into the granular environment usually used (gravel) in an artificial wetland is analyzed.

This experience is carried out in the premises of Bio-Bio university, Concepcion campus. A receptor body of the course of the water for each artificial wetland was build, where one of them receives treated water from a wetland of subsurface flowing that uses gravel and the other from a wetland which uses calcium oxide and gavel as a granular media. In order to establish the incidence of the treatment, nutrients and chlorophyll studies have be done together with photographic registers in both receptors bodies, showing that the body that receive the waters from the calcium oxide wetland had a removal of phosphorus two times higher than the other receptor body, together with colorations not wished, suspension material and inhibition of the of proliferation of microorganisms, however, nitrogen removal was similar in both lagoons.

Keywords: lagoons, lakes, artificial wetland, calcium oxide, removal of nitrogen, removal of phosphorus, chlorophyll *a*

1. INTRODUCCIÓN

En Chile existe un constante aumento demográfico y según como lo plantea Besalle la concentración cada vez mayor de población rural en áreas urbanas, la expansión industrial, la carencia del tratamiento de las aguas servidas antes de ser dispuestas en los cuerpos de agua y la carencia del manejo de las hoyas hidrográficas, entre otras, son las mayores causas del deterioro de la calidad del agua y del empobrecimiento paisajístico del entorno (Besalle citado en Cortéz 1997). La calidad del agua de los lagos y lagunas es reflejo de los factores externos en el ecosistema y de las posteriores transformaciones por medio de las interacciones biológicas dentro del ecosistema acuático (Monedutti et al. citado en Pardo & Vila 2006).

En la actualidad, la mantención y cuidado de la calidad del medio ambiente y el manejo de los recursos naturales es una preocupación constante tanto de privados como de los gobiernos, los cuales han incrementado su interés respecto a los cambios en la calidad de estos.

Es por ello que en esta investigación se analizará la incidencia del medio granular de dos humedales artificiales que tratan agua residual artificial, donde ambos efluentes de estos sistemas desembocan a un cuerpo receptor. La diferencia entre los medios granulares está dada por la presencia de óxido de calcio en uno de ellos.

1.1. Justificación:

Es importante cuidar y mantener en buen estado los cuerpos de agua que nos rodean, por ello, es de gran utilidad conocer el efecto que tendrían los distintos medios granulares en los humedales artificiales utilizados para el tratamiento de aguas residuales que descargan a un cuerpo receptor. Teniendo conocimiento de lo antes mencionado, se puede evaluar y estimar de mejor manera lo que podría ocurrir en diferentes escenarios reales con la finalidad de mejorar la calidad del afluente de los cuerpos receptores, impactando positivamente en el atractivo visible y en el ecosistema, disminuyendo contaminación y eventuales olores no deseados.

1.2. Alcance:

Esta investigación contempla analizar la incidencia del medio granular de un humedal artificial sobre un cuerpo receptor de aguas tratadas. Para ello, se construyen dos cuerpos receptores de agua (Laguna 1 y Laguna 2), donde existen dos humedales artificiales que preceden a dichos cuerpos y que descargan las aguas tratadas en ellos. Estos humedales son utilizados para el tratamiento de agua residual artificial, donde uno de ellos (que descarga en Laguna 1) lo hace de forma convencional utilizando solo grava como medio granular y el otro (que descarga en Laguna 2) utiliza óxido de cal (CaO) adicional al medio granular convencional, de acuerdo a esto, se observarán condiciones tróficas, físicas y químicas de ambos cuerpos receptores para así estudiar el efecto diferencial que produce la presencia de óxido de cal en uno de los sistemas.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general.

Evaluar la incidencia de la composición del medio granular de un humedal artificial sobre un cuerpo receptor de aguas tratadas.

2.2. Objetivos específicos.

- a) Construir un cuerpo receptor del curso de agua a escala.
- b) Definir los parámetros que indican el estado trófico del cuerpo de agua.
- c) Medir en el cuerpo receptor los parámetros definidos
- d) Analizar el comportamiento evolutivo de los parámetros que caracterizan al cuerpo receptor.

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1. Bioma Acuático.

Los biomas acuáticos pueden ser de dos tipos, marinos (agua salada) o dulceacuícolas (agua dulce). En cuanto a los biomas dulceacuícolas se dividen en dos tipos, lénticos como lagos y lagunas y lóticos como los ríos y arroyos. El primero de los ecosistemas dulceacuícolas es más susceptible a ser contaminado que el segundo, puesto que los sistemas de aguas corrientes tienden a diluir más las partículas contaminantes ya que el agua fluye más rápidamente (Wrobel 1991.)

La disciplina que estudia estos sistemas acuáticos es la limnología, la cual existe desde hace unos 60 años y se define como la disciplina biológica que se ocupa del ambiente acuático continental y de la presencia, número, fluctuaciones, interrelaciones, periodicidad y sucesión de los organismos y comunidades que viven en él. Por otro lado se le define también como la rama de la ciencia que estudia la productibilidad biológica de las aguas continentales y todos sus factores que la determinan (Ramírez citado en Cortez 1997).

3.2. Comunidades Bióticas

Los organismos que viven suspendidos en una columna de agua se denominan plancton. En aguas muy agitadas estos organismos no tienen tiempo de desarrollar poblaciones significativas, pero a medida que la tasa de flujo se hace más lenta, las laderas de la cuenca se hacen más suaves, y el volumen del agua aumenta, ellos comienzan a desarrollar poblaciones animales y vegetales muy distintivas, las que se denominan zooplancton y fitoplancton, respectivamente. (Rodríguez, Muñoz, Cornejo, & Espinoza, 2004).

3.2.1. Fitoplancton:

Comprende a los organismos productores, que son principalmente las algas capaces de sintetizar materia orgánica mediante fotosíntesis, tal síntesis es extremadamente importante para todos los organismos vivientes en las lagunas y lagos, además del zooplancton que depende de él para su alimentación (Parra, Della Croce, & Valdovinos, 2004). El

fitoplancton es un grupo muy diverso de algas verdes microscópicas que provienen de múltiples grupos diferentes. El grupo predominante son las algas verdes unicelulares. Bajo condiciones favorables estas algas pueden desarrollar enormes poblaciones, lo que causa los denominados blooms algal (explosiones de algas), en las cuales ellas colorean el agua y pueden producir olores y sabores muy específicos (Rodríguez et al., 2004).

3.2.1.1. Fotosíntesis del fitoplancton

El fitoplancton son los productores primarios, al igual que en el medio terrestre lo son las hierbas y vegetales, los cuales son los alimentos primarios del ecosistema. El fitoplancton se encarga de fijar el CO₂ atmosférico de manera que el carbono pasa a ser parte de la cadena alimentaria, y por lo tanto es fuente de energía. Progresivamente la cadena va enriqueciéndose, puesto que el fitoplancton es consumido por el zooplancton que a su vez puede ser consumido por determinados peces, etc (Biología, 2014).

3.2.2. Zooplancton:

Está constituido por organismos heterótrofos, que a diferencia del fitoplancton, no son capaces de sintetizar su propio alimento. En agua fresca, el zooplancton incluye pequeños crustáceos. Mucho de ellos filtran grandes volúmenes de agua diariamente del cual extraen fitoplancton, pequeños zooplancton y bacterias. Muchos de estos organismos son bastante móviles, para lo cual poseen grupos de cilios o tentáculos. De esta manera ellos pueden perseguir a su presa y cambiar de posición vertical para mejorar sus posibilidades de alimentación o para evitar otros predadores (Rodríguez et al., 2004).

3.3. Lagos y Lagunas.

Las lagunas son aguas poco profundas, de relativa calma en comparación con los ríos ya que no se encuentran en movimiento y en cambio están estancadas. Su principal característica es estar separadas del océano por alguna barrera física. (Geoenciclopedia)

Una laguna se caracteriza por ser un espacio natural que acumula agua, y cuyas dimensiones son menores que las de un lago (Guerrero, 2011). Los lagos se originan

principalmente por la obstrucción del drenaje superficial debido particularmente a procesos morfológicos, conformando una estructura temporal, en la historia erosional de los sistemas geográficos (Bellair & Pomero, 1977; Mosetti, 1977).

3.4. Cuenca Hidrográfica

Una cuenca hidrográfica se entiende en hidrología como el territorio definido por los límites de la zona de escurrimiento de las aguas superficiales, que convergen hacia un mismo cauce; estos límites pueden ser obtenidos directamente de cartografía oficial existente y en general fácilmente identificadas en terreno. Del mismo modo, una cuenca, sus recursos y sus habitantes, poseen determinadas condiciones físicas, biológicas económicas, sociales y culturales, que les confieren características comunes; condiciones que pueden evaluarse cuali- y cuantitativamente (Parra et al., 2004).

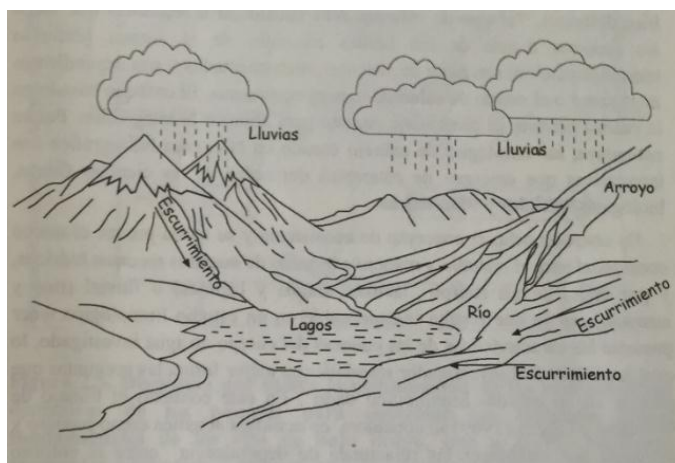


Figura 1: Esquema general de una cuenca hidrográfica

Fuente: Parra et al., 2004.

3.5. Importancia de los nutrientes en un ecosistema acuático

El Fósforo (P) y Nitrógeno (N) son considerados los principales nutrientes en el desarrollo de los ecosistemas acuáticos. En grandes cantidades estos nutrientes originan el problema de la eutrofización de los cuerpos de agua, lo que es provocado ya sea de forma natural o antropogénico. (Morales & Chávez, 2010).

3.5.1. *Nitrógeno:*

El nitrógeno es uno de los constituyentes de la materia orgánica que forma parte de las proteínas de las células y es indispensable en el crecimiento de los organismos fotosintéticos. En la química del agua, los compuestos de nitrógeno inorgánicos, amoniaco, nitritos y nitratos (NH_4^+ , NO_2 , NO_3), así como el nitrógeno orgánico, juegan un papel importante, ya que son indispensables para el desarrollo de la vida animal y vegetal en agua. Estas distintas formas están relacionadas entre sí a través del ciclo del nitrógeno. (Ambientum)

3.5.2. *Fósforo:*

Los compuestos inorgánicos más importantes son el fósforo soluble (ortofosfatos) que resulta directamente utilizable por los microorganismos. Como ocurre con el nitrógeno, las distintas formas del fósforo son interconvertibles, dando así lugar al ciclo del fósforo. (Cidta)

3.6. **Ciclo del nitrógeno**

3.6.1. *Amonificación:*

Consiste en la transformación de nitrógeno orgánico en nitrógeno amoniacal. Los mecanismos responsables de esta transformación son la hidrólisis de la materia orgánica y la desaminación subsiguiente de los aminoácidos resultantes (Moreno, 1991).

3.6.2. *Nitrificación:*

Es la oxidación del nitrógeno amoniacal hasta nitritos y nitratos llevada a cabo por las llamadas bacterias nitrificantes. Este proceso tiene lugar únicamente en emedio aerobio, y tiene gran importancia, ya que el nitrato sirve como nutriente en el desarrollo de las alas. La nitrificación tiene lugar en dos etapas: en la primera se generan nitritos, y en la segunda los nitritos se oxidan a nitratos. La primera etapa es mucho más lenta que la segunda, y limita la velocidad del proceso global. La concentración de nitritos se mantiene siempre baja en relación con la de nitratos. Además, los nitritos son poco estables y tienden a evolucionar

hasta el producto final nitrato o bien a ser reducidos de nuevo para producir óxido nitroso (N₂O) o nitrógeno moléculas (N₂) (Brock, 1978).

3.6.3. *Desnitrificación:*

En condiciones anaerobias, las formas oxidadas de nitrógeno, es decir, los nitritos y nitratos, son reducidos a N₂o y N₂ por las llamadas bacterias desnitrificantes. Como los productos finales de la desnitrificación son gaseosos y muy poco solubles, tienden a escapar de la laguna e incorporarse a la atmósfera, por lo que este proceso se traduce en una pérdida neta de nitrógeno (Schroeder, 1977).

3.6.4. *Asimilación por los microorganismos:*

Tanto el nitrógeno amoniacal como nitratos pueden ser utilizados por los microorganismos como nutrientes. De esta forma se incorporan al tejido celular y vuelven a formar parte del nitrógeno orgánico presente en el medio (Moreno, 1991).

3.7. **Ciclo del fósforo**

Los procesos de transformación a los que se encuentran sometidos los compuestos del fósforo son los siguientes (Moreno, 1991):

3.7.1. *Mineralización del fósforo orgánico*, que resulta en la liberación de fósforo soluble directamente asimilable por los microorganismos. El fósforo orgánico está en forma de ésteres fosfóricos y resulta fácilmente hidrolizable, por lo que la reincorporación al medio como nutriente tras la muerte de los microorganismos es rápida y uniforme.

3.7.2. *Precipitación del fósforo como sales insolubles*, que quedan inmovilizados a efectos de la actividad biológica en los sedimentos del fondo. La fracción más importante de este fósforo precipita en forma de fosfato cálcico y fosfato férrico.

3.7.3. *Asimilación de fósforo soluble en el crecimiento de algas y bacterias*, con lo que queda incorporado a su tejido celular convertido, por lo tanto, en fósforo orgánico.

3.7.4. *Sedimentación de materia orgánica y microorganismos*, lo que da lugar, como en el caso del nitrógeno, al almacenamiento temporal de fósforo orgánico en el fango del fondo.

3.7.5. *Regeneración del fósforo soluble durante la degradación anaerobia de los fangos*, por hidrólisis de los compuestos orgánicos de fósforo almacenados.

3.8. Eutrofización

La eutrofización es el proceso natural de envejecimiento de los lagos, el cual progresa aun sin tener la ayuda del hombre. La contaminación, sin embargo, acelera el envejecimiento natural y acorta considerablemente la vida del receptor acuático (Ramalho, 1996). El control de este proceso es hoy uno de los problemas más importantes y urgentes de la ecología y en particular de la limnología. Es también uno de los problemas ambientales que concita el interés de los países desarrollados y en desarrollo puesto que tiene un gran impacto en el valor paisajístico y recreativo (Parra et al., 1989).

La palabra eutrofización proviene de las palabras griegas; “eu” que significa bueno y “trofos” que significa alimento. De esta forma, el sentido literal de esta palabra es “rico en alimento” (Rodríguez et al., 2004), pero en relación a un lago o laguna, hoy día esta palabra se refiere a una fertilización excesiva de una masa de agua que da por resultado el crecimiento perjudicial de plantas acuáticas, tales como algas y macrófitas (Parra et al., 1989).

Todos los lagos desarrollan un enriquecimiento natural con el tiempo. Nutrientes solubles y sedimentos son arrastrados desde las cuencas aportantes, esta eutrofización natural es un proceso lento desde un punto de vista humano, tomando un período del orden de miles de años. La descarga de aguas residuales e industriales no tratadas en un lago acelera este proceso en forma muy dramática. Este proceso acelerado se denomina eutrofización cultural o artificial (Rodríguez et al., 2004).

A continuación se muestra un esquema del proceso de eutrofización.

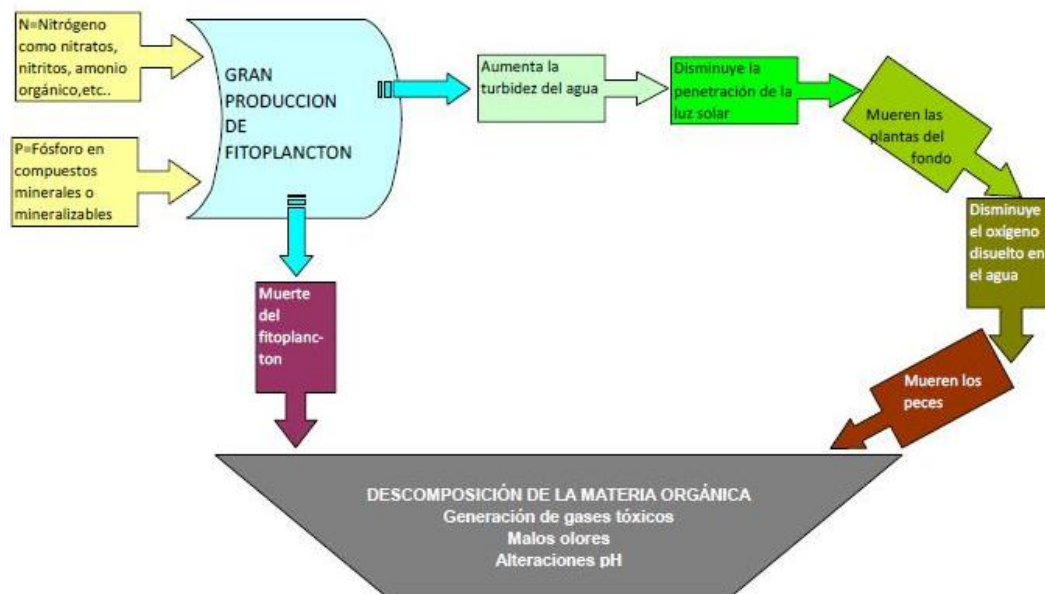


Figura 2: Esquema proceso de Eutrofización

Fuente: aguasymascosas.blogspot.cl, 2016

3.8.1. Causas de la eutrofización:

La presencia de altas concentraciones de nutrientes, tales como nitrógeno y fósforo, tienen un impacto negativo en la calidad del agua, debido a que son los causantes de que ocurra una disminución en los niveles de oxígeno disuelto y un enriquecimiento de la materia orgánica, a este proceso se le llama eutrofización y puede ocasionar la muerte de los seres que requieren oxígeno para respirar, como los peces. (Álvarez, 2007).

3.8.2. Niveles tróficos:

Existen distintos niveles tróficos, los cuales se muestran en la siguiente figura y se detallan a continuación.

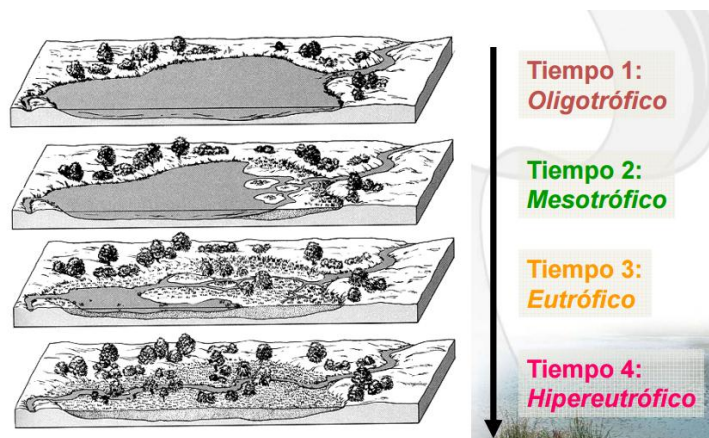


Figura 3: Niveles tróficos

Fuente: Urrutia, 2009

3.8.2.1. Sistema Oligotrófico:

Cuando los lagos se forman, se caracterizan por tener aguas claras y bajas concentraciones de nutrientes, lo que se traduce en bajos niveles de productividad primaria y de biomasa (aunque puede estar presente una gran variedad de especies) (Diaz, 1994).

3.8.2.2. Sistema Mesotrófico:

Es la condición intermedia entre la condición oligotrófica y eutrófica. La disponibilidad de nutrientes es media y su transparencia es inferior a la de un lago oligotrófico (Parra et al., 2004).

3.8.2.3. Sistema Eutrófico:

A medida que pasa el tiempo, ocurre el proceso de Eutrofización. Las lluvias y aguas que escurren sobre los suelos de la cuenta transportan sedimentos y nutrientes al lago (también pueden hacerlo las aguas subterráneas y el viento), los que mantienen y estimulan el crecimiento del fitoplancton y plantas acuáticas enraizadas (macrófitas). Este aumento paulatino de la productividad primaria va provocando cambios en las características físicas, químicas y biológicas del lago. Luego de cientos de miles de años, el lago progresa desde la etapa Oligotrófica a un estado Eutrófico (Diaz, 1994).

Posee alta disponibilidad de nutrientes y las aguas tienen una incipiente turbiedad.

3.8.2.4. Sistema Hipereutrófico

Disponibilidad muy alta de nutrientes y aguas muy turbias (Parra et al., 2004).

3.8.3. Efectos de la eutrofización:

La eutrofización es uno de los más significativos y extendidos problemas de calidad de aguas a nivel mundial. Los más importantes problemas creados por la excesiva eutrofización se listan a continuación (Rodríguez et al., 2004):

- El efecto negativo sobre la industria de pesca comercial y deportiva debido a los cambios en las especies de peces encontradas en lagos, lo que es causado por el bajo nivel de oxígeno encontrado en las aguas más profundas.
- El efecto en turismo y recreación debido al excesivo crecimiento de algas y otras plantas acuáticas.
- Los crecimientos explosivos de algas (algal blooming) que provocan problemas de olor y sabor en el agua y tapa los filtros de las plantas de tratamiento.
- Acumulación de sedimentos.
- Incremento de las bacterias

3.8.4. Indicadores de eutrofización

Los principales indicadores de la eutrofización, son básicamente cuatro: El Fósforo, Nitrógeno, Clorofila *a* y la Profundidad de Secchi.

La siguiente tabla muestra los valores límite de los indicadores nombrados:

Parámetro	Oligotrófico	Mesotrófico	Eutrófico	Hipereutrófico
Nitrógeno ($\mu\text{g/L}$)	< 350	350 - 650	650 - 1200	> 1200
Fósforo ($\mu\text{g/L}$)	< 10	10 - 30	30 - 100	> 100
Clorofila <i>a</i> ($\mu\text{g/L}$)	< 3.5	3.5 - 9	9 - 25	> 25
Transparencia (m)	> 4	2 - 4	1 - 2	< 1

Tabla 1: Indicadores de eutrofización

Fuente: Smith et al., 1999.

3.9. Grado de eutrofización en cuerpos receptores de Chile y Concepción

3.9.1. Eutrofización en cuerpos receptores de Chile

Según análisis del estado trófico de los lagos a nivel del país realizado por Centro de Ecología Aplicada LTDA, conforme la clasificación de Smith et al., (1999) desde el punto de vista del contenido de clorofila *a*, la mayor parte de estos lagos se encuentran en estado oligotrófico y mesotrófico, lo que se puede apreciar en la siguiente tabla.

Cuerpo de Agua		Clorofila a (ug/l)			Estado trófico
Nombre	Región	Promedio	Mínimo	Máximo	
Chungará	15	3,13	0,34	8,74	Oligo-Mesotrófico
Acúleo	13	32,1	19,16	42,04	Eutro-Hipereutrófico
Laguna Negra	13	2,55	0,06	5,6	Oligotrófico
Laguna Grande de San Pedro	8	4,79	3,06	5,88	Mesotrófico
Lanahlue	8	7,63	5,38	10,54	Mesotrófico
Lleulleu	8	1,1	-	-	Oligotrófico
Laguna del Laja	8	1,49	1,19	1,7	Oligotrófico
Villarica	9	1,69	0,4	3,12	Oligotrófico
Caburgua	9	0,95	0,01	1,63	Oligotrófico
Panguipulli	9	1,44	0,82	2,38	Oligotrófico
Ranco	14	0,8	0,22	2,85	Oligotrófico
Llanquihue	10	1,1	0,39	1,58	Oligotrófico
Cucao	10	4,41	0,91	13,35	Mesotrófico
Huillinco	10	2,9	0,56	6,3	Oligo-Mesotrófico
Natri	10	16,7	3,3	77,4	Eutrófico
Risopatrón	11	<1	-	-	Oligotrófico
Meullin	11	0,0006	0,0003	0,001	Oligotrófico
Riesco	11	0,58	0,1	1,76	Oligotrófico
Sarmiento	12	0,34	-	-	Oligotrófico
Pehoe	12	0,4	-	-	Oligotrófico
Toro	12	0,43	0,35	0,5	Oligotrófico

Tabla 2: Clasificación trófica de lagos a nivel país

Fuente: Centro de Ecología Aplicada LTDA, 2011

3.9.2. Eutrofización en cuerpos receptores de Concepción

Concepción es una ciudad que tiene un patrimonio hídrico natural único, asociado a un conjunto de lagunas interurbanas como lo son la laguna Redonda, Lo Mendez, Lo Galindo, Lo Custodio y Tres Pascualas, las que junto a las partes terminales del río BioBío y el río

Andalién, otorgan a la región del Biobío características ambientales que no se encuentran en las ciudades del resto del país.

Sin embargo, estos cuerpos de agua se encuentran en condiciones eutróficas a hipereutróficas, las que se caracterizan por una baja transparencia de sus aguas, un alto contenido de nutrientes como el fósforo y el nitrógeno, episodios de anoxia (falta de oxígeno en la parte baja de la columna de agua), en general mala calidad de sus aguas, crecimiento masivo de microalgas, ausencia de oxígeno o compuestos nitrogenados e invasión de de diversas especies de macrófitas o malezas acuáticas. Estas condiciones afectan el estado ecológico y la calidad estética de los cuerpos (Parra, 2009).

Para tener noción de los valores que definen el estado trófico antes mencionado en los cuerpos de la región, se presenta la siguiente tabla con los parámetros establecidos por Smith et al.

Parámetro	Laguna Redonda	Laguna Lo Mendez	Laguna Lo Galindo	Laguna Lo Custodio	Laguna Tres Pascualas
Nitrógeno (µg/L)	306 - 500	420 - 1.720	1.560 - 13.630	380 - 600	1.060 - 2.590
Fósforo (µg/L)	20 - 30	40 - 100	90 - 700	50 - 120	40 - 150
Clorofila a (µg/L)	7,12 - 9,63	5,44 - 66,08	17,79 - 606,91	1,9 - 2,78	2,5 - 42,68
Transparencia (m)	1,23 - 4,0	1,0 - 6,3	1,2 - 3,0	0,3 - 0,9	1,03 - 1,93

Tabla 3: Calidad de agua cuerpos lacustres en Concepción

Fuente: Baeza, 2011

3.10. Balance de masas

En el presente balance de masas se asume que no hay utilización de nitrógeno y fosforo por parte de la biomasa algal y tampoco retención física de los nutrientes mencionados, por tanto el valor obtenido del balance másico, solo está sujeto a un fenómeno de dilución, este valor se compara con el valor obtenido empíricamente y en función de la proximidad o diferencia que se establece entre los mismos, se puede inferir la validez o no del supuesto inicialmente planteado y por tanto la eventual ocurrencia de remoción de nutrientes.

Este balance se realiza para un tiempo determinado, en este caso tres días como promedio y se define de la siguiente forma:

$$\frac{V_1 * C_{1a} + (V_T - V_1) * C_0}{V_T} = C_{1e}$$

Donde,

V_1 : Volumen afluente

V_T : Volumen total

C_0 : Concentración inicial

C_{1a} : Concentración afluente

C_{1e} : Concentración efluente

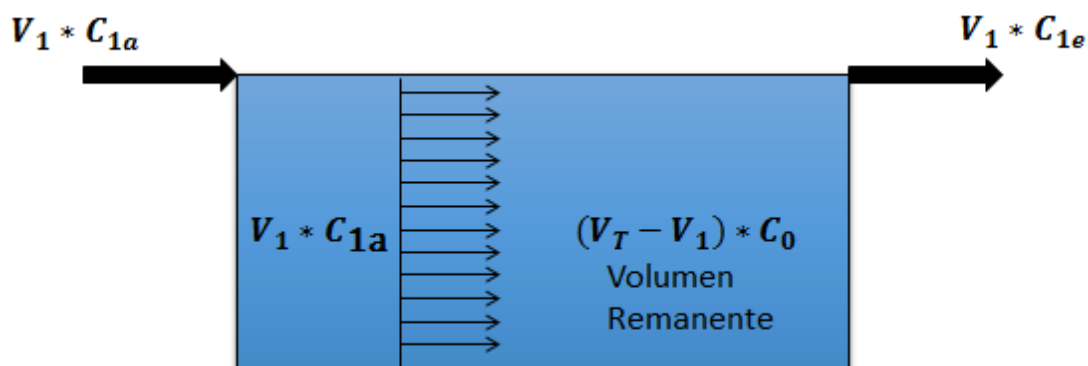


Figura 4: Diagrama de flujo del balance de masas

3.11. Tiempo de Residencia Hidráulico

El valor del TRH corresponde al tiempo que permanece el agua dentro de la laguna y encuentra en relación directa con el caudal proveniente del tratamiento previo mediante la siguiente expresión.

$$T_{rh} = V/Q = \frac{L * W * y}{Q}$$

3.12. Test de la Toalla

El test de la toalla consiste en insertar un bastón envuelto en una toalla blanca en el interior de un recipiente con agua (hasta el fondo), con lo cual, al retirarlo se evidenciará la decantación de material en suspensión presente en el fluido (ver Figura 5).



Figura 5: Test de la toalla

3.13. Óxido de cal

El óxido de calcio es un compuesto químico comúnmente llamado “Cal Viva”, el cual se obtiene mediante la calcinación de la caliza a una temperatura superior a 900°C y junto a un gran contenido de carbonato de calcio. Posee una densidad de 3,3g/m³ y su punto de ebullición es de 2850°C (formulacionquimica.com, 2016). El óxido de cal utilizado es un residuo de la compañía siderúrgica Huachipato (CAP) (Nova, 2016)

4. METODOLOGÍA

Capítulo donde se detalla el lugar, características y consideraciones para llevar a cabo la construcción de los cuerpos receptores.

Como se mencionó anteriormente y se muestra en la Figura 6, uno de los cuerpos receptores recibe el agua residual artificial tratada por el humedal con material granular convencional (Laguna 1) y la otra lo hace del humedal con contenido de óxido de cal, además de grava, en el medio granular (Laguna 2). Por lo tanto, los cuerpos a estudiar se les llamarán indistintamente laguna o cuerpo receptor.

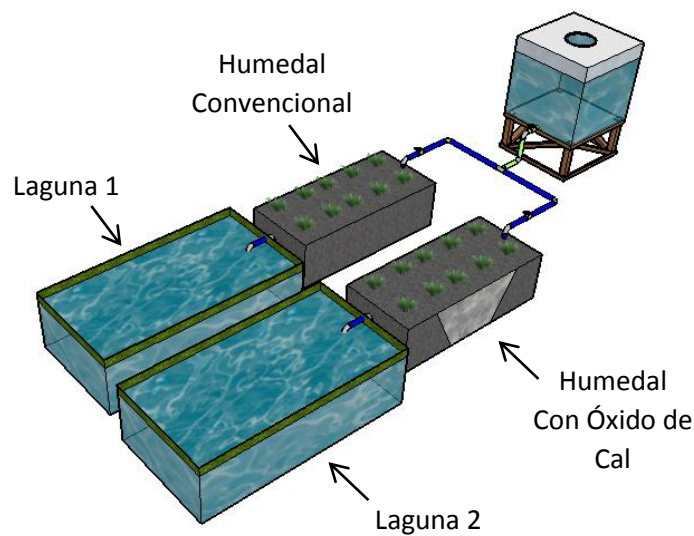


Figura 6: Esquema general.



Figura 7: Construcción definitiva.

4.1. Selección del sitio.

El lugar seleccionado para la construcción de los humedales artificiales y sus cuerpos receptores de agua, se encuentra en las dependencias de la Universidad del Bío Bío, Campus Concepción, donde se tiene un fácil acceso vehicular para el transporte de materiales en el proceso de construcción, suministro cercano de agua para la generación del afluente y un container para el almacenamiento de herramientas y suministros.

4.2. Componentes utilizados.

Los componentes utilizados en la construcción y puesta en marcha de los cuerpos receptores son los siguientes:

4.2.1. Material de contención.

Se utiliza como material impermeable de contención del agua residual una lámina de polietileno de baja densidad con un espesor de 0,2mm.

4.2.2. Malla raschel

Se utilizó este tipo de malla con dos propósitos:

- Confección del cierre perimetral del sitio
- Confección del techo que evita el exceso de luz solar en las lagunas.

4.2.3. Afluente

Las aguas recibidas por los cuerpos receptores son provenientes del efluente de dos humedales artificiales a escala que tratan aguas residuales, estas entradas de agua poseen un factor diferencial, donde uno de ellos, como parte del medio granular utiliza óxido de cal (Laguna 2) y el otro lo hace de manera convencional (Laguna 1).

4.3. Parámetros de diseño

Los parámetros de diseño seleccionados para los cuerpos receptores de agua se muestran en la siguiente tabla. Se aplicó un factor de corrección debido a que existían irregularidades en la excavación producidas por necesidades constructivas, se estimó un factor de corrección de un 90%.

Parámetro	Dimensión
Largo (L)	2,5m
Ancho (W)	1,5m
Profundidad (y)	0,8m
Pendiente	1%
Factor de Corrección	0,9
Volumen	2,7m ³

Tabla 4: Parámetros de diseño.

4.4. Caudal (Q)

El caudal de entrada proveniente del tratamiento previo, el cual es aproximadamente de 14.4 lt/hr.

4.5. Tiempo de residencia hidráulico

Según la ecuación planteada en el punto 3.11, el tiempo de residencia hidráulico de cada laguna es de 7,8 días.

$$T_{rh} = V/Q = \frac{2,7m^3}{0,345m^3/hr} = 7,8 \text{ días}$$

4.6. Construcción de cuerpos receptores

Para la construcción de los cuerpos receptores se tomaron en cuenta distintas consideraciones:

- Igualdad en cuanto a dimensiones y pendientes en ambas lagunas.
- Un relleno de arena bajo el polietileno para así evitar roturas por punzonamiento de piedras.

- Instalación de tuberías que conducen el afluente de cada humedal artificial hacia el 70% de profundidad de las lagunas aproximadamente y así evitar flujos preferenciales en la superficie libre de estas.
- Implementación de un cierre perimetral para evitar el acceso a terceros y/o animales que puedan causar daño a las instalaciones.

4.7. Operación de cuerpos receptores y toma de muestras

La puesta en marcha de los cuerpos receptores se realizó el día 18/02/16. Mayor detalle de la operación de los cuerpos se presenta en el Anexo A

4.7.1. Condición Inicial.

Como condición inicial, ambas lagunas se llenaron con agua potable como se muestra en la Figura 8. Ambos cuerpos receptores tienen un caudal de entrada de 14.4 lt/hr, sin embargo, las concentraciones de nutrientes (nitrógeno y fósforo) en el afluente, se encuentran dadas por la eficiencia del tratamiento previo a cada laguna. La toma de muestras queda condicionada por campañas estipuladas en el tratamiento previo, donde en cada campaña se produce una variación en las concentraciones de nutrientes en el afluente de las lagunas. El cronograma de toma de muestras se puede apreciar en la Tabla 4.



Figura 8: Condición inicial lagunas.

Mes	Febrero									Marzo																					
Día	21	22	23	24	25	26	27	28	29	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M
Campaña 1	m1			m2			m3																								
Campaña 2											m4		m5		m6																
Campaña 3																			m7			m8			m9						
Campaña 4																													m10		m11

Tabla 5: Cronograma toma de muestras.

4.7.2. *Parámetros a medir.*

Los parámetros a medir en los cuerpos receptores en esta investigación fueron seleccionados basándose en lo explicado en el punto 3.8.4, dichos parámetros son los siguientes:

- Nitrógeno
- Fósforo
- Clorofila *a*.

4.7.3. *Campañas de muestreo.*

Para el estudio de los parámetros mencionados en el punto anterior, se consideraron 4 campañas de medición, cada una compuesta por 3 toma de muestras, las cuales se visualizaron en la Tabla 4. Las cantidades y condiciones de muestreos para cada tipo de análisis se detallan a continuación.

4.7.3.1. *Nitrógeno:*

La toma de muestra se realizó en el efluente en cada una de las campañas (en envases de 250cc), para luego ser analizadas en el laboratorio de suelos del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. La toma de muestra se realizó de la siguiente forma:

- Campaña 1: 3 muestras para cada laguna
- Campaña 2: 3 muestras para cada laguna
- Campaña 3: 3 muestras para cada laguna
- Campaña 4: 2 muestras para cada laguna

4.7.3.2.Fósforo

El muestreo fue realizado también en el efluente (en envases de 1000cc) en las campañas 2, 3 y 4, para luego ser analizadas en el laboratorio Biodiversa. La toma de muestra se realizó de la siguiente forma:

- Campaña 2: 1 muestra para cada laguna
- Campaña 3: 2 muestras para cada laguna
- Campaña 4: 1 muestra para cada laguna

4.7.3.3.Clorofila a

El análisis de este parámetro tiene el mismo procedimiento que el de Fósforo. La toma de muestra se realizó de la siguiente forma:

- Campaña 2: 1 muestra para cada laguna
- Campaña 3: 1 muestra para Laguna 1
- Campaña 3: 1 muestra para Laguna 1
- Fuera de campaña (FC): 1 muestra para cada laguna luego de 3 semanas finalizado el proceso de operación.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Capítulo donde se muestran los resultados obtenidos de los análisis de Nitrógeno, Fósforo y Clorofila *a*, además de parte del registro fotográfico del proceso de operación de las lagunas.

5.1. Efectos de los afluentes sobre los cuerpos receptores.

Los efectos producidos en ambas lagunas tuvieron algunas diferencias, como en la coloración que tomaron y en la cantidad de microorganismos presentes. Estas diferencias se ven reflejadas en los registros fotográficos que se presentan a continuación.

5.1.1. Registro fotográfico de los cuerpos receptores.

En la Figura 9 se presenta el registro fotográfico de la evolución de las lagunas en el tiempo, donde cada fotografía a la izquierda es la laguna que recibe agua del humedal con contenido de óxido de cal (Laguna 2) y a la derecha la del humedal sin contenido de óxido de cal (Laguna 1). El detalle del registro fotográfico se presenta en el Anexo A.

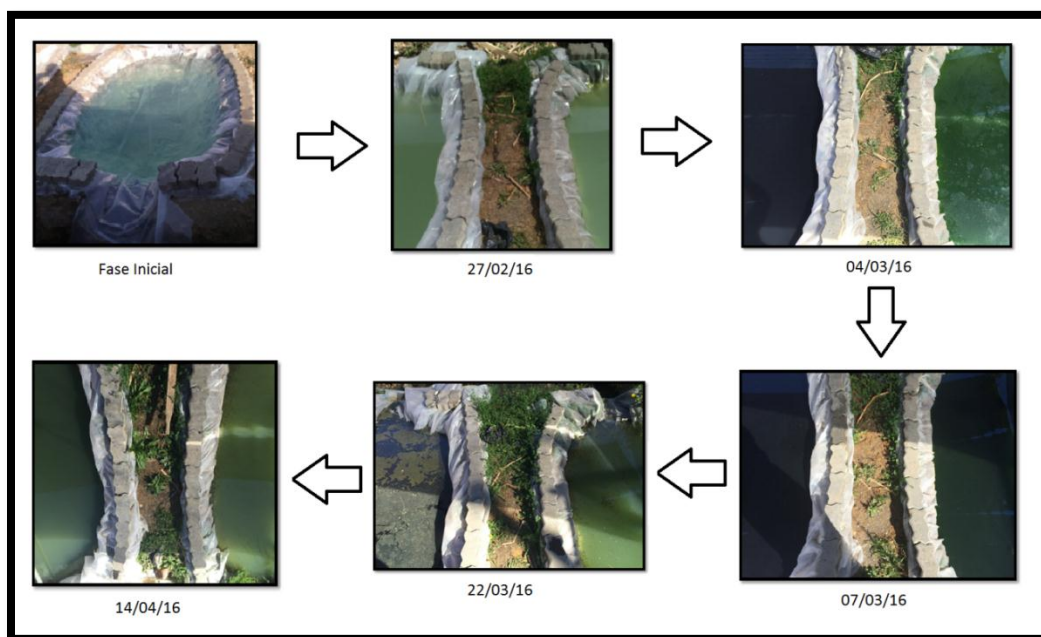


Figura 9: Evolución de los cuerpos receptores.

De la Figura 9 se puede apreciar que la Laguna 1 con el tiempo tomó una coloración verdosa, la cual fue variando durante todo el proceso de operación. En cambio, la Laguna 2 se tornó de un color grisáceo, impacto provocado por los finos en suspensión del óxido de calcio. Dicha coloración se mantuvo prácticamente todo el proceso de operación, sin embargo, luego de 3 semanas de terminada la fase de operación, el día 14/04/16, se observa que la Laguna 2, al igual que la Laguna 1, se tornó de un color verdoso, lo que se puede explicar por la sedimentación del material en suspensión mencionado anteriormente.

5.1.2. Registro fotográfico de probetas

En la Figura 10 se presenta un registro fotográfico de probetas, tomadas en la zona media de las lagunas, mostrando la evolución de las aguas en el tiempo, donde cada fotografía a la izquierda es de una probeta tomada desde la Laguna 2 y a la derecha desde la Laguna 1. El detalle del registro fotográfico de las probetas se presenta en el Anexo A.

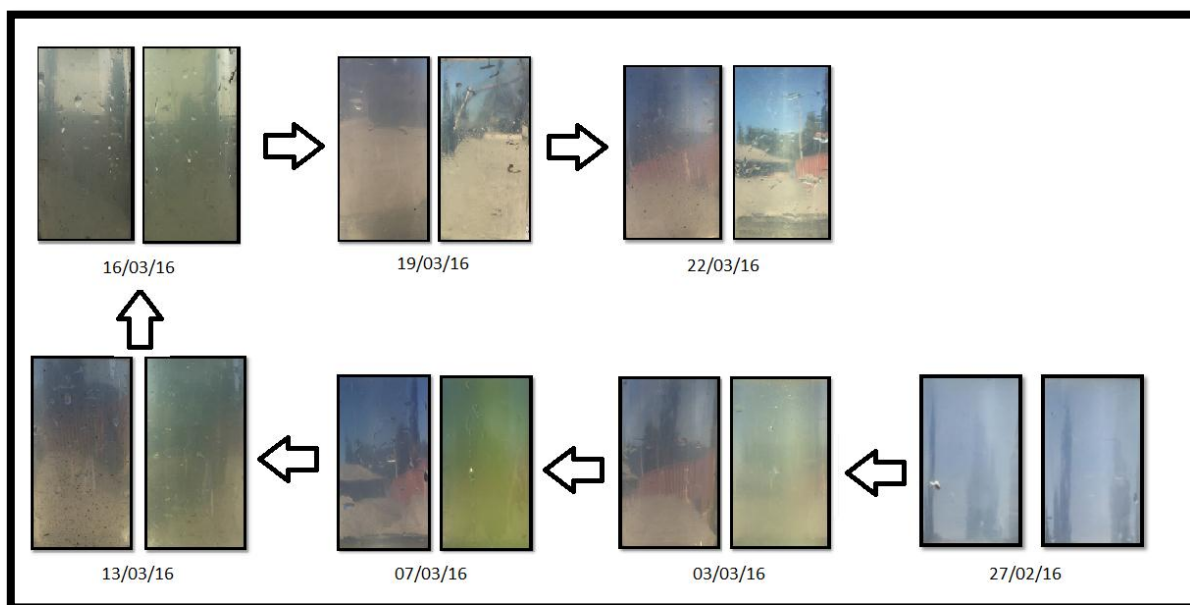


Figura 10: Probetas evolución del agua de cuerpos receptores.

De la Figura 10 se puede apreciar de mejor manera lo mencionado en el punto anterior, donde las tonalidades del agua de ambas lagunas fueron variando en el tiempo. La disminución de la tonalidad de las lagunas se puede explicar debido a que en la última etapa de operación, las concentraciones de nutrientes del afluente disminuyeron. Además se

puede observar material en suspensión en las probetas de la Laguna 2 con fecha 10/03/16 y 13/03/16, lo que evidencia arrastre de material desde el humedal que alimenta dicha laguna, por lo cual se realizó el test de la toalla explicado en el punto siguiente.

5.1.3. Material Sedimentado

Debido a la presencia de material en suspensión, y con los antecedentes obtenidos en el cambio de coloración de la Laguna 2, después de finalizado el proceso de operación, se optó por realizar el test de la toalla y los resultados son los siguientes.

5.1.3.1. Resultados del Test de la toalla Laguna 1

En la Figura 11 se muestra el resultado obtenido de la realización del test en la Laguna 1.



Figura 11: Test de la toalla en Laguna 1.

Como se puede apreciar en la Figura 11, el test solo muestra la existencia de suciedad en el fondo de la laguna.

5.1.3.2. Resultados del Test de la toalla Laguna 2

En la Figura 12 se muestra el resultado obtenido de la realización del test en la Laguna 2.



Figura 12: Test de la toalla en Laguna 2.

Como se puede observar en la Figura 12, se evidencia la decantación del material en suspensión, el cual tiñó la Laguna 2 de color grisáceo, que al decantar y como se observa en las imágenes del día 14/04/16, comenzó a tomar la coloración verdosa natural de un cuerpo de agua estancada.

5.1.4. Registro fotográfico a través de microscopio

Se realizó un registro fotográfico de una muestra de agua para cada laguna, donde para la muestra de la Laguna 1 se tomaron fotografías con 40x, 100x y 1000x, en cambio para la muestra de la Laguna 2 se tomaron fotografías con 40x, 100x y 200x debido a la poca presencia de microorganismos, donde en un zoom mayor no se apreciaba la presencia de estos. El registro fotográfico se realizó en el laboratorio de la facultad de Ingeniería en Maderas de la Universidad del Bío-Bío, campus Concepción.

A continuación se presenta el registro fotográfico.

5.1.4.1.Registro fotográfico a través de microscopio Laguna 1

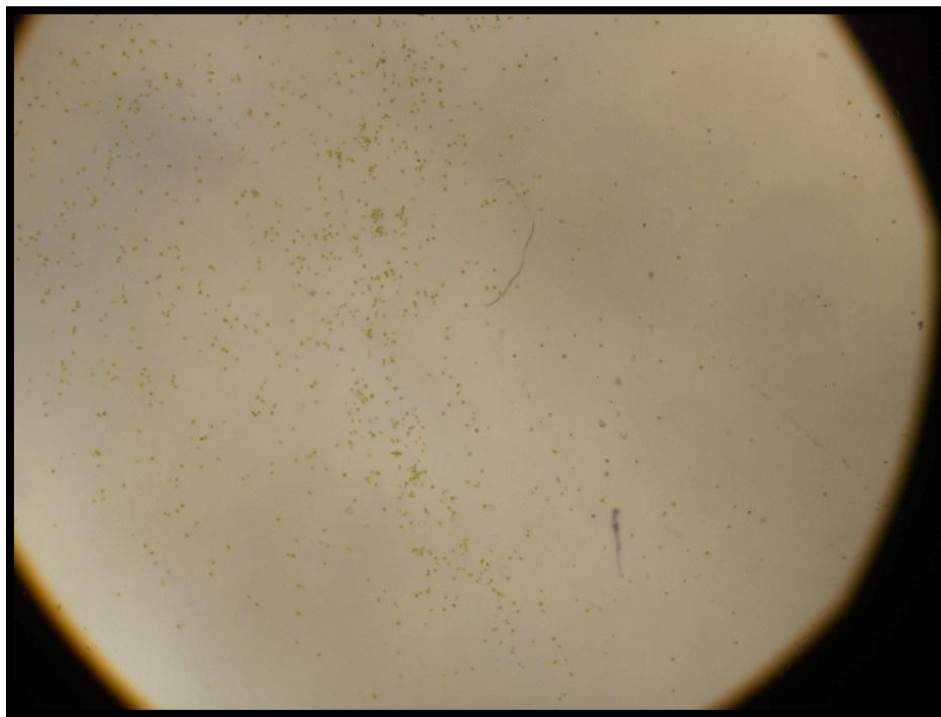


Figura 13: Vista microscópica muestra Laguna 1 (40x).

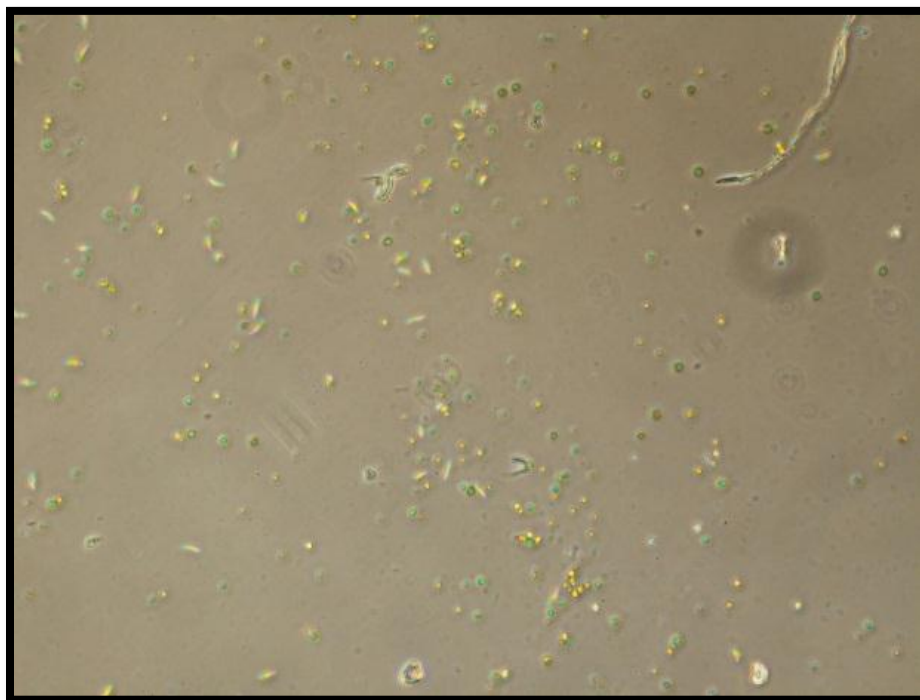


Figura 14: Vista microscópica muestra Laguna 1 (100x).

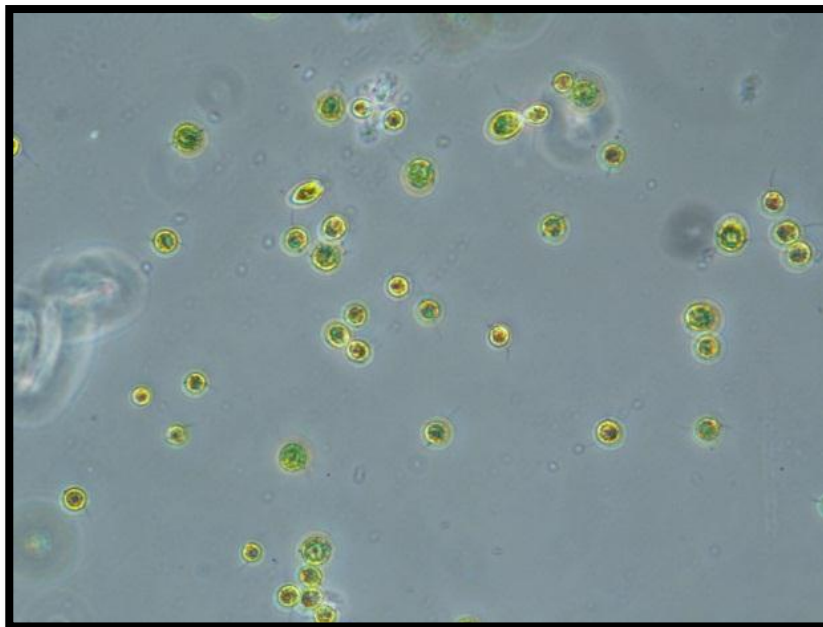


Figura 15: Vista microscópica muestra Laguna 1 (1000x).

De las figuras 13, 14 y 15 se puede apreciar una cantidad importante de microorganismos.

5.1.4.2.Registro fotográfico a través de microscopio Laguna 2:

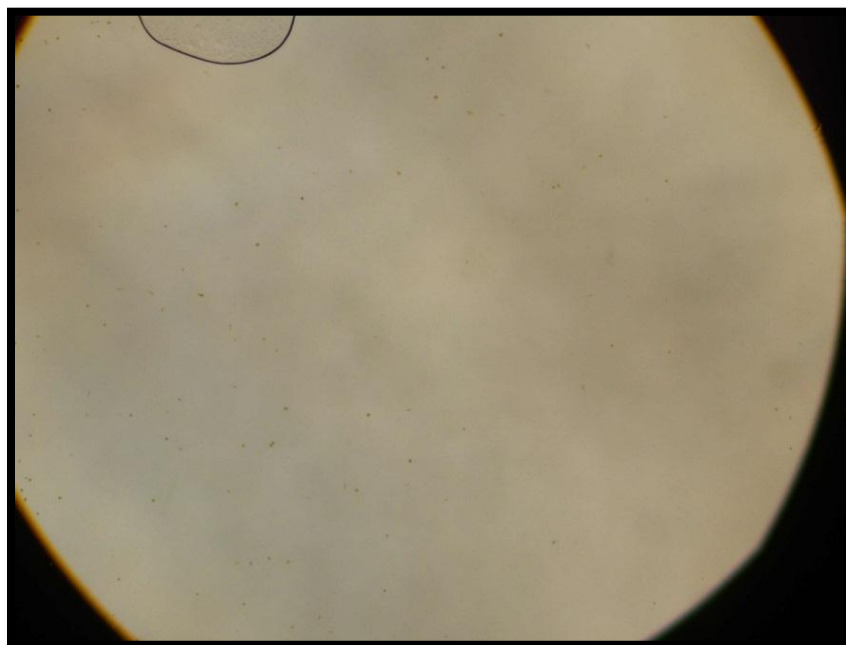


Figura 16: Vista microscópica muestra Laguna 2 (40x).

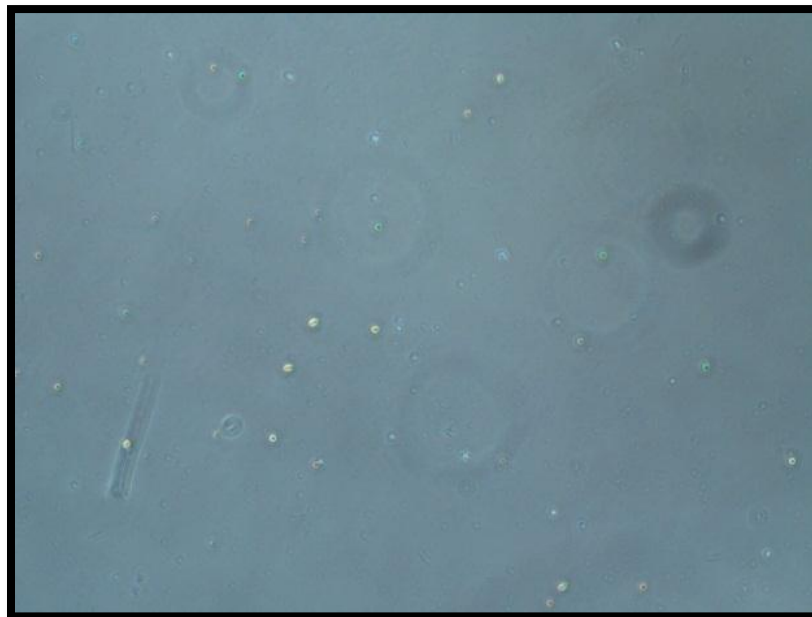


Figura 17: Vista microscópica muestra Laguna 2 (100x).

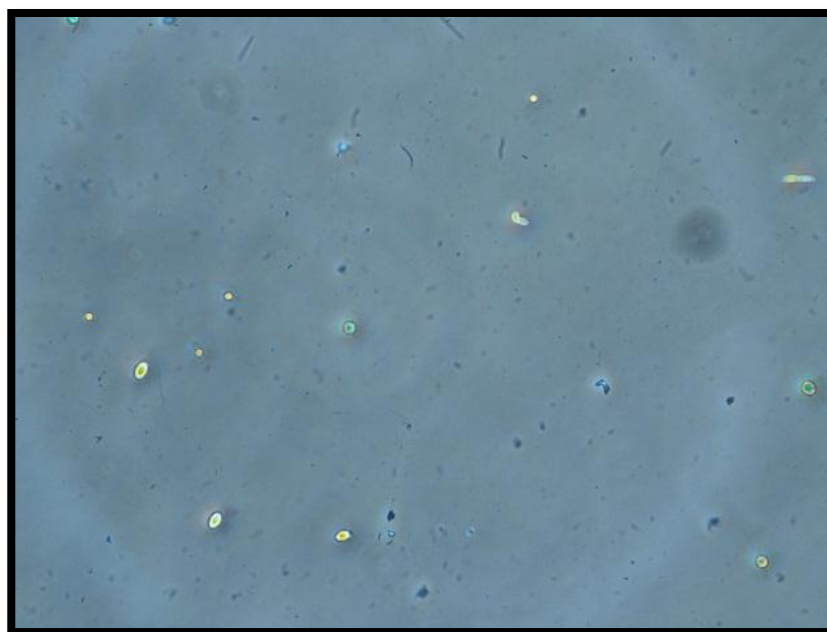


Figura 18: Vista microscópica muestra Laguna 2 (200x).

En las figuras 16, 17 y 18 se tiene una presencia reducida de microorganismos sino más bien, lo que se confirma al compararlos con los análisis microscópicos de la Laguna 1 en la que sí se observa una presencia considerable de microorganismos. Como único elemento

diferencial entre ambas lagunas es la presencia de óxido de cal en la Laguna 2, el contenido de este componente en la laguna explicaría la menor población de microorganismos, puesto que estaría inhibiendo la proliferación de estos debido a la presencia de finos en suspensión que causa la tonalidad grisácea que no permite el paso de la luz solar hacia el interior de la laguna necesaria para el proceso de fotosíntesis.

5.2. Análisis de resultados de muestras Laguna 1 (sin óxido de cal)

En la Figura 19 y Tabla 5 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de Nitrógeno realizados tanto en el afluente como en el efluente de la Laguna 1, además del balance de masas asumiendo que la concentración de Nitrógeno de salida de la laguna se obtiene netamente por un efecto de dilución.

Como se mencionó anteriormente, la laguna inicialmente se encontraba llena de agua potable, por lo cual la concentración de nitrógeno era prácticamente 0mg/lit. Al comenzar la operación se ingresa con una concentración de nitrógeno del orden de 30mg/lit hasta llegar a una concentración de 79mg/lit, por otra parte, las mediciones de la salida varían desde 11mg/lit hasta 60 mg/lit (muestra 1 a la 9), para este caso se tienen concentraciones de nitrógeno de entrada superiores a las de salida por lo que a medida que aumenta la concentración de entrada, se va contaminando la laguna incrementándose las concentraciones de nitrógeno en esta, a diferencia de lo ocurrido con las muestras 10 y 11 cuya concentración de entrada es del orden de 45mg/lit siendo inferior a la de salida que es de 55mg/lit, lo que quiere decir que el afluente es de mejor calidad que el agua presente en la laguna, repercutiendo en una disminución de la concentración de nitrógeno presente en el cuerpo de agua, mejorando así su calidad.

También se puede observar que el valor teórico de la salida del efluente, que está condicionado por la dilución y que se basa en el balance de masas planteado anteriormente, es mayor que el valor empírico del efluente, por lo que se deduce que se produce un efecto constante de remoción biológica de nitrógeno.

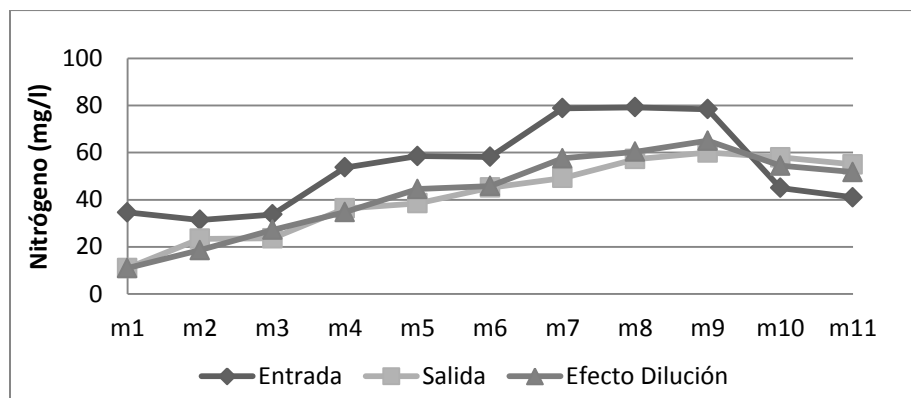


Figura 19: Nitrógeno en Laguna 1

Campaña	Muestra	Afluente	Efluente	Efecto Dilución
C1	m1	34,6	11,0	11,00
	m2	31,4	23,4	18,56
	m3	33,7	23,6	27,21
C2	m4	53,7	36,3	34,75
	m5	58,5	38,5	44,52
	m6	58,2	45,1	45,80
C3	m7	78,8	49,2	57,58
	m8	79,2	57,2	60,31
	m9	78,4	60,0	65,05
C4	m10	45,0	58,0	54,44
	m11	41,0	55,0	51,70

Tabla 6: Nitrógeno en Laguna 1

De la Figura 20 se puede apreciar que la variación entre los resultados obtenidos empíricamente y los calculados realizando el balance de masas para el efecto dilución es de un 2%, lo que debiese corresponder a la remoción biológica no considerada en el cálculo.

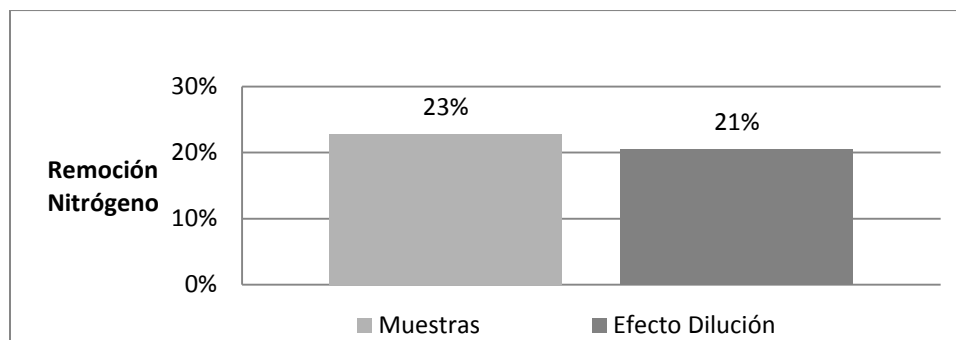


Figura 20: Comparación remoción de Nitrógeno en muestras versus efecto dilución en Laguna 1

En la Figura 21 y Tabla 6 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de Fósforo realizados tanto en el afluente como en el efluente de la Laguna 1, además del balance de masas asumiendo que la concentración de Fósforo de salida de la laguna se obtiene netamente por un efecto de dilución.

Como se mencionó anteriormente, la laguna inicialmente se encontraba llena de agua potable, por lo cual la concentración de fósforo era prácticamente 0mg/lit. Al comenzar la operación se ingresa con una concentración de fósforo de 9,7mg/lit hasta llegar a una concentración de 15,1mg/lit, por otra parte, las mediciones de la salida varían desde 6,9mg/lit hasta 10,1mg/lit (muestra 5 a la 9), para este caso se tienen concentraciones de fósforo de entrada superiores a las de salida por lo que a medida que aumenta la concentración de entrada, se va contaminando la laguna incrementándose las concentraciones de fósforo en esta, a diferencia de lo ocurrido con la muestra 11 cuya concentración de entrada es de 5,5mg/lit siendo inferior a la de salida que es de 6,9mg/lit, lo que quiere decir que el afluente es de mejor calidad que el agua presente en la laguna, repercutiendo en una disminución de la concentración de fósforo presente en el cuerpo de agua, mejorando así su calidad.

También se puede observar, al igual que en la situación anterior, que el valor teórico de la salida del efluente, el cual está condicionado por la dilución y que se basa en el balance de masas planteado anteriormente, es mayor que el valor empírico del efluente, que a diferencia de lo ocurrido con el nitrógeno, en este caso se debería a una remoción biofísica de fósforo

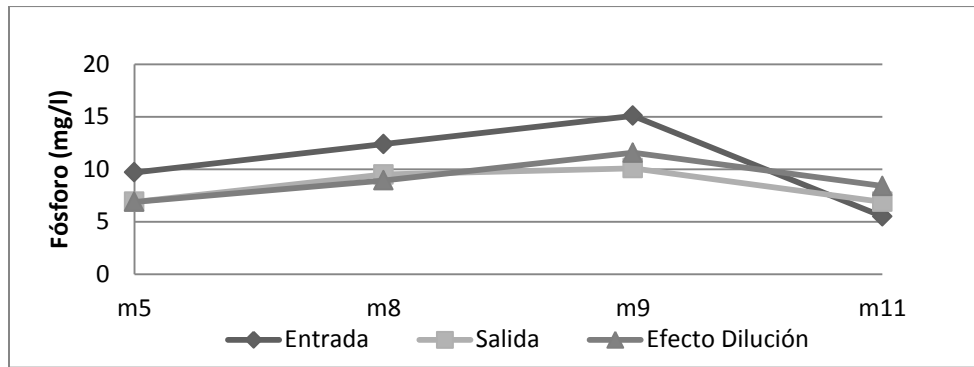


Figura 21: Fósforo en Laguna 1

Campaña	Afluente	Efluente	Efecto Dilución
m5	9,7	6,9	6,90
m8	12,4	9,5	8,94
m9	15,1	10,1	11,57
m11	5,5	6,9	8,40

Tabla 7: Fósforo en Laguna 1

De la Figura 22 se puede apreciar que la variación entre los resultados obtenidos empíricamente y los calculados realizando el balance de masas para el efecto dilución es de un 6%, lo que debiese corresponder a la remoción física omitida en el cálculo.

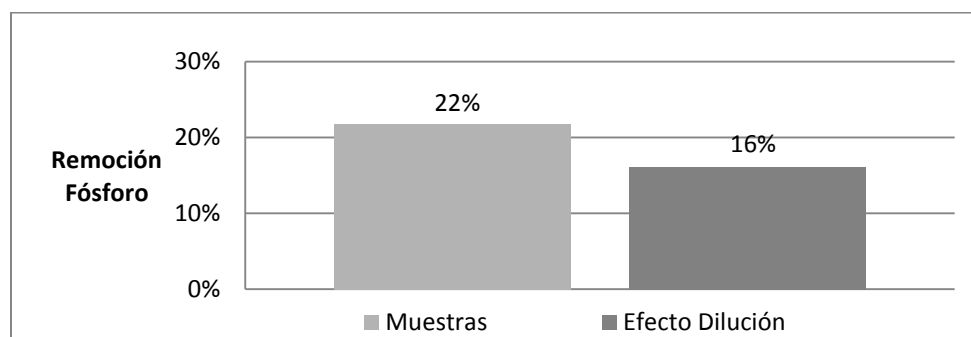


Figura 22: Comparación remoción de Fósforo en muestras versus efecto dilución en Laguna 1

En la Figura 23 y Tabla 8 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de Clorofila *a* realizados tanto en el afluente como en el efluente de la Laguna 1.

Se puede apreciar que la concentración de Clorofila *a* fue disminuyendo en el tiempo, pasando de una condición Hipereutrófica a una condición Eutrófica similar a las de las Lagunas de Chile

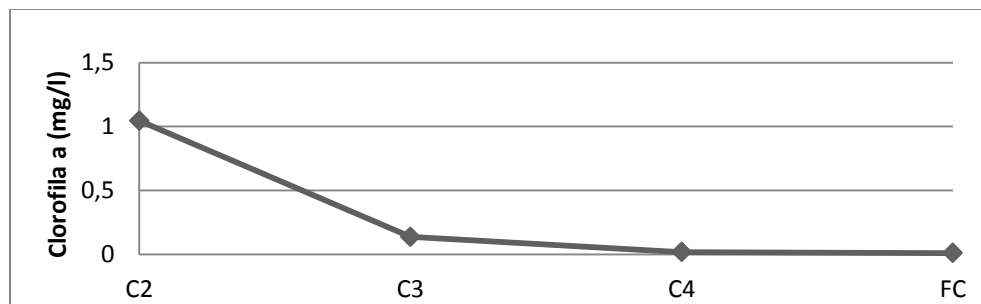


Figura 23: Clorofila *a* Laguna 1

Campaña	Clorofila a (mg/l)
C2	1,046
C3	0,137
C4	0,018
FC	0,01

Tabla 8: Clorofila *a* en Laguna 1

5.3. Análisis de resultados de muestras Laguna 2 (con óxido de cal)

En la Figura 24 y Tabla 9 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de Nitrógeno realizados tanto en el afluente como en el efluente de la Laguna 2, además del balance de masas asumiendo que la concentración Nitrógeno de salida de la laguna se obtiene netamente por un efecto de dilución.

Como se mencionó anteriormente, la laguna inicialmente se encontraba llena de agua potable, por lo cual la concentración de nitrógeno era prácticamente 0mg/lit. Al comenzar la operación se ingresa con una concentración de nitrógeno de 27,6mg/lit hasta llegar a una concentración de 78mg/lit, por otra parte, las mediciones de la salida varían desde 10mg/lit hasta 58,8 mg/lit (muestra 3 a la 9), para este caso se tienen concentraciones de nitrógeno de entrada superiores a las de salida por lo que a medida que aumenta la concentración de entrada, se va contaminando la laguna incrementándose las concentraciones de nitrógeno en esta, a diferencia de lo ocurrido con las muestras 10 y 11 cuya concentración de entrada es del orden de 40mg/lit siendo inferior a la de salida que es de 50mg/lit, lo que quiere decir que el afluente es de mejor calidad que el agua presente en la laguna, repercutiendo en una

disminución de la concentración de nitrógeno presente en el cuerpo de agua, mejorando así su calidad.

También se puede observar que el valor teórico de la salida del efluente, que está condicionado por la dilución y que se basa en el balance de masas planteado anteriormente, es mayor que el valor empírico del efluente, por lo que se deduce que se produce un efecto constante de remoción biológica de nitrógeno.

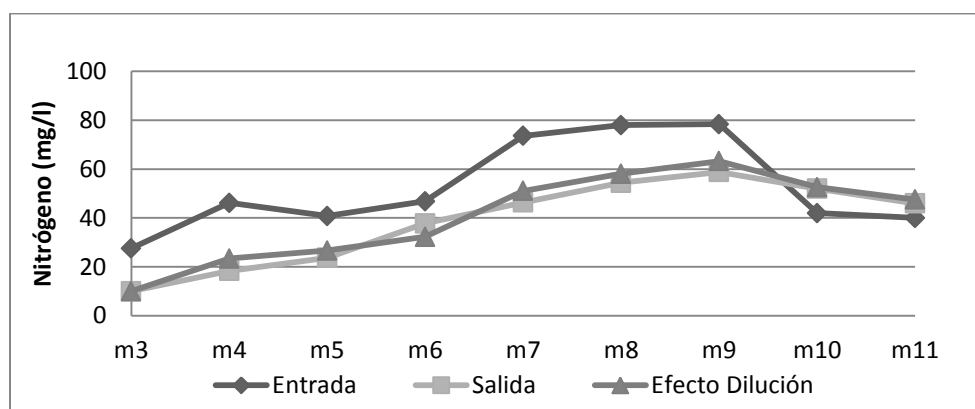


Figura 24: Nitrógeno en Laguna 2

Campaña	Muestra	Afluente	Efluente	Efecto Dilución
C1	m3	27,6	10,0	10,00
	m4	46,2	18,3	23,41
C2	m5	40,8	23,7	26,63
	m6	46,8	37,8	32,26
C3	m7	73,6	46,4	51,06
	m8	78,0	54,4	58,10
	m9	78,4	58,8	63,29
C4	m10	42,0	52,0	52,58
	m11	40,0	46,0	47,56

Tabla 9: Nitrógeno en Laguna 2

De la Figura 25 se puede apreciar que la variación entre los resultados obtenidos empíricamente y los calculados realizando el balance de masas para el efecto dilución es de

un 4%, lo que debiese corresponder a la remoción biológica no considerada en el cálculo. Además la remoción de nitrógeno empírica fue de un 4% más que en la Laguna 1

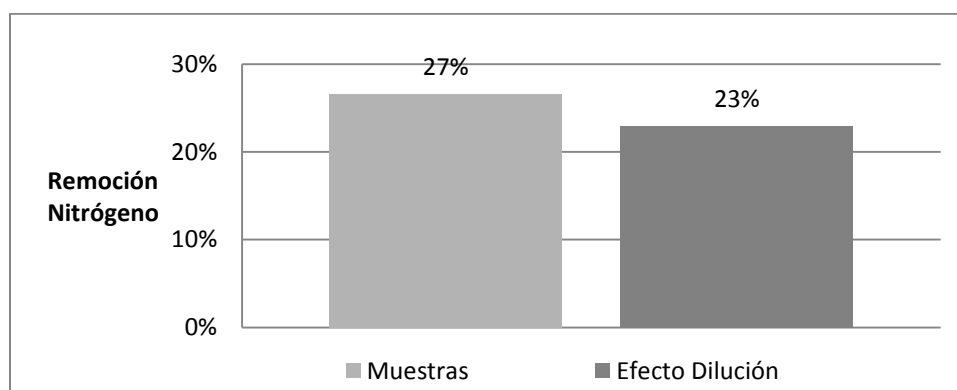


Figura 25: Comparación remoción de nitrógeno en muestras versus efecto dilución en Laguna 2

En la Figura 26 y Tabla 10 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de Fósforo realizados tanto en el afluente como en el efluente de la Laguna 2, además del balance de masas asumiendo que la concentración de fósforo de salida de la laguna se obtiene netamente por un efecto de dilución.

Como se mencionó anteriormente, la laguna inicialmente se encontraba llena de agua potable, por lo cual la concentración de fósforo era prácticamente 0mg/lit. Al comenzar la operación se ingresa con una concentración de fósforo de 6,3mg/lit hasta llegar a una concentración de 13,7mg/lit, por otra parte, las mediciones de la salida varían desde 1,1mg/lit hasta 7,1mg/lit (muestra 5 a la 9), para este caso se tienen concentraciones de fósforo de entrada superiores a las de salida por lo que a medida que aumenta la concentración de entrada, se va contaminando la laguna incrementándose las concentraciones de fósforo en esta, a diferencia de lo ocurrido con la muestra 11 cuya concentración de entrada es de 3,1mg/lit siendo inferior a la de salida que es de 3,7mg/lit, lo que quiere decir que el afluente es de mejor calidad que el agua presente en la laguna, repercutiendo en una disminución de la concentración de fósforo presente en el cuerpo de agua, mejorando así su calidad.

También se puede observar, al igual que en la Laguna 1, que el valor teórico de la salida del efluente, el cual está condicionado por la dilución y que se basa en el balance de masas

planteado anteriormente, es mayor que el valor empírico del efluente, que a diferencia de lo ocurrido con el nitrógeno, en este caso se debería a una remoción biofísica de fósforo

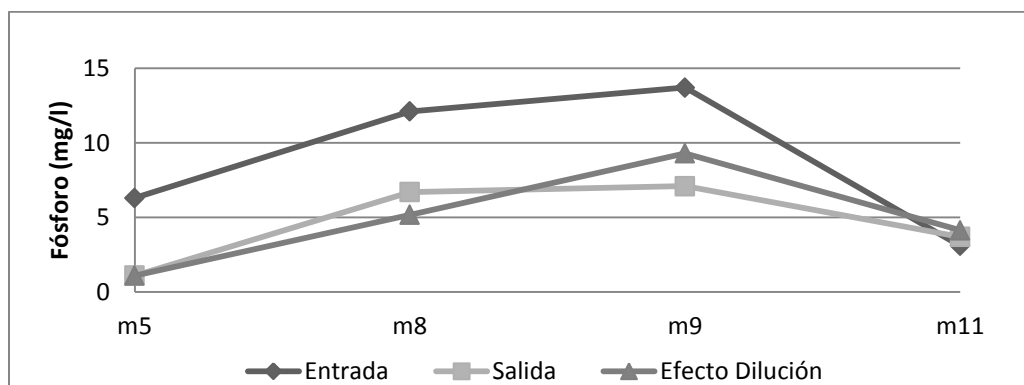


Figura 26: Fósforo Laguna 2

Campaña	Afluente	Efluente	Efecto Dilución
m5	6,3	1,1	1,1
m8	12,1	6,7	5,17
m9	13,7	7,1	9,29
m11	3,1	3,7	4,14

Tabla 10: Fósforo en Laguna 2

De la Figura 27 se puede apreciar que la variación entre los resultados obtenidos empíricamente y los calculados realizando el balance de masas para el efecto dilución es de un 3%, lo que debiese corresponder a la remoción biológica no considerada en el cálculo. Además, comparándolo con lo ocurrido para la Laguna 1, donde la remoción de fósforo fue de un 22 y 16% (para las muestras y el efecto dilución respectivamente), en este caso la remoción fue alrededor del doble, lo que se atribuye a la precipitación del Fósforo favorecida por la presencia del óxido de cal.

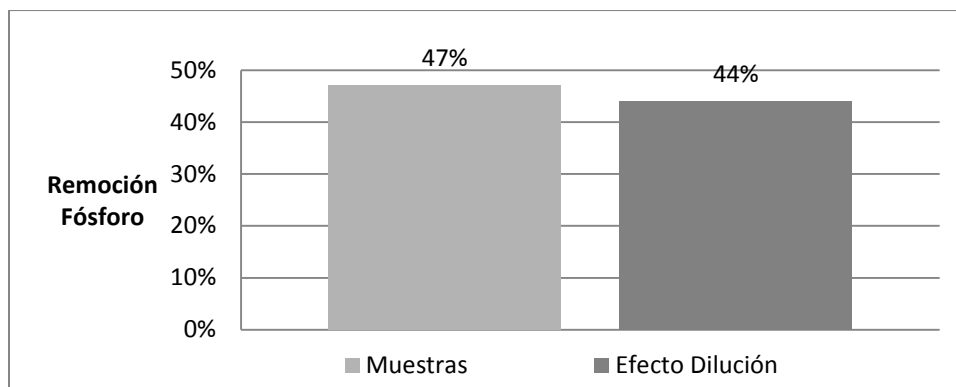


Figura 27: Comparación remoción de fósforo empírico versus efecto dilución

En la Figura 28 y Tabla 11 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de Clorofila *a* a realizados tanto en el afluente como en el efluente de la Laguna 2.

Se puede apreciar que la concentración de Clorofila *a* aumentó considerablemente desde la primera medición hasta la que se realizó fuera de campaña, pasando de una condición Oligotrófica a una condición Hipereutrófica.

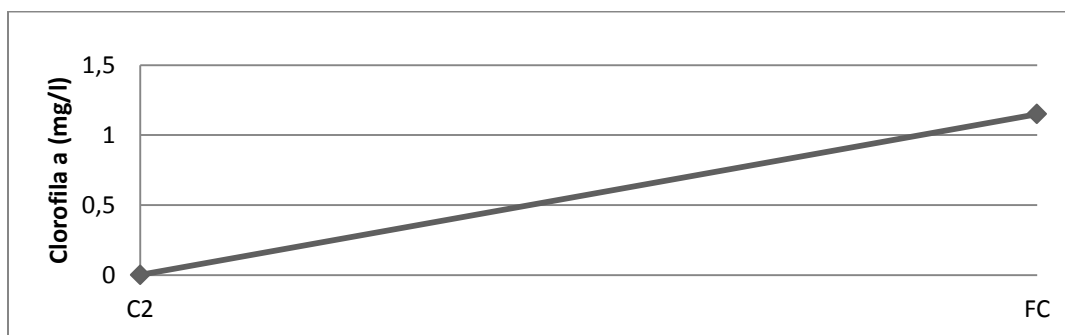


Figura 28: Clorofila a Laguna 2

Campaña	Clorofila a (mg/l)
C2	0,0016
FC	1,15

Tabla 11: Clorofila *a* en Laguna 2

6. CONCLUSIONES

Capítulo donde según los objetivos planteados, los resultados obtenidos y los análisis realizados se determinan las siguientes conclusiones.

- Del test de la toalla se concluye que el uso de óxido de calcio en el humedal previo tiene como consecuencia el arrastre de finos, los que le dan una tonalidad grisácea a la Laguna 2.
- Del test de la toalla se advierte que la coloración grisácea de la Laguna 2 se debe al material en suspensión producto del arrastre del sustrato utilizado en el tratamiento previo (óxido de cal) el cual sedimentó.
- La coloración grisácea de las aguas impide la llegada de la luz solar al sistema inhibiendo la presencia de microorganismos.
- Al tratar las aguas antes de ingresar a la laguna, estas entrarían con menor carga contaminante, por lo que sólo por un efecto de dilución, se estaría mejorando la calidad del agua del cuerpo receptor.
- De acuerdo a los datos de concentración teórica de nutrientes en el efluente y los datos empíricos se concluye que hay una eliminación biológica y biofísica del nitrógeno y fósforo respectivamente en las lagunas.
- El porcentaje de variación entre los datos de concentración teórica de nutrientes en el efluente y los datos empíricos de la Laguna 1 es de un 2% para el nitrógeno y un 6% para el fósforo, en cuanto a la Laguna 2 es de un 4% para el nitrógeno y un 3% para el fósforo.
- El porcentaje de remoción de fósforo de la Laguna 2 (47%) es prácticamente el doble que el de la Laguna 1 (22%), por lo que se concluye que la remoción física vía óxido de cal es relevante.
- El porcentaje de remoción de nitrógeno de la Laguna 1 (23%) es prácticamente igual al de la Laguna 2 (27%), por lo que se concluye que la remoción biológica del nitrógeno no se ve afectada por los finos del óxido de calcio.

REFERENCIAS

- Álvarez, T. (2007). Ecofronteras. Salud y enfermedad del "Santuario del Manatí".
- Baeza, (2011). Importancia y uso de los sistemas lacustres de la VIII región, con énfasis en los sistemas urbanos del gran Concepción. Universidad de Concepción. Concepción.
- Bellair , P. & CH. Pomerol. (1977). Elementos de Géologie. A. Collin.
- Biología, (2014). Fitoplancton. Recuperado el 15 de 02 de 2016, de Ciencia y biología: <http://cienciaybiologia.com/fitoplancton/>
- Brock, (1978). Microbiología de los microorganismos. Ed. Omega, Barcelona
- Centro de Ecología Aplicada LTDA. (2014). Diagnóstico de la condición trófica de cuerpos lacustres utilizando nuevas herramientas tecnológicas. Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas. Santiago.
- Cidta. Aguas Residuales. Recuperado el 20 de 02 de 2016, de Centro de investigación y desarrollo tecnológico del agua: <http://cidta.usal.es/cursos/ETAP/modulos/libros/residuales.pdf>
- Cortez, M. (1997). Diagnostico ambiental de las lagunas Lo Custodio y Chica de San Pedro. Universidad de Concepción. Concepción.
- Del Águila (2011). La Eutrofización. Recuperado el 15 de 03 de 2016, de Agua y más cosas: <http://aguaymascosas.blogspot.cl/2011/12/la-eutrofizacion.html>
- Diaz, C. (1994). El control de la eutrofización de la laguna de San Pedro. Concepción.
- Ambientum, (s.f.). El nitrógeno y sus compuestos. Recuperado el 10 de 03 de 2016, de Ambientum: http://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/aguas/Consideraciones_del_nitrogeno_sus_compuestos.asp
- Geoenciclopedia. (s.f.). Lagunas. Recuperado el 17 de 03 de 2016, de Geoenciclopedia: <http://www.geoenciclopedia.com/lagunas/>

Guerrero, P. (2011). Laguna. Recuperado el 17 de 03 de 2016, de Geografía: <http://geografia.laguia2000.com/general/laguna>

Moncada, F. (2011). Diagnóstico de la calidad ambiental de la laguna lo Galindo y propuesta de recuperación urbana. Proyecto de Título presentado en obtener el Título de Ingeniero Civil. Concepción: Universidad del Bío-Bío.

Monedutti, B., Balseiro, E., & Queimaliños, D. (s.f.). Structure and dynamics of food webs in Andean lakes. *Lakes & Reservoirs: Research and Management* 3.

Morales, B., & Chávez, G. (2010). Estimación de la carga de nutrientes procedentes de la cuenca de drenaje superficial del río Tepeguasapa. *Nexo*, 19.

Moreno, M. (1991). Depuración por lagunaje de aguas residuales. Manual de operadores. Madrid: Marfil, S. L.

Mossetti, F. (1977). *Le acqua*. Colección II Nostro Universo. UTET.

Nova, M. (2016). Evaluación de la incidencia del medio granular en un humedal subsuperficial en el proceso de remoción de nutriente. Universidad del Bío-Bío. Concepción

Pardo, R., & Vila, I. (2006). Causas que podrían determinar la eutroficación en los lagos de Chile. Concepción.

Parra, O. (1989). La eutroficación de la Laguna Grande de San Pedro, Concepción, Chile: un caso de estudio. *Ambiente y Desarrollo*, 1, 117-136.

Parra, O., Valdovinos, C., Urrutia, R., Cisternas, M., Habit, E., & Mardones, M. (2003). Caracterización y tendencias tróficas de cinco lagos costeros de Chile central. *Limnetica*, 22(1-2), 51-83.

Parra, O., Della Croce, N., & Valdovinos, C. (2004). Elementos de la limnología teórica y aplicada. Concepción: Microart.

Parra, O. (2009). Situación ambiental de las lagunas de Concepción. Seminario "Recuperemos las lagunas para los habitantes de concepción". Concepción, Chile: Municipalidad de Concepción, ESSBIO, Universidad de Concepción, Centro EULA.

Ramalho, R. (1996). Tratamiento de aguas residuales. En R. Ramalho, Tratamiento de aguas residuales (pág. 23). Barcelona: Reverté.

Rodríguez, D., Muñoz, R., Cornejo, J., & Espinoza, C. (2004). Limnología y Eutrofización. Santiago.

Schroeder, E.D., 1977: water and wastewater treatment. McGraw-Hill, Nueva York.

Smith, V. H., Tilman, G. D., & Nekola, J. C. (1999). Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. Environmental pollution, 100 (1), 179-196

Urrutia, R (2009). Programa de investigación científica para la restauración de los lagos urbanos de la ciudad de Concepción. Concepción, Chile: Universidad de Concepción, Centro EULA.

Wrobel, L.C., 1991. Water pollution: modelling measuring end prediction. London, Elseviers. London

ANEXO A: CONSTRUCCIÓN CUERPOS RECEPTORES

Para la construcción de ambos cuerpos receptores se tomaron en cuenta las dimensiones mencionadas en el punto 4.3 y las consideraciones mencionadas en el punto 4.6.

➤ **Excavación y nivelación.**

En la Figura A1 se muestra el proceso de excavación y nivelación de los cuerpos receptores.



Figura A1: Excavación y nivelación de cuerpos receptores

➤ **Impermeabilización.**

En la Figura A2 se muestra la impermeabilización de los cuerpos receptores para la contención de las aguas.



Figura A2: Impermeabilización de cuerpos receptores

➤ **Cierre perimetral.**

En la Figura A3 se muestra el cierre perimetral implementado para la restricción de acceso a terceros.



Figura 29: Cierre perimetral

➤ **Dispositivo de entrada.**

En la Figura A4 se muestra un esquema del dispositivo de entrada implementado, el cual es de tipo sifón y proviene desde los humedales artificiales que preceden a los cuerpos receptores.

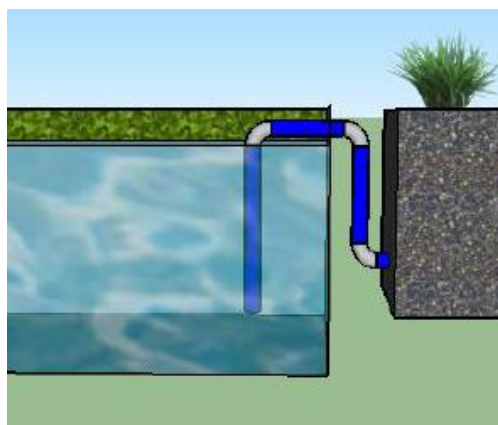


Figura 30: Dispositivo de entrada

➤ **Dispositivo de salida.**

En la Figura A5 se muestra la salida implementada en los cuerpos receptores, la cual evacúa las aguas por rebalse



Figura A5: Dispositivo de salida

➤ **Techo de protección solar y construcción definitiva.**

En la Figura A6 se muestra la construcción definitiva de los cuerpos receptores, además del techo de protección solar.



Figura A6: Techo de protección solar y construcción definitiva

ANEXO B: OPERACIÓN Y REGISTRO FOTOGRÁFICO LAGUNAS

➤ **Puesta en marcha de lagunas**

Como fecha de inicio para comenzar a recibir agua desde los humedales artificiales, se tenía presupuestado el día 18/02/16, donde por problemas técnicos, aquella fecha sólo se pudo recibir agua del humedal que funciona de manera convencional, comenzando con la toma de muestra el día 21/02/16. Ya habiendo solucionado los problemas presentados, el día 26/02/16 se comenzó a recibir agua del humedal que contiene óxido de cal, comenzando con la toma de muestras en esta laguna el día 27/02/16, el cronograma de toma de muestras fue mostrado anteriormente en la Tabla 4. Ambas lagunas como condición inicial se llenaron con agua potable como se muestra en la Figura B1.



Figura B1: Condición inicial lagunas.

➤ **Registro fotográfico**

A medida que ingresaba el agua residual a las lagunas, estas fueron cambiando sus características. Se presenta un registro fotográfico con su evolución, donde cada fotografía a la izquierda es la laguna que recibe aguas desde el humedal con contenido de óxido de cal (Laguna 2) y a la derecha se presenta la laguna que recibe aguas desde el humedal sin contenido de óxido de cal (Laguna 1).

➤ **Fotografías 21/02/16: Laguna 2 sin funcionar**



Figura B2: Lagunas 2 y 1. 21/02/16



Figura B3: Probeta Laguna 1. 21/02/16

➤ **Fotografías 24/02/16: Laguna 2 en reparación**



Figura B4: Lagunas 2 y 1. 24/02/16



Figura B5: Probeta Laguna 1. 24/02/16

➤ **Fotografías 27/02/16: Ambas lagunas operando**



Figura B6: Lagunas 2 y 1. 27/02/16



Figura B7: Probetas Laguna 2 y 1. 27/02/16

➤ **Fotografías 01/03/16:**



Figura 31: Lagunas 2 y 1. 01/03/16



Figura B9: Probetas Lagunas 2 y 1. 01/03/16

➤ **Fotografías 03/03/16:**



Figura B10: Lagunas 2 y 1. 03/13/16



Figura B11: Laguna 2 y 1. 03/13/16



Figura B12: Probetas Laguna 2 y 1. 03/13/16

➤ **Fotografías 04/03/16:**



Figura B13: Lagunas 2 y 1. 04/03/16



Figura 3214: Lagunas 2 y 1. 04/03/16

➤ **Fotografías 07/03/16**



Figura B15: Lagunas 2 y 1. 07/03/16



Figura B16: Lagunas 2 y 1. 07/03/16



Figura 33: Probetas Laguna 2 y 1. 07/03/16

➤ **Fotografías 10/03/16**



Figura B18: Lagunas 2 y 1. 10/03/16



Figura B19: Lagunas 2 y 1. 10/03/16



Figura B20: Probetas Lagunas 2 y 1. 10/03/16

➤ **Fotografías 13/03/16**



Figura 34: Lagunas 2 y 1. 13/03/16



Figura B22: Lagunas 2 y 1. 13/03/16



Figura B23: Probetas Laguna 2 y 1. 13/03/16

➤ **Fotografías 16/03/16**



Figura B24: Lagunas 2 y 1. 16/03/16



Figura B25: Lagunas 2 y 1. 16/03/16

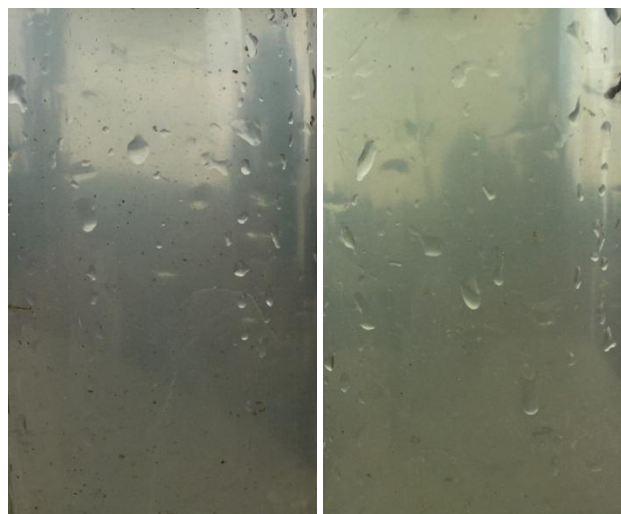


Figura B26: Probetas Laguna 2 y 1. 16/03/16

➤ **Fotografías 19/03/16**



Figura B27: Lagunas 2 y 1. 19/03/16



Figura B28: Lagunas 2 y 1. 19/03/16

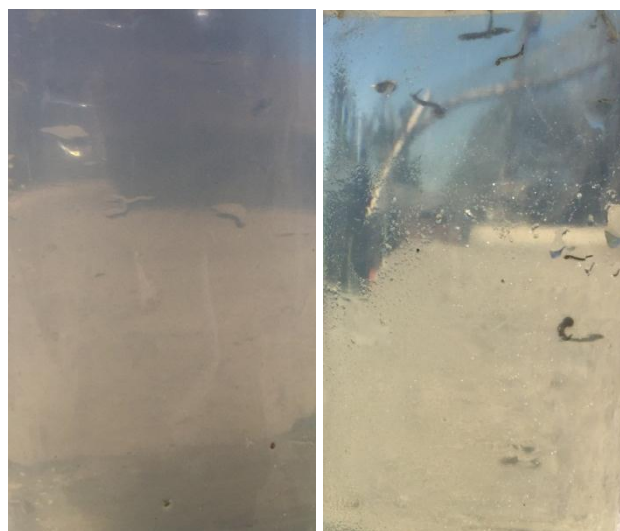


Figura B29: Probetas Lagunas 2 y 1. 19/03/16

➤ **Fotografías 22/03/16**



Figura B30: Lagunas 2 y 1. 22/03/16



Figura 35: Lagunas 2 y 1. 22/03/16



Figura B32: Probetas Lagunas 2 y 1. 22/03/16

- **Fotografías 14/04/16: Estado de lagunas luego de 3 semanas finalizada la operación**



Figura B33: Lagunas 2 y 1. 14/04/16



Figura B34: Lagunas 2 y 1. 14/04/16