

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

Profesor Patrocinante:

Dr. Pedro Cisterna Osorio



EVALUACIÓN DE LA INCIDENCIA DEL MEDIO GRANULAR EN UN HUMEDAL SUBSUPERFICIAL EN EL PROCESO DE REMOCIÓN DE NUTRIENTE.

Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de Ingeniero

Civil

MAURICIO NOVA DURÁN

Concepción, Marzo 2016

NOMENCLATURA.

A_C : Área Transversal del humedal. (m^2)

A_S : Área Superficial del humedal. (m^2)

A_{Tub} : Área de la tubería de alimentación a los humedales. (m^2)

C_a : Concentración en el afluente. (mg/l)

C_e : Concentración en el efluente. (mg/l)

CH: Carga hidráulica anual. (cm/d)

D: Diámetro de las tuberías. (m)

g : Aceleración de gravedad. (m/s^2)

G : Gradiente hidráulico. (m/m)

K_{20} : Constante de remoción de materia a $20^\circ C$. ($1.104 d^{-1}$)

K_S : Conductividad hidráulica. ($m^3/m^2/d$)

K_T : Constante de reacción de primer orden, depende de la temperatura. (d^{-1})

K_T : Constante de Nitrificación a $20^\circ C$. (d^{-1})

L: Largo del humedal. (m)

n : Porosidad del medio granular.

Q: Caudal medio del sistema. (m^3/h)

Q1: Caudal del tramo 1. (m^3/h)

Q2: Caudal del tramo 2. (m^3/h)

$Q_{max e}$: Caudal máximo de entrada al humedal. (m^3/s)

$Q_{max H}$: Caudal máximo disponible dentro del humedal. (m^3/s)

rz: porcentaje de la profundidad del lecho del humedal ocupado por las raíces.

S: Pendiente del fondo del humedal. (m/m)

TRH: Tiempo de residencia hidráulico. (h)

T_V : Tiempo de vaciado del estanque. (h)

ρ_t : Densidad aparente del medio granular (kg/m^3)

ρ_s : Densidad saturada del medio granular (kg/m^3)

$V_{max e}$: Velocidad máxima de entrada al humedal (m/s)

$V_{max H}$: Velocidad máxima disponible dentro del humedal. (m/s)

W: Ancho del humedal. (m)

y: Profundidad saturada del humedal. (m)

y': Espesor de la grava seca. (m)

DQO: Demanda Química de Oxígeno. (mg/l)

HFL: Humedal de Flujo Libre.

HFS: Humedales de Flujo Subsuperficial.

HFSH: Humedal de Flujo Subsuperficial Horizontal.

HFSV: Humedal de Flujo Subsuperficial Vertical.

ÍNDICE GENERAL

NOMENCLATURA.....	ii
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
RESUMEN.....	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUCCIÓN.....	3
1.1. Justificación.....	4
1.2. Alcance de la Investigación.....	4
1.3. Objetivos de la Investigación.....	5
1.3.1. Objetivo General.....	5
1.3.2. Objetivos Específicos.....	5
2. MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. Humedales Artificiales.....	6
2.1.1. Humedales de Flujo Superficial o Flujo libre (HFL).....	7
2.1.2. Humedales de Flujo Subsuperficial (HFS).....	7
2.2. Componentes de los Humedales de flujo Subsuperficial Horizontal.....	8
2.2.1. Agua Residual.....	8
2.2.2. La Vegetación.....	8
2.2.3. Material Aislante.....	9
2.2.6. Estructura de salida.....	9
2.3. Parámetros de Diseño	9
2.3.1. Relación Largo/Ancho (L/W).....	9
2.3.2. Pendiente del Fondo (S).....	9
2.3.3. Gradiente hidráulico (G).....	10
2.3.4. Área de la sección Transversal (A_c).....	10

2.3.5.	Modelo Básico de Remoción.....	10
2.3.6.	Constante Cinética de Remoción (K_T).	10
2.3.7.	Tiempo de Residencia Hidráulico (TRH).....	11
2.3.8.	Profundidad.	11
2.3.9.	Modelo de remoción de Nitrógeno.....	11
2.3.8.	Modelo de remoción de Fósforo.....	11
2.4.	Nutrientes en Agua residuales	13
2.4.1.	Nitrógeno.....	13
2.4.2.	Fósforo.....	13
2.5.	Remoción de Nitrógeno y Fósforo en humedal	14
2.5.1.	Remoción Nitrógeno.	14
2.5.2.	Remoción Fósforo.	15
2.5.3.	Medio granular.	16
3.	METODOLOGÍA.	18
3.1.	Selección del sitio.....	18
3.2.	Selección de los Componentes.....	18
3.2.1.	Material impermeable.....	18
3.2.2.	Medio granular de grava.....	18
3.2.3.	Medio granular de Óxido de calcio.	19
3.2.4.	La Vegetación.....	19
3.2.5.	Estanque de Almacenamiento.	20
3.2.6.	Agua Residual.	20
3.3.	Selección de Parámetros de Diseño.	20
3.4.	Caudal (Q).....	21
3.5.	Tiempo de Residencia Hidráulico.....	21
3.6.	Diseño de Humedal.....	21

3.6.1.	Dispositivo de Salida del Humedal	21
3.7.	Diseño Hidráulico.....	22
3.7.1.	Estanque de almacenamiento.....	22
3.7.2.	Tuberías de Alimentación al Sistema.	22
3.7.3.	Balance de Energía.	23
3.7.4.	Caudal máximo ($Q_{\max e}$) y Velocidad Máxima ($V_{\max e}$) de entrada al humedal.....	23
3.7.5.	Caudal máximo ($Q_{\max H}$) y Velocidad Máxima ($V_{\max H}$) Disponible dentro del Humedal.	23
3.8.	Construcción de los Humedales.....	24
3.9.	Operación de los Humedales y Toma de Muestras.....	24
4.	DISCUSIÓN.....	25
4.1.	Concentración de Nitrógeno de los efluentes de los humedales.....	25
4.2.	Rendimientos de los humedales en remoción de Nitrógeno	27
4.3.	Concentración de Fósforo de los efluentes de los humedales	29
4.4.	Rendimientos de los humedales en remoción de Fósforo.....	30
5.	CONCLUSIONES.	32
5.1.	Conclusiones.....	32
	REFERENCIAS	34
	ANEXOS	36
	ANEXO A: DISEÑOS HIDRÁULICOS	400
	Propiedades de la grava	41
	Caudal y Velocidad máxima de entrada al humedal.....	42
	Caudal y Velocidad máxima disponible en el humedal.....	42
	Estanque de almacenamiento.....	422
	Tuberías de alimentación al sistema.	43
	Balance de energía.	44
	ANEXO B: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS HUMEDALES	45

Dimensiones de los humedales.	46
Diseño Dispositivo de Salida.	48
Diseño del Dispositivo de Salida Externo.	49
Excavación para los Humedales.	49
Extracción e implantación de la Vegetación.	50
Cierre Perimetral.	51
ANEXO C: OPERACIÓN DE LOS HUMEDALES	52
Puesta en marcha de los humedales	53
Programación de toma de Muestras.	54
ANEXO D: ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS MUESTRAS	56
Análisis estadístico t Student	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Humedal de flujo subsuperficial vertical	7
Figura 2. Humedal de flujo subsuperficial horizontal	8
Figura 3. Diagrama del metabolismo del nitrógeno.	14
Figura 4. Distribución de las plantas.	19
Figura 5. Dispositivo captación de efluente en el humedal.	22
Figura 6. Esquema de tuberías de alimentación a los humedales.	23
Figura 7. Concentraciones de nitrógeno en efluente del Humedal con óxido de calcio.	25
Figura 8. Concentraciones de nitrógeno en efluente del Humedal con grava.	26
Figura 9. Remoción de nitrógeno en efluente del humedal con óxido de calcio.	27
Figura 10. Remoción de nitrógeno en efluente del humedal con grava.	27
Figura 11. Remoción global experimental y global del humedal con óxido de calcio.	28
Figura 12. Remoción global experimental y global del humedal con grava.	28
Figura 13. Concentraciones de fósforo en efluente del Humedal con óxido de calcio.	29
Figura 14. Concentraciones de fósforo en efluente del Humedal con grava.	29
Figura 15. Remoción de fósforo en efluente del humedal con óxido de calcio.	30

Figura 16. Remoción de fósforo en efluente del humedal con grava.	30
Figura 17. Remoción global experimental y global del humedal con óxido de calcio.....	31
Figura 18. Remoción global experimental y global del humedal con grava.	31

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros y Dimensiones Utilizadas en Ambos Humedales.....	21
--	----

EVALUACIÓN DE LA INCIDENCIA DEL MEDIO GRANULAR EN UN HUMEDAL SUBSUPERFICIAL EN EL PROCESO DE REMOCIÓN DE NUTRIENTE.

Autor: Mauricio Nova Durán

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

Correo Electrónico: mnova@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

El incremento acelerado de la población rural y la ética social hacia la calidad del medio ambiente, nace la necesidad de investigar tecnología con el objetivo de subsanar y reparar los grandes problemas de contaminación antropogénica, siendo el mayor interés de la sociedad actual el tratamiento de las aguas residuales considerando su reutilización. El tratamiento que se utiliza en la actualidad dentro de las grandes ciudades no es una tecnología económicamente sustentable para los sectores rurales de baja población, debido a los elevados costos económicos, tecnológicos, energéticos y humanos, siendo la tecnología de humedales artificiales una alternativa atractiva debido a sus bajos costos de operación y mantenimiento.

La investigación realizada propone una alternativa de tratamiento basado en un humedal, para ello se realizaron dos humedales artificiales de flujo subsuperficial, considerando condiciones de afluente similares, a uno de ellos se incorporó óxido de calcio con una distribución determinada y al otro grava, manteniendo una alimentación constante de sacarosa durante todo el proceso y variando las concentraciones de nutrientes tanto como el Fósforo y el Nitrógeno, con el objetivo de aumentar la eficiencia y verificar la remoción de nutrientes. Los resultados que se obtuvo fue, un aumento de las remociones en un 33 y 25% de Nitrógeno para los humedales con óxido de calcio y grava respectivamente, en relación al fosforo se obtuvo una remoción de 50 y 36% de fósforo.

Palabras Claves: humedal artificial, medio granular.

Número de Palabras: 5893 Palabras texto + 19 Figuras/Tablas*250 = 10.643.-

EVALUATION OF ENVIRONMENTAL IMPACT IN A SUBSURFACE GRANULAR WETLAND IN THE PROCESS NUTRIENT REMOVAL.

Author: Mauricio Nova Durán

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

Email: mnova@alumnos.ubiobio.cl

Teacher Guide: Dr. Pedro Cisterna Osorio

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

Email: pcisterna@ubiobio.cl

ABSTRACT

The accelerated rural population and social ethics to the quality of the environment, increase comes the need to investigate technology in order to correct and repair the great problems of anthropogenic pollution, with the greatest interest in today's society the treatment of considering wastewater reuse. The treatment used today in big cities is not an economically sustainable technology for rural areas of low population, due to the high economic, technological, energy and human costs being technology wetlands artificieles an attractive alternative due their low operating costs and maintenance.

The research proposes an alternative treatment based on a wet, for this two artificial wetlands of subsurface flow were performed, considering conditions similar tributary, one of them calcium oxide is incorporated with a certain distribution and other taxes, maintaining a sucrose constant feed throughout the process and varying concentrations of nutrients much as phosphorus and nitrogen, with the aim of increasing efficiency and verify nutrient removal. The results obtained was an increase of removals 33 and 25% nitrogen for wetlands with and without calcium oxide respectively, relative to phosphorus removal of 50 and one 36% phosphorus was obtained.

1. INTRODUCCIÓN.

¿Qué hacer con el agua residual doméstica? es una pregunta fundamental, dado que existe un aumento de la población y así de sus aguas residuales, sin embargo se plantean distintos tipos de tecnología para satisfacer esta necesidad, unas de las alternativas existentes a nivel nacional son las ya conocidas por los ingenieros sanitarios, como en la región del Bio-Bio, donde las tecnologías usadas para la depuración de nuestras aguas residuales son: lodos activo, lagunas aireadas, lagunas de estabilización y emisarios submarinos. En la actualidad se están incorporando nuevas tecnologías como los humedales artificiales.

Dentro de los componentes que tiene un humedal artificial, es el medio granular el cual es esencial para el tratamiento del agua residual, dado que en él se realizan los procesos de nitrificación y degradación de la materia orgánica que contiene el agua residual. De esta manera se da a conocer a través de esta investigación el efecto que tiene el cambio del medio granular “grava” en comparación con la combinación “grava y óxido de calcio”.

1.1. Justificación.

El objetivo primordial es comparar la remoción de nutrientes que se genera en un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal con un medio granular distinto, esperando un aumento de la eficiencia en remoción de nutrientes en comparación a lo existente en humedales artificiales subsuperficial, de esta manera esta tecnología puede ser competitiva con el tratamiento convencional de aguas residuales, en cuanto al costo de operación y mantenimiento. Lo principal es lograr un incentivo para el uso doméstico, contribuyendo con el ahorro en el hogar.

Las ventajas que tiene este tipo de tratamiento en comparación a los demás, es proporcionar un tratamiento efectivo a través de procesos naturales y sin la necesidad de equipos automatizados, eléctricos y de un monitoreo permanente por parte de personal especializado. Siendo el costo de operación y mantenimientos mínimos, además de la reducción de atracción de insectos vectores o similares, no son problemas mientras el sistema opere adecuadamente y entre otras.

1.2. Alcance de la Investigación.

En esta investigación se observará la confirmación del impacto que tiene el cambio de medio granular en relación a la remoción de nutrientes, al someter dos humedales subsuperficiales horizontales a escala, variando las concentraciones de nutrientes y dejando constante la concentración de DQO en el afluente. Se cuantificará la calidad del efluente ante estos escenarios y posteriormente se contempla la verificación de la mejora en la remoción de nutrientes y realizar un análisis comparativo de ambos humedales.

1.3. Objetivos de la Investigación.

1.3.1. Objetivo General.

Evaluar la incidencia del medio granular en humedal de flujo subsuperficial en la remoción de nutrientes

1.3.2. Objetivos Específicos.

- Diseñar dos humedales artificial subsuperficial horizontal con distintos medios granulares.
- Cuantificar la remoción de Fósforo y Nitrógeno para cada humedal.
- Concluir que solución tiene mejor eficiencia, en cuanto a la remoción de Nitrógeno, Fósforo.

2. MARCO TEÓRICO.

En este capítulo se mencionará los parámetros del diseño de humedal artificial como un sistema de tratamiento de agua residual, además de sus componentes y funciones de cada elemento que lo conforma.

2.1. Humedales Artificiales.

Los humedales son áreas que se encuentran saturadas por aguas superficiales o subterráneas con frecuencia y duración tales, que sean suficientes para mantener condiciones saturadas. Suelen tener agua con profundidades inferiores a 60 cm con plantas emergentes como Espadañas, Carrizos y Juncos (Lara, 1999). El rol de las plantas en los sistemas de humedales artificiales está determinado principalmente por las raíces y rizomas enterrados. Estas plantas denominadas macrófitos; termino asociado a plantas vasculares que tiene tejido que es de fácil apreciación. Además tiene la habilidad de transferir oxígeno a través del tallo y sus hojas hasta el medio donde se encuentran sus raíces. El oxígeno generado puede crear un microambiente aeróbicos que producen reacciones aerobias de degradación de materia orgánica y nitrificación (Arias, 2004)

Una alternativa interesante es el uso de humedales artificiales como planta de tratamiento de aguas residuales, según las investigaciones se puede tratar con eficiencia niveles altos de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Solidos suspendido (SS), Nitrógeno (N), así como niveles significativos de metales, trazas orgánicas y patógenos. No ocurre lo mismo con la eliminación de fósforo que es mínima en estos sistemas (Lara, 1999).

Los humedales artificiales basados en macrófitas enraizadas saliente se clasifican en dos tipos, en relación a la disposición del agua que se usa: 1) humedal de flujo superficial, si el agua circula en la superficie entremedio de los tallos de las macrófitas y 2) humedales de flujo subsuperficial, si el agua escurre debajo de la superficie del humedal (Delgadillo et al., 2010).

2.1.1. Humedales de Flujo Superficial o Flujo libre (HFL).

Este tipo de humedal se asemeja a lo que sucede con los humedales naturales, los cuales tienen la superficie del flujo en contacto con la atmósfera, debido a que el nivel de agua sobrepasa el nivel del terreno (Fuentes, 2013).

2.1.2. Humedales de Flujo Subsuperficial (HFS).

Los HFS, a diferencia del HFL el escurrimiento del agua son de tipo subsuperficial, de tal forma que el agua residual que pasa por el HFS no tiene contacto con la atmósfera. La construcción de estos humedales se caracteriza por el uso de zanjas impermeabilizadas con el objetivo de proteger el suelo de la percolación del agua residual y un relleno de material granular, para favorecer el paso del agua residual en él.

Según la dirección del flujo del agua residual, se desprenden dos tipos de HFS:

a) Humedales de Flujo Subsuperficial Vertical (HFSV).

La carga de aguas residuales se realiza en toda el área del humedal de manera uniforme, esta escurre hacia el fondo del humedal.

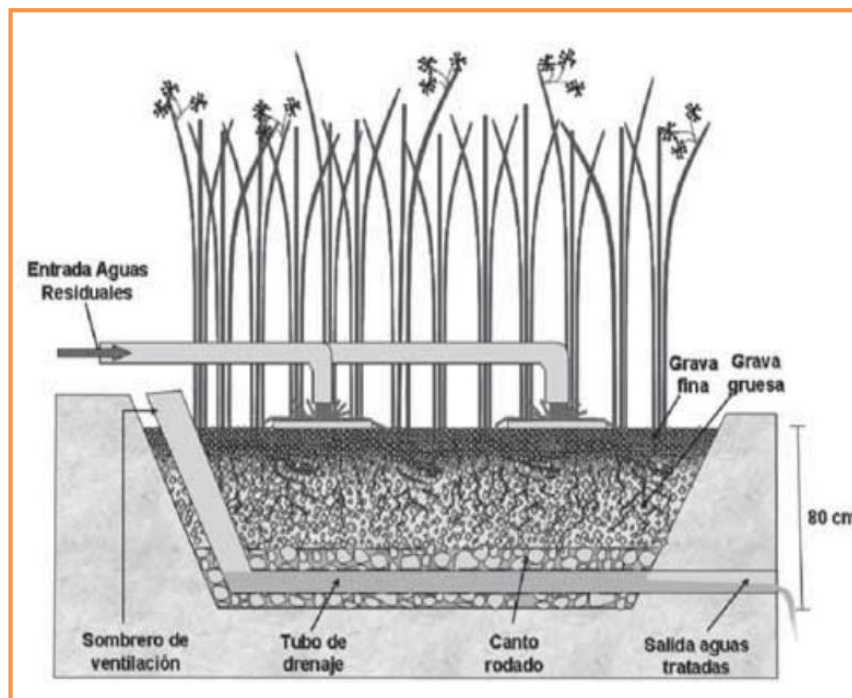


Figura 1. Humedal de flujo subsuperficial vertical. (Fuente: Delgadillo et al)

b) Humedales de Flujo Subsuperficial Horizontal (HFSH).

Este tipo de humedal se caracteriza por la carga de agua residual en uno de sus extremos, al pasar de forma uniforme por el interior del humedal, llega al otro extremo donde se descarga.

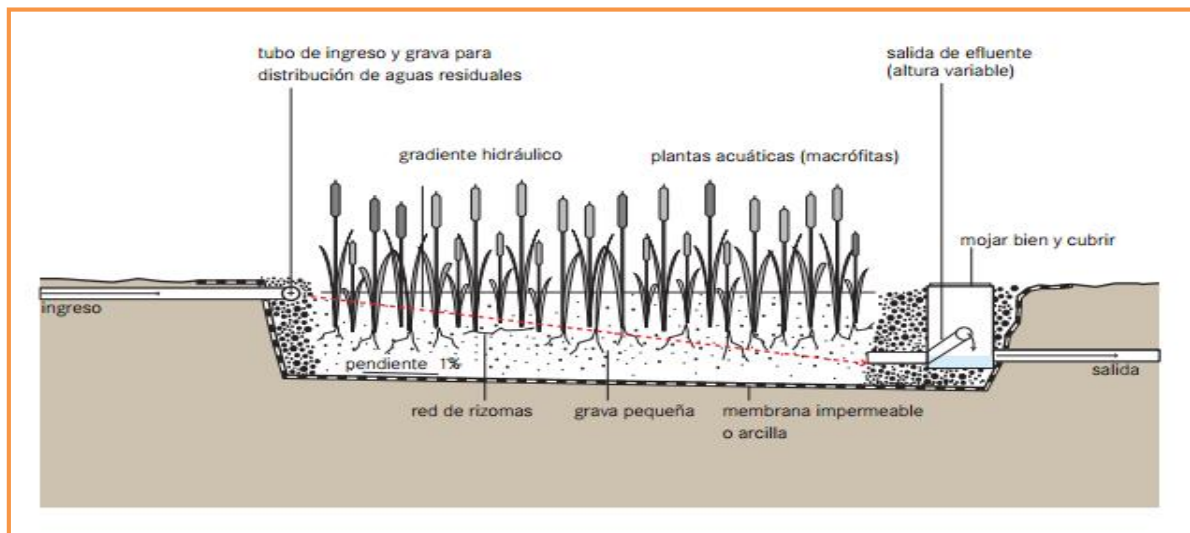


Figura 2. Humedal de flujo subsuperficial horizontal. (Fuente: Eawag)

2.2. Componentes de los Humedales de Flujo Subsuperficial Horizontal.

En este apartado se dará a conocer los principales componentes de los HFSH, los cuales son esenciales para un adecuado comportamiento.

2.2.1. Agua Residual.

Corresponde al agua que deshecha la comunidad, una vez que ha sido contaminada para el cual se le dio distintos usos (Metcalf y Eddy, 1995). De acuerdo a su generación, se clasifican en cuatro fuentes fundamentales de aguas residuales que son: aguas residuales domésticas o urbanas, aguas residuales industriales, aguas residuales de uso agrícolas y aguas residuales pluviales (Ramalho, 1993)

2.2.2. La Vegetación.

Las especies más utilizadas en la construcción de humedales artificiales son: *Typha* (Espadaña), *Scirpus* (Juncos) y *Phragmites* (Carrizo). Todas las mencionadas son especies que tiene gran adaptación a un ambiente saturado, un crecimiento rápido, presentan una resistencia a cambios climáticos y además no son fuente de alimento para animales (Pérez, 2010).

Se recomienda que las especies de vegetación a utilizar debe ser oriunda de la región, para favorecer la adaptación del clima local (EPA, 1993).

2.2.3. *Material Aislante.*

Su función es, evitar la percolación de los humedales, para así evitar la contaminación del subsuelo y asegurar que el contenido de agua residual. El material que comúnmente se usa, es el polietileno de alta densidad.

2.2.4. *Estructura de salida.*

La estructura de salida, corresponde a un sistema de tubería perforada, esta estructura debe ser fijada en el fondo y extremo del humedal, para asegurar que el agua residual salga homogéneamente y recorra todo el humedal, para su posterior retiro de él por medio de un sifón.

2.3. **Parámetros de Diseño**

En esta parte del capítulo se mencionara los parámetros o variables de diseño, que influyen directamente en las dimensiones, velocidades del flujo, tiempos de residencia hidráulicos y la cantidad de nutrientes que se requiera eliminar.

2.3.1. *Relación Largo/Ancho (L/W).*

La relación largo/ancho debe estar entre 10:1 y 3:1 dependiendo de la carga, la remoción de contaminante y el tipo de flujo. Se recomienda una pendiente 3% en fondo del lecho del humedal, lo que condicionará la velocidad del flujo y así, éste podrá romper las fuerzas de fricción del medio granular (Steiner, 1993).

2.3.2. *Pendiente del Fondo (S).*

En relación a lo investigado, la pendiente de 1% es la más recomendable. Estudios consideran que puede utilizarse el 10% de la profundidad del lecho en su entrada (h_0), a razón de la longitud del humedal (L) como valor máximo (Kadlec et al, 1996).

$$S < 0,1 * h_0/L \quad \text{Ec. (1)}$$

2.3.3. Gradiente Hidráulico (G).

La ocurrencia de cargas excesivas o disminuciones de la conductividad hidráulica, puede producir gradientes altos, capaces de ocasionar inundaciones. Un límite del 20% de la altura del lecho en las pérdidas de carga permisibles, es suficiente para su buen funcionamiento (Kadlec et al, 1996).

$$G = \frac{Q}{L*W} * \frac{L^2}{K_S*h_0^2} < 0,2 \quad \text{Ec. (2)}$$

2.3.4. Área de la sección Transversal (A_c).

El área de la sección transversal, corresponde al área perpendicular a la dirección del flujo.

Una recomendación para su cálculo es la ecuación de Darcy (W.E.F., 1992).

$$A_c = Q / K_S * G \quad \text{Ec. (3)}$$

2.3.5. Modelo Básico de Remoción.

Los HFSH pueden ser considerados como reactores biológicos (Reed et al, 1995). Este modelo ha sido validado (W.E.F., 1992) y relaciona la capacidad de remoción de contaminantes y el tiempo de residencia hidráulico.

$$C_e/C_a = \exp(-K_t * TRH) \quad \text{Ec. (4)}$$

2.3.6. Constante Cinética de Remoción (K_T).

La constante cinética de remoción de primer orden, es el parámetro que indica la velocidad de remoción de contaminantes en un reactor de flujo pistón.

$$K_T = K_{20} * 1,06^{T-20} \quad \text{Ec. (5)}$$

Donde:

$K_{20} = 1,104 \text{ d}^{-1}$ Constante cinética de remoción de materia orgánica a 20 °C.

2.3.7. Tiempo de Residencia Hidráulico.

El valor del TRH, corresponde al tiempo que permanece el agua dentro del humedal artificial.

$$TRH = \frac{L * W * y * n}{Q} \quad \text{Ec. (6)}$$

2.3.8. Profundidad.

La profundidad tiene relación con el volumen de agua disponible para el sistema, por lo que su valor influye en el caudal y el tiempo de residencia dentro del humedal. Este parámetro queda condicionado por la profundidad radicular, dependiendo directamente de la especie y tipo de planta utilizada (Fuentes, 2013).

$$y = \frac{Q * (\ln C_a - \ln C_e)}{L * W * n * K_T} \quad \text{Ec. (7)}$$

2.3.9. Modelo de remoción de Nitrógeno.

Este modelo contempla dos tipos de reacciones biológicas, nitrificación y desnitrificación, ambas tienen una dependencia, tanto de la temperatura como de la velocidad y la transferencia de oxígeno hacia las raíces.

➤ Para la nitrificación se plantea el siguiente modelo:

$$C_e / C_a = \exp(-K_t * TRH) \quad \text{Ec. (8)}$$

Donde:

Ce = Concentración de amoníaco en el efluente, mg/l

Co = Concentración de amoníaco en el afluente, mg/l

Kt = Constante dependiente de la temperatura, d⁻¹

TRH= Tiempo de residencia hidráulico, d

La constante depende de la temperatura Kt :

$$K_o = 0 \text{ d}^{-1} , a 0^\circ\text{C} \quad \text{Ec. (9)}$$

$$K_t = K_{10} (1,15)^{T-10} \text{ d}^{-1} , de 1 - 10^\circ\text{C} \quad \text{Ec. (10)}$$

$$K_t = K_{NH} (1,048)^{T-20} \text{ d}^{-1} , +10^\circ\text{C} \quad \text{Ec. (11)}$$

Obtención de K_{NH} .

$$K_{NH} = 0,01854 + 0,3922(rz)^{2,6077} \quad \text{Ec. (12)}$$

Se tiene:

K_{NH} = Constante de nitrificación a 20°C , d^{-1}

rz = Porcentaje de la profundidad del lecho del humedal, ocupado por la zona de las raíces, como fracción decimal.

➤ Con respecto a la desnitrificación se plantea el siguiente modelo.

$$C_e/C_a = \exp(-K_t * TRH) \quad \text{Ec. (13)}$$

Donde:

C_e = Concentración de nitrato en el efluente, mg/l

C_o = Concentración de nitrato en el afluente, mg/l

K_t = Constante dependiente de la temperatura, d^{-1}

TRH = Tiempo de residencia hidráulico, d

La constante depende de la temperatura K_t :

$$K_t = 1 (1,15)^{T-20} \text{ d}^{-1} , + de 1^\circ\text{C} \quad \text{Ec. (14)}$$

La concentración del efluente (C_o) usada en la ecuación (13) corresponde a la diferencia entre las concentraciones de entrada y salida obtenida en la ecuación (8) como la ecuación (8) determina el amoniaco que queda en el humedal, sería conservador asumir esta diferencia.

➤ Determinación de la remoción de nitrógeno total.

La concentración de nitrógeno total corresponde a la suma de C_e de las ecuaciones (8) y (13)

2.3.10. Modelo de remoción de Fósforo

Basándose en el análisis de los datos de la north american date base, Kadlec ha propuesto una constante de primer orden igual a 10 m/año, para estimar la remoción de fósforo en un sistema de humedal artificial. Los 10 m/año son equivalente a un promedio diario de 2,74 cm/d que es lo que se usa en la ecuación (15) (Lara, 1999)

$$C_e/C_o = \exp(-K_p/CH) \quad \text{Ec. (15)}$$

Dónde:

Ce = Concentración de fósforo en el efluente, mg/l

Co = Concentración de fósforo en el afluente, mg/l

Kp = 2,74 cm/d

CH= Carga hidráulica promedio anual, cm/d

2.4.Nutrientes en Aguas Residuales.

2.4.1. Nitrógeno.

El nitrógeno está limitado en el agua, para proteger la salud de los niños y puede limitarse en aguas superficiales, para prevenir eutrofización. Puede eliminarse el nitrógeno en estos sistemas, mediante los procesos de nitrificación/desnitrificación y posteriormente se elimina el nitrógeno en forma de gas, hacia la atmósfera. La remoción de nitrógeno en los sistemas de humedales artificiales están entre un 25 y un 85% (Lara, 1999).

2.4.2. Fósforo.

La remoción de fósforo en los humedales artificiales no es muy eficaz, debido a las limitadas oportunidades de contacto entre el agua residual y el terreno. Los principales mecanismos para la remoción de fósforo es, la captación por parte de las plantas y la retención en el terreno (Lara, 1999).

2.5. Remoción de Nitrógeno y Fósforo en humedal.

2.5.1. Remoción Nitrógeno.

Al momento que ingresa agua residual al humedal construido, la mayor parte del nitrógeno está presente como amonio o en forma de un compuesto inestable, que es fácilmente transformado a amonio. Los principales mecanismos de remoción de nitrógeno en humedales construidos, son la nitrificación y la denitrificación, que ocurren en diferentes zonas del medio granular. Todo el proceso puede ser dividido en pasos, iniciándose con la amonificación, seguido por la nitrificación y denitrificación (Delgadillo et al., 2010). Figura 3 muestra diagrama de amonificación, que ocurre en las zonas aeróbicas, como también en zonas anaeróbicas.

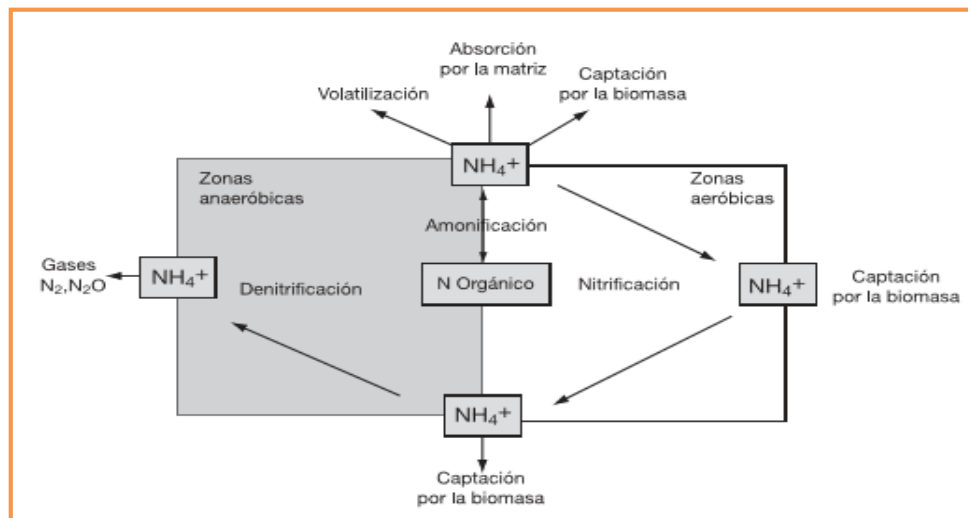


Figura 3. Diagrama del metabolismo del nitrógeno (Cooper et al., 1996)

La nitrificación se produce mediante un proceso microbiano de dos fases, que acaba convirtiendo el nitrógeno amoniacal, en nitratos mediante oxidación. En la primera fase el amonio es transformado en nitrito, por unas bacterias denominadas nitrosomonas. En la segunda etapa el nitrito es convertido a nitrato, mediante unas bacterias denominadas nitrobacter. La nitrificación ocurre en la zona aerobia y se requiere aproximadamente 4,3 mg O_2 para convertir 1 mg de amonio a nitrato. La velocidad de nitrificación depende directamente de la cantidad de oxígeno disuelto en el agua. Las bacterias nitrificantes son organismos muy sensibles al pH y a la temperatura. El pH óptimo de funcionamiento se encuentra entre 7,5 y 8,6. (Arias, 2004).

El proceso de Nitrificación se puede resumir en la siguiente ecuación.



La desnitrificación consiste, en eliminar nitrógeno en forma de nitrato, mediante su conversión a nitrógeno gas. Este mecanismo tiene lugar en condiciones anaerobias y se produce en dos etapas. En la primera, el nitrato es convertido a nitrito y en la segunda, el nitrito es convertido a NO, N₂O y nitrógeno gas (N₂). Estos tres productos finales son gaseosos, por lo que son liberados a la atmósfera, pero en muchos sistemas el NO y el NO₂ son transitorios por lo que el principal compuesto liberado es el nitrógeno gas. Como en el caso de la nitrificación, en la desnitrificación es dependiente de la temperatura y del pH (Arias, 2004).

Ecuación que resume el proceso de desnitrificación.



2.5.2. Remoción Fósforo.

El fósforo está presente en la alcantarilla, en tres distintas formas como: ortofosfato, polifosfato y fosfato orgánico. El último es un constituyente menor de la alcantarilla y como los polifosfatos, requieren una posterior descomposición a una forma de ortofosfato más asimilable. Cerca del 25% del fósforo total, fijado en la alcantarilla está presente como ortofosfatos tales como: P₀₄³⁻, HP₀₄²⁻, H₂PO₄ H₃PO₄, que están disponibles para el metabolismo biológico inmediato. Por lo tanto, en términos de utilización, en la planta de tratamiento lo que importa es la concentración de fosfato orgánico antes que la concentración de fósforo total (Gray, 1989).

La remoción de ortofosfato ocurre principalmente como una consecuencia de la adsorción, complejización y reacciones de precipitación con Al, Fe, Ca y materiales arcillosos en la matriz del medio granular. El consumo de fósforo por la planta puede ser considerado como insignificante comparado con los efectos de adsorción, valores de alrededor del 3% de la carga anual han sido reportados (Boerner en Kolb, 1998).

Dependiendo del valor de pH dentro del medio granular, el fósforo está presente en la forma de sal soluble o minerales insolubles, lo cual significa que el fósforo puede ser transferido dentro de un humedal construido. Debido al contenido de óxidos metálicos en el medio granular, la fijación de fósforo como fosfatos por medio de la adsorción varía (Wissing en Kolb, 1998).

2.5.3. Medio Granular.

Es el medio donde crecen las plantas, los microorganismos y se realizan los principales procesos de depuración. El medio granular debe estar libre de finos, ser homogéneo, duro, durable y capaz de mantener su forma a largo plazo. Existen varias razones por las cuales el medio granular es importante entre ellas se mencionan:

1. Soportan a muchos de los organismos vivientes en el humedal.
2. La permeabilidad del medio granular afecta el movimiento del agua a través del humedal.
3. Muchas transformaciones químicas y biológicas (sobre todo microbianas) tienen lugar dentro del medio granular.
4. Proporciona almacenamiento para muchos contaminantes.
5. La acumulación de restos de vegetación aumenta la cantidad de materia orgánica en el humedal.

La materia orgánica da lugar al intercambio de materia, fijación de microorganismos y es una fuente de carbono que es a la vez, la fuente de energía para algunas de las más importantes reacciones biológicas en el humedal (Lara, 1999).

El medio granular, es responsable de la depuración del agua residual que se incorpora al humedal artificial, mediante la interacción física y química.

El tamaño del medio granular afecta directamente al flujo hidráulico del humedal y por consiguiente caudal de agua a tratar. Si el lecho granular está constituido por elevadas cantidades de arcilla y limo, se consigue una mayor capacidad de absorción y una mejor filtración, ya que la adsorción es alta y el diámetro de los huecos es pequeño. Pero también este medio presenta una elevada resistencia hidráulica y requiere velocidades de flujo muy bajas, limitando el caudal a tratar (Arias, 2004).

La hidrodinámica del sistema está relacionada a la conductividad hidráulica, bajo esta relación la porosidad del tipo de medio granular que se seleccione, nos determinara la calidad del efluente obtenido después del tratamiento. Estos parámetros hidrológicos, tiene directa relación con el tiempo de residencia hidráulico (Kadlec et al, 1996).

3. METODOLOGÍA.

En este capítulo, detallaremos las características de los dos humedales subsuperficiales horizontal con su estructura interna, además de los parámetros de diseño utilizados para su funcionamiento.

3.1. Selección del sitio.

Las características de selección del sitio para la construcción de ambos humedales fueron: un lugar de fácil acceso vehicular, para el traslado del material en la etapa de construcción, una red de agua potable cercana, para el llenado del estanque de alimentación de ambos humedales y además de constar con la presencia continua de seguridad, para evitar posibles daños de terceros, como de animales y personas. La construcción de estos humedales, fue realizada en las dependencias de la Universidad del Bio-Bío, en la ciudad de Concepción.

3.2. Selección de los Componentes.

La selección de los componentes, establecerán las características de cada humedal, además de dar a conocer los elementos utilizados, para el diseño de ambos humedales.

3.2.1. *Material impermeable.*

Se utilizó un polietileno de baja densidad, cuyo espesor fue de 0.2 mm, para confinar e impermeabilizar el material.

3.2.2. *Medio granular de grava.*

La grava de acuerdo a los ensayos efectuados en el Laboratorio del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad del Bío Bío, consta de una Porosidad (n) del 43%, además de una Densidad aparente (ρ_v) de $1.484 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ y Densidad saturada (ρ_s) de $1.950 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.

De acuerdo a los valores recomendados por Reed (1995) se asume una conductividad hidráulica de $37.000 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{dia}}$ para una porosidad del 0,43.

3.2.3. Medio granular de Óxido de calcio.

El óxido de calcio “CaO” es el resultado de la calcinación de la roca caliza, usado en el proceso siderúrgico, este material corresponde a los desechos de la compañía siderúrgica Huachipato (CAP). Las propiedades físico-química son: polvo de color blanco higroscópico, inoloro, su densidad es de $3300 \frac{kg}{m^3}$, reacciona con el agua formando hidróxido de calcio, su punto de ebullición está en $2850 \text{ }^\circ\text{C}$ y la relación de vacío es de 63%.

3.2.4. La Vegetación.

La vegetación usada en esta investigación es la Espadaña (Typha), estas plantas fueron trasplantadas desde el humedal artificial del Club de Campo Ainahue, hacia los humedales de la investigación. El número de plantas extraídas fue de 40 unidades y se repartieron equitativamente entre ambos humedales.



Figura 4. Distribución de las plantas en los humedales (fuente propia)

3.2.5. Estanque de Almacenamiento.

El estanque del agua residual artificial que se utiliza tiene una capacidad de 1000 lt, el cual se encuentra sobre una estructura de madera. Para esta investigación se utiliza un caudal de 4 ml/s para ambos humedales, el estanque tiene un tiempo de vaciado (T_v) es de 34,72 hr.

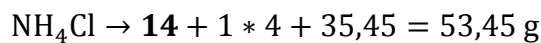
3.2.6. Agua Residual.

La carga de ambos humedales está compuesta por sacarosa, nitrógeno y fósforo, que contribuyen a la cinemática de los microorganismos y nutrientes, necesarios para el crecimiento de la vegetación.

Para la investigación se trabaja con concentraciones de azúcar constante, además el nitrógeno y el fósforo que serán variables para cada campaña, al comienzo será de 100 mg/l, 50 mg/l y 10 mg/l respectivamente.

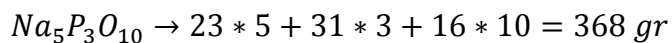
El nitrógeno y el fósforo requerido para cada campaña, fue incorporado por al agua residual artificial a través de los compuestos de cloruro de amonio (NH_4Cl) y tripolifosfato de sodio ($\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$) respectivamente.

➤ Nitrógeno: 50 mg/l



Para alcanzar una concentración de 50 mg/l de nitrógeno, se utiliza una concentración de 191 mg/l de Cloruro de Amonio.

➤ Fósforo: 10 mg/l



Para alcanzar una concentración de 10 mg/l de Fósforo, se utiliza una concentración de 40 mg/l de Tripolifosfato de Sodio.

3.3. Selección de Parámetros de Diseño.

De acuerdo con el diseño de humedales, se han seleccionado los parámetros y dimensiones mostrados en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros y Dimensiones Utilizadas en Ambos Humedales

Parámetro	Símbolo	Humedal con grava	Humedal con óxido de calcio
Largo (L)	L	2	2
Ancho (m)	W	0,9	0,9
Relación Largo/ancho (m/m)	L/W	2,22	2,22
Profundidad (m)	y	0,5	0,5
Espesor Grava seca (m)	y'	0,1	0,1
Pendiente (m/m)	S	0,02	0,02
Área Superficial (m ²)	A _s	1,8	1,8
Área Transversal (m ²)	A _c	0,45	0,45
Gradiente Hidráulico (m/m)	G	0,02	0,02

3.4. Caudal (Q).

El caudal del afluente utilizado en esta investigación es de 4 ml/s (14.4 lt/hr), el cual fue calibrado en terreno, a través de llaves de regulación.

3.5. Tiempo de Residencia Hidráulico.

El tiempo de residencia hidráulico, se obtiene a través de la Ec(6), dando como resultado un valor de 39.36 y 26.87 horas para los humedales, con óxido de calcio y grava.

3.6. Diseño de Humedal.

En este ítem, se da a conocer el dispositivo empleado para la salida del humedal.

3.6.1. Dispositivo de Salida del Humedal.

El dispositivo de salida del humedal, consta de 4 tuberías de PVC sanitario de 40 mm de diámetro y 90 cm de largo. Para la captación del efluente, este dispositivo cuenta con 4 tubos a diferentes alturas (10, 20, 30 y 40 cm) y con 20 perforaciones de 10 mm de diámetro cada uno. En la figura 5 se muestra el detalle de este dispositivo.



Figura 5. Dispositivo captación de efluente en el humedal.

3.7. Diseño Hidráulico.

En este apartado se entregará información, sobre el diseño hidráulico y accesorios utilizados en la alimentación de ambos humedales. El detalle del diseño hidráulico, se encuentra en el anexo A.

3.7.1. Estanque de almacenamiento.

El estanque utilizado tiene una capacidad de almacenamiento de 1000 litros y se proporciona un caudal de 4 ml/s (14,4 lt/hr) por humedal, determinándose un tiempo de vaciado de 34,72 hrs.

3.7.2. Tuberías de Alimentación al Sistema.

La tuberías utilizada es PVC a presión de 20 mm de diámetro, que conduce el agua desde el estanque de almacenamiento hacia los humedales, fueron diseñadas de acuerdo al caudal correspondiente a la investigación. En la figura 6 se muestra en detalle todos los accesorios utilizados para la alimentación del agua residual artificial, desde el estanque de almacenamiento hasta los humedales.

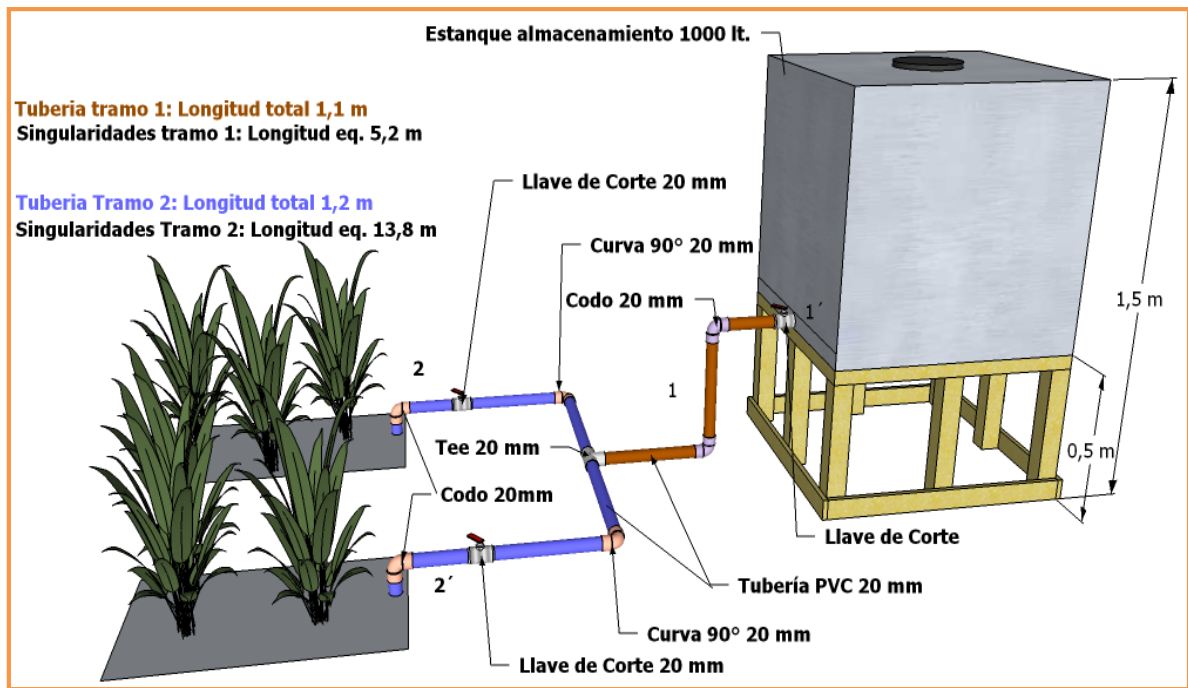


Figura 6. Esquema de tuberías de alimentación a los humedales (fuente Llanos).

3.7.3. Balance de Energía “Bernoulli”.

El balance de energía, se determinó considerando las válvulas de paso completamente abiertas, obteniendo la altura geométrica necesaria para el suministro de los caudales utilizados en esta investigación es de 0,0043 m, inferior a la altura del estanque (0,5m), por lo que los caudales quedan controlados por las llaves de paso.

3.7.4. Caudal máximo ($Q_{max e}$) y Velocidad Máxima ($V_{max e}$) de entrada al humedal.

Se determina un caudal máximo de entrada al humedal de $4 * 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ y una velocidad máxima de 0,0127 m/s.

3.7.5. Caudal máximo ($Q_{max H}$) y Velocidad Máxima ($V_{max H}$) Disponible dentro del Humedal.

Para determinar el caudal máximo disponible dentro del humedal se utiliza la Ec. (3), obteniéndose un valor de $0,00385 \text{ m}^3/\text{s}$ y una velocidad máxima de 0,0086 m/s.

De acuerdo a los parámetros de diseño y las características del medio granular elegido, se verifica que el caudal y la velocidad máxima disponibles en el humedal, son ampliamente mayores que los

máximos utilizados en la investigación, por lo que no debieran existir problemas de inundación y/o aumento del nivel del agua en los humedales.

3.8. Construcción de los Humedales.

Las consideraciones necesarias para la construcción de los humedales son: mantener condiciones similares en ambos humedales, en cuanto a las dimensiones geométricas, para una buena captación de agua y así evitar flujo preferencial, buena fijación del material impermeable al sifón, para evitar filtraciones durante la experiencia y al momento de introducir la grava, se fue llenando simultáneamente con agua, para evitar rotura del polietileno. Además se realizó un cierre perimetral, con el objetivo de evitar el acceso a terceros y/o animales que puedan causar daño a las instalaciones. El detalle de la construcción de los humedales se encuentra en el anexo B

3.9. Operación de los Humedales y Toma de Muestras.

Ambos humedales fueron colocados en funcionamiento el día 18 de Febrero del presente año, el suministro de agua y los caudales del afluente, tienen características similares, en ambos humedales. En un comienzo la vegetación de ambos humedales estaba deteriorada, a medida que se fue suministrando nutrientes, el humedal que no contenía óxido de calcio, fue mejorando su estado, de manera gradual y progresiva, sin embargo, el humedal que se encontraba con óxido de calcio, esta vegetación fue decayendo lentamente.

Para el estudio del nitrógeno y fosforo se organizaron campañas compuestas por tres tomas de muestras cada una.

La toma de muestra del nitrógeno, fue realizada cada 3 días, usando envases de 250cc, para su posterior análisis en el laboratorio de suelos del Depto. de Ingeniería Civil y ambiental. Las muestras de fósforo fueron realizadas con la siguiente distribución; para la campaña 2 se realizó una toma de muestra, en la campaña 3 se realizaron dos tomas de muestras y en la campaña 4 se obtuvo una muestra, el análisis de estas muestras fue realizado por el laboratorio de la empresa Biodiversa. Los detalles de la operación y toma de muestras, se encuentran detallados en el anexo C.

4. DISCUSIÓN

En este capítulo se muestran los resultados de la remoción de nitrógeno y fósforo del efluente, analizados en el laboratorio de suelos del Depto. Ingeniería Civil y Ambiental, además de las muestras enviadas al laboratorio de Biodiversa, correspondiente a ambos humedales.

4.1. Concentración de Nitrógeno de los efluentes de los humedales

Para el humedal que contiene óxido de calcio, se utilizaron diferentes concentraciones de nitrógeno en el afluente, las cuales son: 50, 75, 100 y 50 mg/l para cada campaña. Con los resultados obtenidos del análisis realizado en el laboratorio de suelos del Depto. Ingeniería Civil y Ambiental, se determinaron los promedios de las concentraciones de nitrógeno del efluente por campaña, las cuales corresponden a 27.1, 44.6, 76,7 y 41 mg/l respectivamente, además se obtuvieron las desviaciones estándares de las concentraciones de nitrógeno del efluente para cada campaña, correspondiente a 1.6, 3.3, 2.7 y 1.4 mg/l, así en la Figura 7 se observa las variaciones que existen entre los promedios de las concentraciones de nitrógeno del efluente y los resultados obtenido en laboratorio de cada campaña respectivamente.

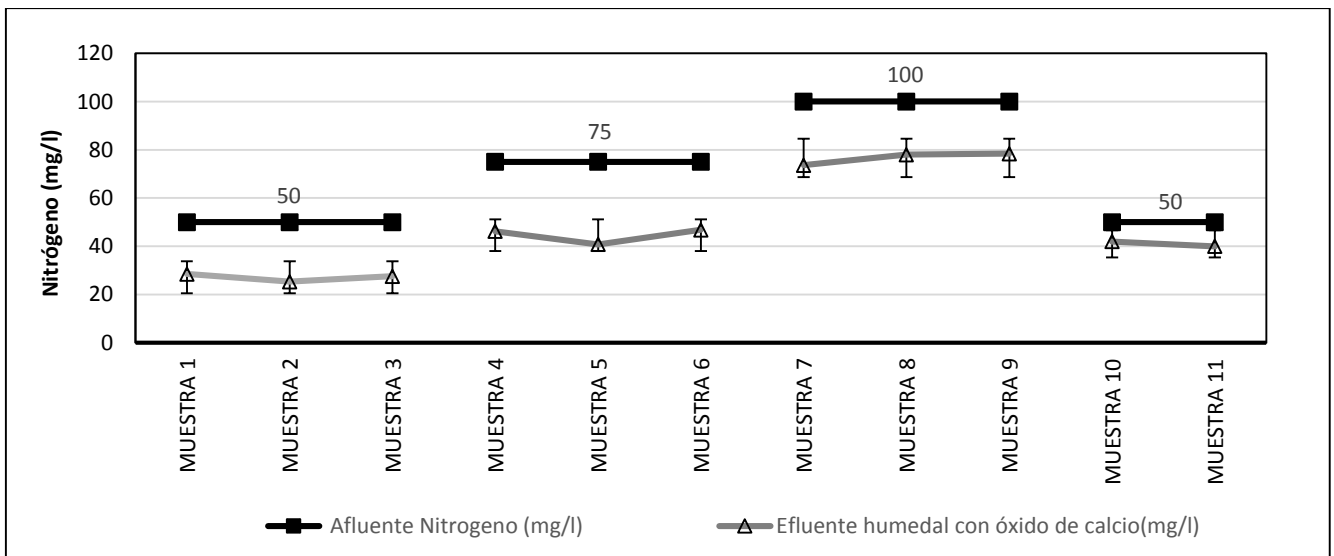


Figura 7. Concentraciones de nitrógeno en efluente humedal con óxido de calcio.

Para el humedal que contiene grava, se utilizaron diferentes concentraciones de nitrógeno en el afluente, las cuales son: 50, 75, 100 y 50 mg/l para cada campaña. Con los resultados obtenidos del análisis realizado en el laboratorio, se determinaron los promedios de las concentraciones de

nitrógeno del efluente por campaña, las cuales corresponden a 33.2, 55.5, 78 y 43 mg/l respectivamente, además se obtuvieron las desviaciones estándares de las concentraciones de nitrógeno del efluente para cada campaña, correspondiente a 1.6, 2.6, 1.2 y 2.8 mg/l. Figura 8 se observa las variaciones que existen en las concentraciones de nitrógeno del efluente en cada campaña.

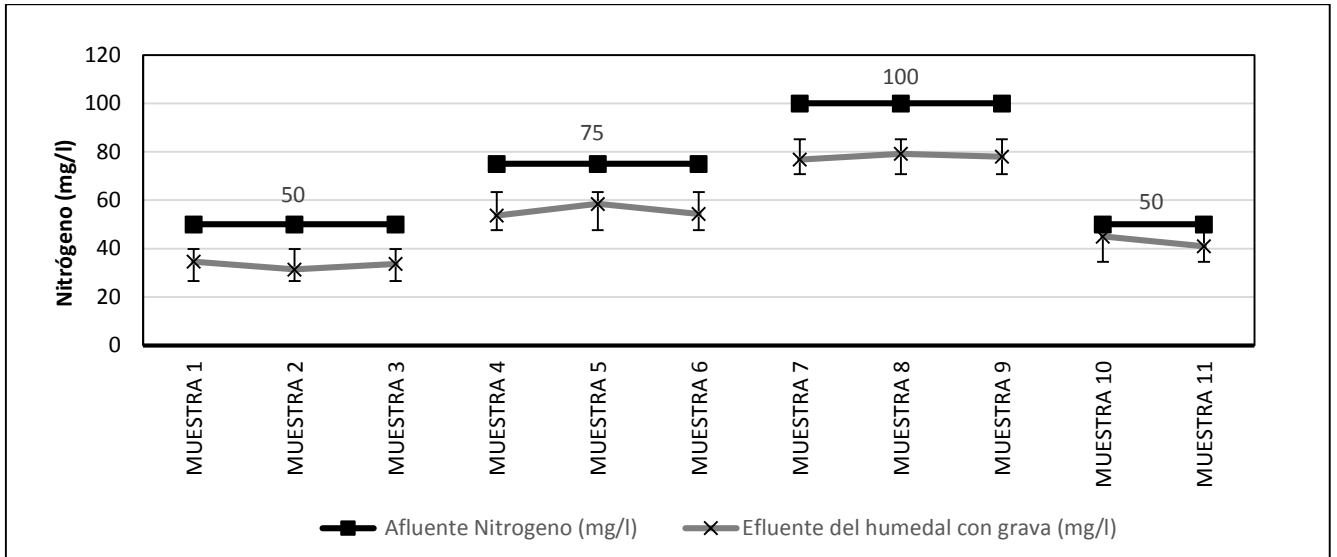


Figura 8. Concentraciones de nitrógeno en efluente humedal con grava.

En la investigación se observó, que las mayores desviaciones estándares de concentraciones de nitrógeno en efluente, fue en la campaña donde se suministró a ambos humedal un afluente de 75 mg/l, siendo las desviaciones estándares de 3.3 y 2.6, para los humedales que contienen óxido de calcio y grava respectivamente.

Para el humedal que contiene óxido de calcio, se observó que a medida que fueron aumentando las concentraciones de nitrógeno en el afluente, la eficiencia en la remoción nitrógeno del efluente disminuyó para cada muestra. En la Figura 9 se observa la remoción de nitrógeno en efluente del humedal, que contiene oxido de calcio.

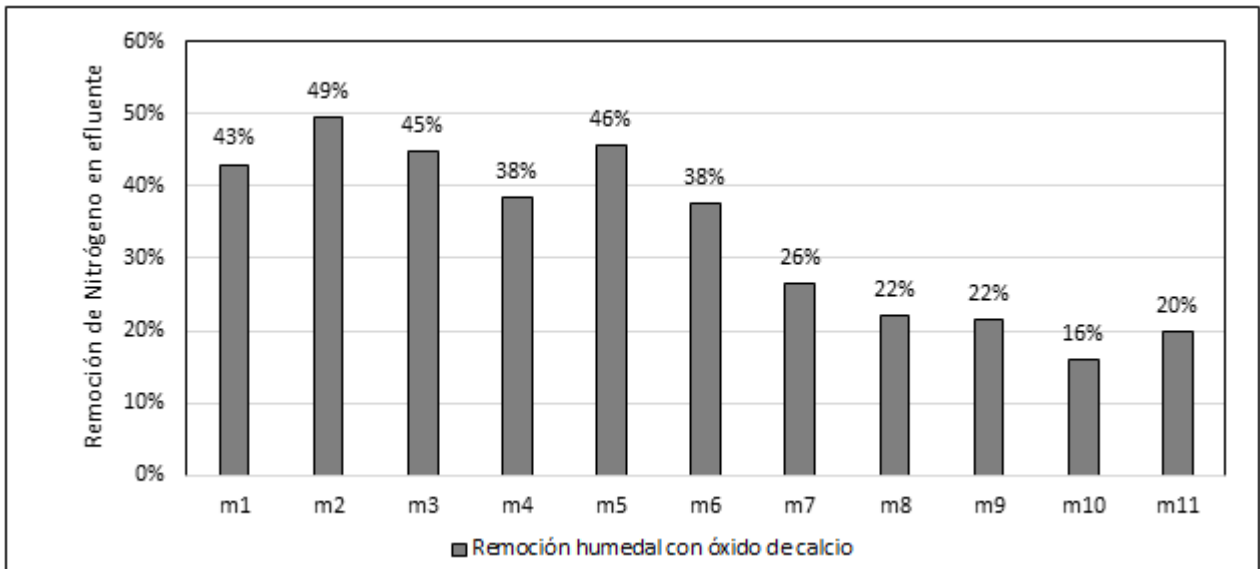


Figura 9. Remoción de nitrógeno en efluente humedal con óxido de calcio.

El humedal que contiene grava, las remociones de nitrógeno fueron disminuyendo en relación al aumento de la concentración de nitrógeno en el afluente. Figura 10 muestra las remociones de cada muestra analizada.

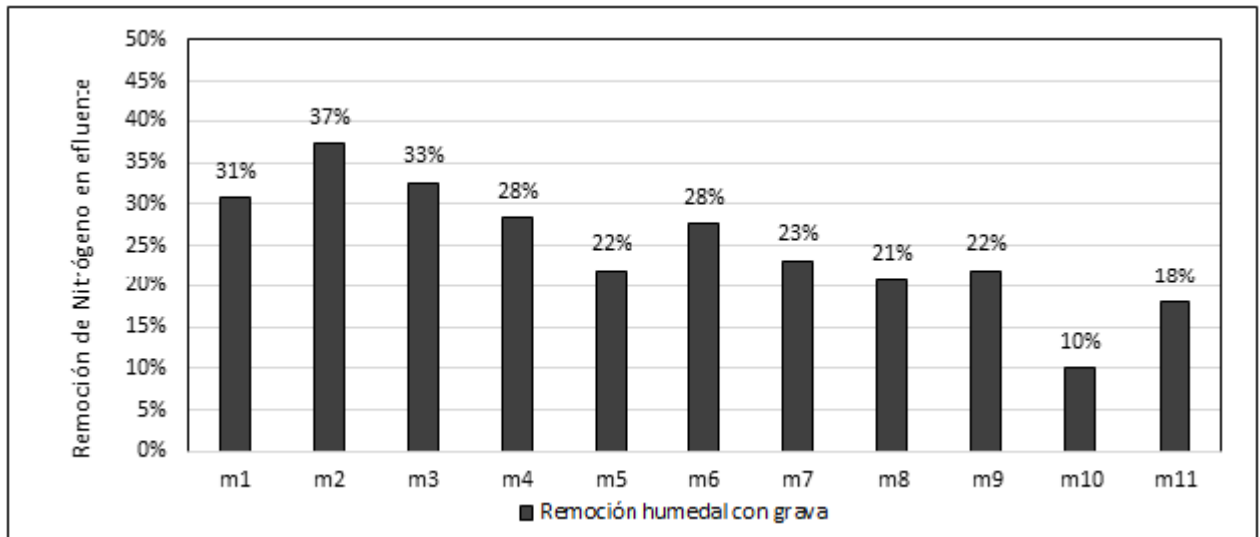


Figura 10. Remoción de nitrógeno en efluente humedal con grava.

4.2. Rendimientos de los humedales en remoción de nitrógeno.

Se realizó un análisis comparativo para ambos humedales con el modelo teórico de remoción de nitrógeno, en este análisis se promedió el resultado de todas las muestras realizadas, y los valores teóricos respectivos. Figura 11 muestra que la remoción teórica de nitrógeno en el efluente es un

45,5% menor a la remoción de nitrógeno experimental, para el caso del humedal que contiene oxido de calcio.

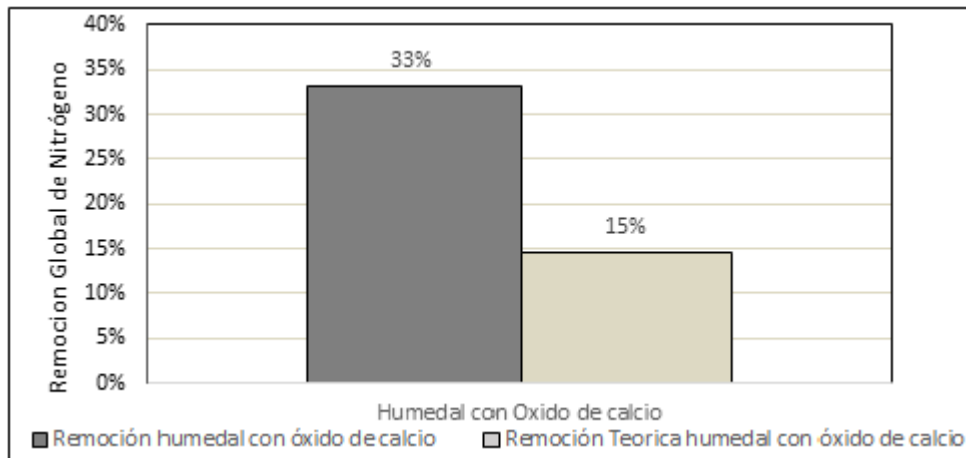


Figura 11. Remoción global experimental y teórica del humedal con óxido de calcio.

Así también la comparación entre los datos obtenidos y teóricos del humedal que contiene grava, se observa que la concentración de nitrógeno del efluente, tiene mayor remoción que los obtenidos teóricamente. En la Figura 12 se muestra que la diferencia de remoción que hay entre el valor experimental y el valor teórico, siendo la remoción del valor teórico del humedal con grava es un 36% menor que la remoción experimentalmente.

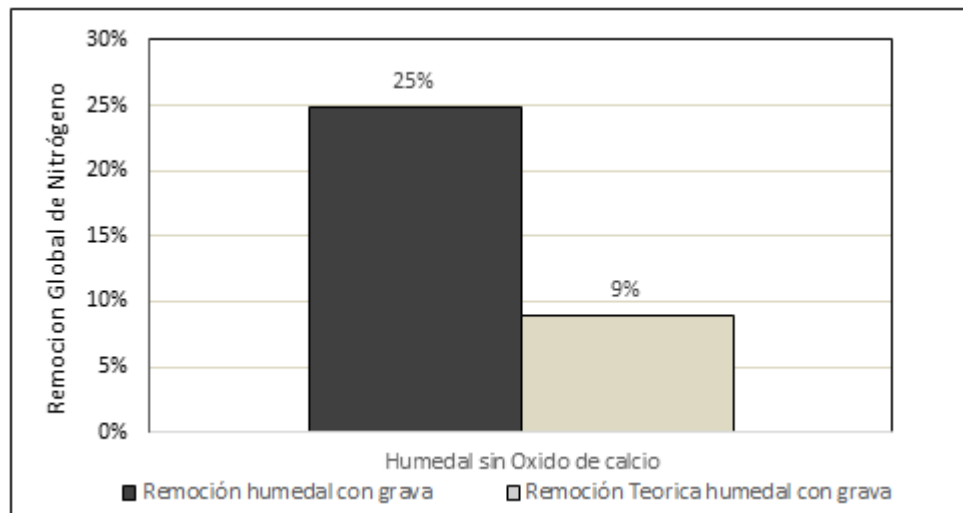


Figura 12. Remoción global experimental y teórica del humedal con grava.

La remoción global del humedal que contiene óxido de calcio fue de 33% y el humedal que contiene grava es de 25%, por lo tanto el humedal que contiene óxido de calcio, tiene una mayor eficiencia en la remoción de nitrógeno en el efluente. En otras palabras el humedal que contiene oxido de

calcio remueve 1,32 veces más nitrógeno en el efluente que en el humedal que contiene grava, esto se explica por la diferencia que existe en ambos humedales con el tiempo de residencia hidráulico, siendo mayor el THR en el humedal que contiene óxido de calcio, por tanto retiene una mayor cantidad de nitrógeno.

4.3. Concentración de Fósforo de los efluentes de los humedales.

La figura 13 y 14, corresponde los resultados de las concentraciones de fósforo correspondiente al humedal que contiene óxido de calcio, en la cual se observan las respuestas que tiene el humedal, en la medida que aumentan las concentraciones del afluente.

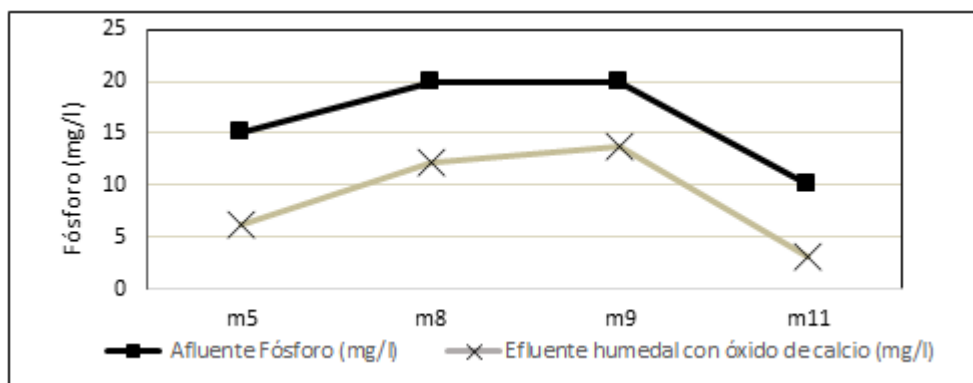


Figura 13. Concentraciones de Fósforo en efluente del H. con O.C.

Al comparar los resultados del análisis de ambos humedales, realizados en el laboratorio de Biodiversa, se aprecia que las concentraciones de fósforo en el efluente fueron menores para el humedal que contiene óxido de calcio.

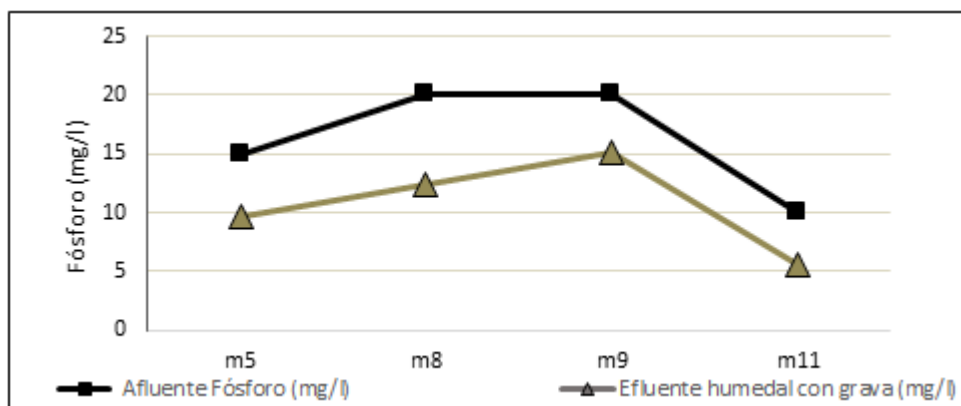


Figura 14. Concentraciones de Fósforo en efluente del humedal con grava.

Con respecto a la remoción de fósforo, se observa que para una baja concentraciones de fósforo en el afluente, la remoción es mayor. Tal como se muestra en la Figura 15, para el humedal que contiene oxido de calcio.

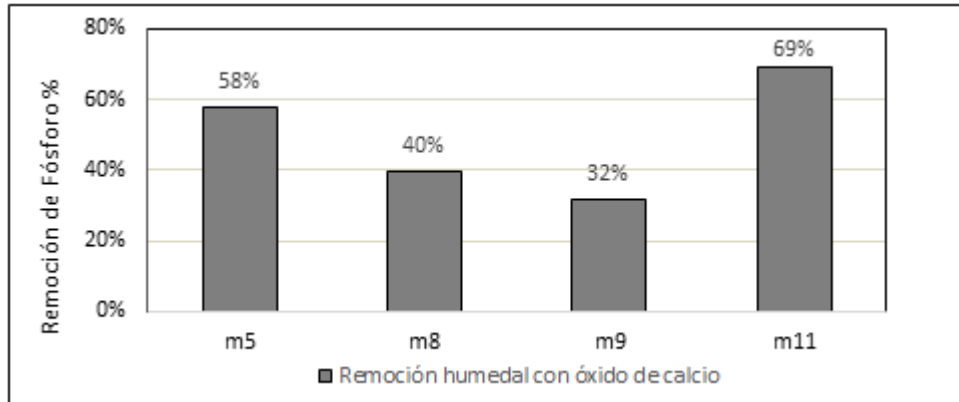


Figura 15. Remoción de Fósforo en efluente humedal con óxido de calcio.

El humedal que contiene óxido de calcio, tiene mayor remoción en todas las muestras analizada en comparación al otro humedal que contiene grava.

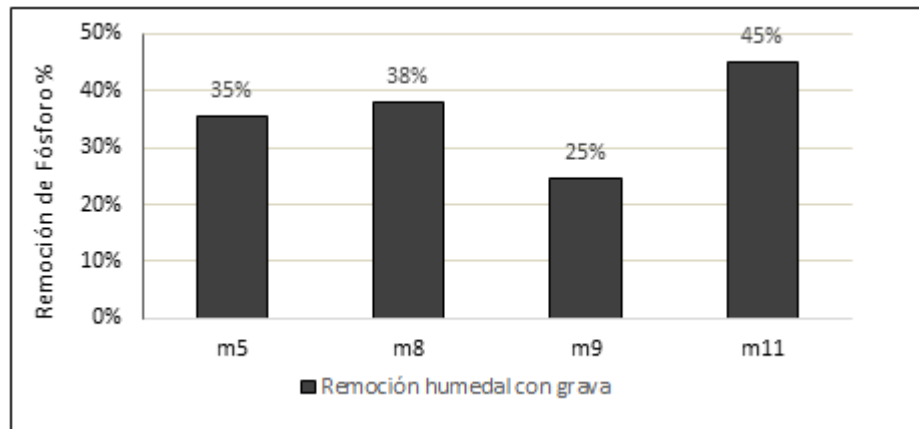


Figura 16. Remoción de Fósforo en efluente humedal con grava.

4.4. Rendimientos de los humedales en remoción de Fósforo.

El rendimiento del humedal que contiene óxido de calcio, está determinado por el promedio de remoción de Fósforo, se compara los resultados del modelo teórico de remoción de fósforo tal como se muestra en la Figura 17.

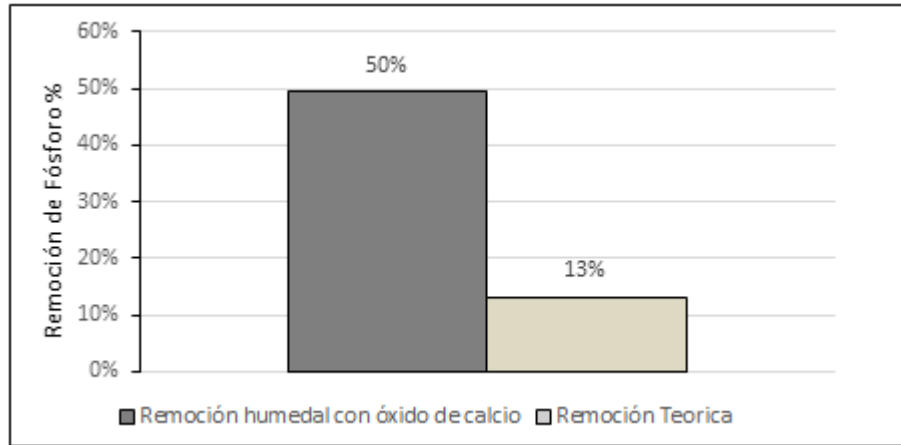


Figura 17. Remoción global experimental y teórica de humedal con óxido de calcio.

La remoción que existe en este humedal es mayor a la esperada teóricamente, siendo el humedal que contiene óxido de calcio el que remueve 3.85 veces más fósforo, en cambio el humedal que contiene grava remueve 2.77 veces más fósforo que la teoría, así lo muestra la Figura 18.

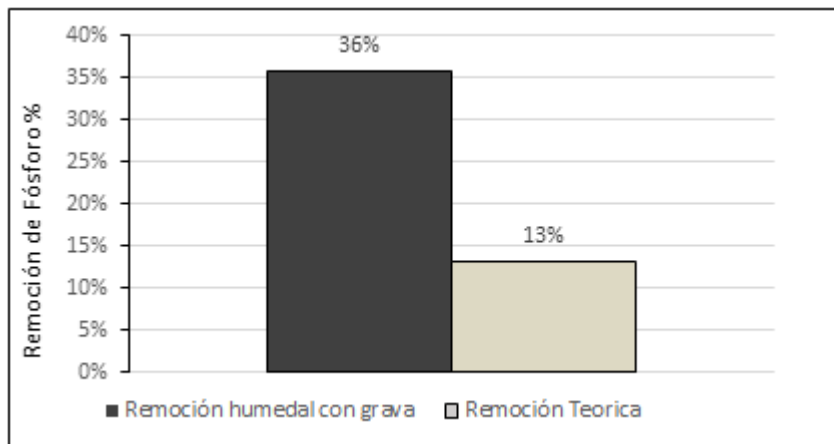


Figura 18. Remoción global experimental y teórica de humedal con grava.

El resultado de la comparación de ambos humedales, muestra que el humedal que contiene óxido de calcio tiene una mayor remoción de fósforo (50%), que el humedal que contiene grava (36%). El humedal que contiene óxido de calcio remueve 1.38 veces más fosforo que el otro humedal. Las diferencias de los resultados de ambos humedales en cuento a la remoción de fósforo, son producto de los fenómenos de superficie y afinidad química, bajo este punto de vista se espera que el humedal que contiene óxido de calcio, obtenga mejores eficiencia en la remoción de fósforo debido a que tiene una mayor retención y tiempo de residencia hidráulico, en comparación al otro humedal.

5. CONCLUSIONES.

De acuerdo a los objetivos planteados al inicio de la investigación, los resultados obtenidos y el análisis de datos, se determinan las siguientes conclusiones y recomendaciones.

5.1. Conclusiones.

- ❖ De los resultados obtenidos y los análisis estadísticos realizados, se puede observar que: el humedal que contiene óxido de calcio, entrega un efluente de mejor calidad, dado que remueve 1.32 y 1.38 veces más concentraciones de nitrógeno y de fósforo respectivamente.
- ❖ Al aumentar la concentración de nitrógeno del afluente, se observa que: en ambos humedales el rendimiento disminuye en cuanto a la remoción de nitrógeno. Las concentraciones de nitrógeno en el afluente de cada campaña y para ambos humedales son 50, 75, 100 y 50 mg/l, estas remociones son 46, 41, 23. 18 %, correspondiente al humedal que contiene óxido de calcio y para el humedal que contiene grava, se obtuvieron las siguientes remociones de 34, 26, 22 y 14 %.
- ❖ Las concentraciones de fósforo en el afluente de ambos humedales son 15, 20, 10 mg/l y se obtuvieron remociones de 58, 40, 32, 69% y 35, 38, 25, 45% para los humedales con óxido de calcio y grava respectivamente, con ello se observa que el humedal que contenía óxido de calcio removió más fósforo.
- ❖ Al finalizar la investigación, se observó que la vegetación que se encontraba en el humedal, el cual contenía óxido de calcio se fue deteriorando, al contrario del otro humedal, donde tuvo una adecuada adaptación. Durante el periodo de investigación se visualiza que estas plantas crecen rápidamente y además tiene rápida aparición de nuevas plantas en el caso del humedal que no contenía óxido de calcio.

REFERENCIAS

1. Arias, O (2004) “Estudio de la biodegradación de la materia orgánica en humedales construidos de flujo subsuperficial”. Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d’Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental Tesina, Barcelona.
2. Cooper, P (1996) “Reed beds and constructed wetlands for wastewater treatment, WRc, Swindon.
3. Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L., y Andrade, M. (2010).”Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales” Centro Andino para la gestión y uso del agua, Bolivia.
4. E.P.A. (2000). “Constructed wetlands treatment of municipal wastewaters”. United States Environmental Protection Agency EPA/625/R-99/010.
5. Fuentes, I. (2013). “Análisis del rendimiento en remoción de dos humedales con distintas soluciones hidrodinámicas”. Proyecto de Título Ingeniería Civil, Universidad del Bío Bío.
6. García, J., Corzo, A.”Depuración con humedales construidos”. Guía práctica de diseño, construcción y de sistemas de humedales de flujo subsuperficial, Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la Universidad Politècnica de Catalunya, España
7. Henze M. (1995). ”Wastewater, volumes and composition: Biological and chemical process, Wastewater Treatment”, Springer-Verlag, Berlin, 1995.
8. Kadlec, R.H and Knight, R.L. (1996). “Treatment wetlands”. CRC Press, Florida, 893 pp.
9. Kadlec, R.H and Wallace, S.D (2009). “Treatment wetlands”
10. Kolb, P (1998) “Desing of a constructed wetland (pilot plant) for the reclamation of the river Besós”, Diplomarbeit Zur Erlangung des Akademischen Grades Diplomingenieur, Unerversitat für Bodenkultur.

11. Lara, J. (1999). “Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales”. Trabajo Final, Mg. Ing. Gest. Amb. Universidad Politécnica, Instituto Catalán de Tecnología. Barcelona, España.
12. Llanos, M (2014) “Incidencia de la DQO del afluente en la eficiencia de humedales de flujo subsuperficial con soluciones hidrodinámicas distintas”. Proyecto de Título Ingeniería Civil, Universidad del Bío Bío.
13. Metcalf & Eddy. “Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización”. Volumen 1 y 2. Tercera edición. Madrid: McGraw-Hill, 1996.
14. Ramalho R.S. (1993). “Tratamiento de Aguas Residuales”, Editorial Reverte S.A. México.
15. Reed, SC, Crites R.W, Middlebrooks, (1995) “E.J, Natural Systems for waste Management and Treatment”, 2a Ed, McGraw-Will, INC New York.
16. Steiner, G. R. (1993). “Construction and operation guidelines for small constructed wetlands”. Wastewater Treatment systems.
17. W.E.F. (1992). “Design of Municipal Wastewater Treatment Plants”. Manual of Practice No.8 and ASCE Manual and Report on Engineering Practice No.76, Volume II, Book Press, Inc. Brattleboro, Vermont.

ANEXOS

INDICE GENERAL DE ANEXOS

ANEXO A: DISEÑOS HIDRÁULICOS 390

 Propiedades de la grava 41

 Caudal y Velocidad máxima de entrada al humedal..... 41

 Caudal y Velocidad máxima disponible en el humedal..... 42

 Estanque de almacenamiento..... 42

 Tuberías de alimentación al sistema. 43

 Balance de energía. 44

ANEXO B: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS HUMEDALES 45

 Dimensiones de los humedales. 46

 Diseño Dispositivo de Salida..... 48

 Diseño del Dispositivo de Salida Externo. 49

 Excavación para los Humedales. 49

 Extracción e implantación de la Vegetación..... 50

 Cierre Perimetral..... 51

ANEXO C: OPERACIÓN DE LOS HUMEDALES 52

 Puesta en marcha de los humedales 53

 Programación de toma de Muestras..... 54

ANEXO D: ANÁLISIS ESTADISTICO DE LAS MUESTRAS 56

 Análisis estadístico t Student 57

INDICE DE FIGURAS

Figura A 1. Esquema de tuberías de alimentación a los humedales..... 43

Figura B 1. Dimensiones del humedal con grava..... 46

Figura B 2. Dimensiones del humedal que con óxido de calcio..... 47

Figura B 3. Distribución del medio granular dentro del humedal..... 47

Figura B 4. Incorporación de óxido de calcio dentro del humedal. 48

Figura B 5. Dispositivo de captación del afluente del humedal..... 49

Figura B 6. Dispositivo de salida del humedal..... 49

Figura B 7. Excavaciones construcción de los humedales 50

Figura B 8. Localización satelital “Google Earth” Complejo Ainahue..... 50

Figura B 9. Distribución de plantas en los humedales 51

Figura B 10. Construcción definitiva de los humedales 51

Figura C 1. Estado de la vegetación antes de la puesta en marcha..... 53

Figura C 2. Inicio de puesta en marcha 54

Figura C 3. Humedales a los 30 días de funcionamiento. 54

INDICE DE TABLAS

Tabla C 1. Programación de la toma de muestras 55

Tabla D 1. Resultados de concentraciones de nitrógeno de efluente en ambos humedales 57

Tabla D 2. Resultados de análisis t Students. 58

ANEXO A: DISEÑOS HIDRÁULICOS

❖ Propiedades de la grava

El medio granular se clasifica como material granular A1-a según el sistema AASHTO y grava pobremente graduada según el sistema USCS.

Obtención de densidad del material granular, se llena un recipiente de $0,015 \text{ m}^3$ con grava y posteriormente se pesa. Éste procedimiento se repite 3 veces determinando una masa promedio de $22,4 \text{ kg}$.

$$\rho = \frac{\text{Masa}}{\text{Volumen}} \quad \text{Ec. A1}$$

$$\rho_t = \frac{22,4}{0,015} = 1493 \text{ kg/m}^3$$

Para determinar la densidad saturada del material, se procede a llenar con agua el recipiente y el material granular dentro de él, para posteriormente pesarlo de esta forma determinar la masa saturada de 29 kg .

Utilizando la Ec. A1 se determina la densidad saturada del medio granular:

$$\rho_s = \frac{29}{0,015} = 1933 \text{ kg/m}^3$$

Conociendo el volumen de vacíos dejados por el material dentro del recipiente, el cual es equivalente al volumen de agua, se obtiene la Porosidad (n).

$$\rho_{\text{Agua}} = \frac{M_{\text{agua}}}{V_{\text{agua}}} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \rightarrow V_{\text{agua}} = \frac{M_{\text{agua}}}{\rho_{\text{agua}}}$$

$$V_{\text{vacios}} = V_{\text{agua}} = \frac{28,9 - 22,4}{1000} = 0,0065 \text{ m}^3$$

$$n = \frac{V_{\text{vacios}}}{V_{\text{total}}} \quad \text{Ec. A2}$$

$$n = \frac{0,00665}{0,015} = 0,43$$

Para la conductividad hidráulica, asume una conductividad hidráulica de $35.000 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{dia}}$ para una porosidad del $0,44$ de acuerdo a las investigaciones realizada por Reed (1995).

❖ Caudal y Velocidad máxima de entrada al humedal.

El caudal máximo utilizado es de 4 ml/s ($4 * 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$), el cual es condicionado por los requerimientos de la investigación.

La velocidad máxima de entrada al humedal está relacionada con el caudal máximo utilizado y el diámetro de las tuberías.

$$Q_{\max e} = V_{\max e} * A_{Tub} \quad \text{Ec. A3}$$

$$V_{\max} = \frac{4 * 10^{-6}}{\pi * \left(\frac{0.02}{2}\right)^2} = 0,0127 \frac{m}{s}$$

❖ Caudal y Velocidad máxima disponible en el humedal.

El caudal máximo disponible se obtiene de la de Darcy, válida para flujos laminares en un medio poroso.

$$Q = K_s * A_c * G \quad \text{Ec. A4}$$

$$Q_{\max H} = 37000 \frac{m}{dia} * (0,5 * 0,9)m^2 * 0,02 = 333 \frac{m^3}{dia} = 0.00385 \frac{m^3}{s} = 13875 \frac{lt}{hora}$$

Para la determinación de la velocidad máxima.

$$V = K_s * G$$

$$V_{\max H} = 37000 \frac{m}{dia} * 0,02 = 740 \frac{m}{dia} = 0,0086 \frac{m}{s}$$

Con los parámetros de diseño y la característica del medio granular, se confirma que el caudal y la velocidad máxima disponible son mayores que los usados en esta experiencia, por lo que no existen problemas de aumento del nivel del agua en los humedales.

❖ Estanque de almacenamiento.

El correcto funcionamiento de los humedales está determinado por la carga continua de agua residual, bajo esta condición es necesario calcular el tiempo de vaciado del estanque de almacenamiento (1 m³), de tal forma que se garantice el caudal necesario (14,4 lt/hr).

$$Q = \frac{\text{Volumen}}{\text{Tiempo}} \quad \text{Ec. A5}$$

$$T_v = \frac{\text{Volumen}}{2 * Q} = \frac{1000 \text{ lt}}{2 * 14,4 \text{ lt/hr}} = 34.72 \text{ hr}$$

Con este tiempo se puede determinar el tiempo necesario para volver a cargar el estanque y de esta forma mantener una carga continua, evitando cortes.

❖ **Tuberías de alimentación al sistema.**

El agua residual artificial contenida en el estanque es distribuida hacia los humedales a través de una tubería de PVC Presión de 20 mm de diámetro. La Figura A2 muestra el detalle de todos los accesorios utilizados para la alimentación de los humedales.

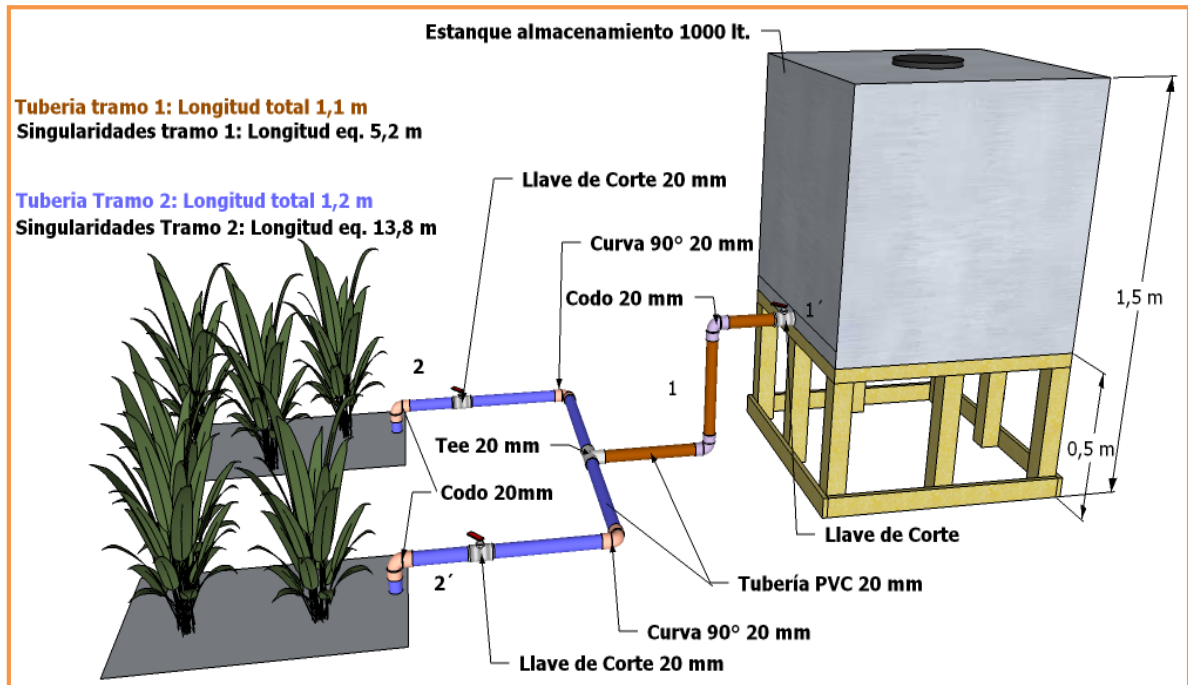


Figura A 1. Esquema de tuberías de alimentación a los humedales (Llanos, 2014).

Para la clasificación del flujo es necesario calcular el número de Reynolds mediante la Ec.6.

$$R_e = \frac{4*Q*10^6}{\pi*D} \quad \text{Ec. A6}$$

Numero de Reynolds Tramo 1 = 300

Numero de Reynolds Tramo 2 = 150

El número de Reynolds de ambos tramos son menores que 2000, entonces podemos clasificar el movimiento del flujo en las tuberías como régimen laminar, para esta clasificación se utiliza la relación de Hagen – Poiseuille ($f = 64/R_e$) para la determinación de las pérdidas de energía por fricción en el sistema.

❖ **Balance de energía.**

$$1) Q_1 = Q_2 + Q_2'$$

$$2) Q_2 = Q_2'$$

$$3) Z_{1'} = \frac{8 \cdot f_1 \cdot L_1 \cdot Q_1^2}{\pi^2 \cdot D_1^5 \cdot g} + \frac{8 \cdot f_2 \cdot L_2 \cdot Q_2^2}{\pi^2 \cdot D_2^5 \cdot g} + \frac{8 \cdot Q_2'^2}{\pi^2 \cdot D_2^4 \cdot g}$$

$$4) Z_{1'} = \frac{8 \cdot f_1 \cdot L_1 \cdot Q_1^2}{\pi^2 \cdot D_1^5 \cdot g} + \frac{8 \cdot f_2 \cdot L_2 \cdot Q_2'^2}{\pi^2 \cdot D_2^5 \cdot g} + \frac{8 \cdot Q_2'^2}{\pi^2 \cdot D_2^4 \cdot g}$$

Al resolver el sistema de ecuaciones se obtiene el valor Z1 correspondiente a la altura necesaria para el suministro de los caudales en ambos humedales.

$$Z_{1'} = \frac{8 \cdot \frac{64}{300} \cdot 5,2 \cdot (8 \cdot 10^{-6})^2}{\pi^2 \cdot \left(\frac{20}{1000}\right)^5 \cdot 9,8} + \frac{8 \cdot \frac{64}{150} \cdot 13,8 \cdot \left(\frac{8 \cdot 10^{-6}}{2}\right)^2}{\pi^2 \cdot \left(\frac{20}{1000}\right)^5 \cdot 9,8} + \frac{8 \cdot \left(\frac{8 \cdot 10^{-6}}{2}\right)^2}{\pi^2 \cdot \left(\frac{20}{1000}\right)^4 \cdot 9,8}$$

$$Z_{1'} = 0,00427 \text{ m}$$

La cota del estanque está a 0,5 metros desde el piso y la cota para suministrar el caudal en ambos humedales es 0,00427 m, como Z1 es menor que la cota del estanque, el sistema de alimentación para los humedales queda regulado por las válvulas de paso incorporados en el sistema.

ANEXO B: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS HUMEDALES

❖ Dimensiones de los humedales.

Para el humedal con grava las dimensiones fueron proporcionadas considerando los manuales de diseños, además de las consideradas en la revisión bibliográfica. En las Figuras B1 y B2 se muestran las dimensiones seleccionadas.

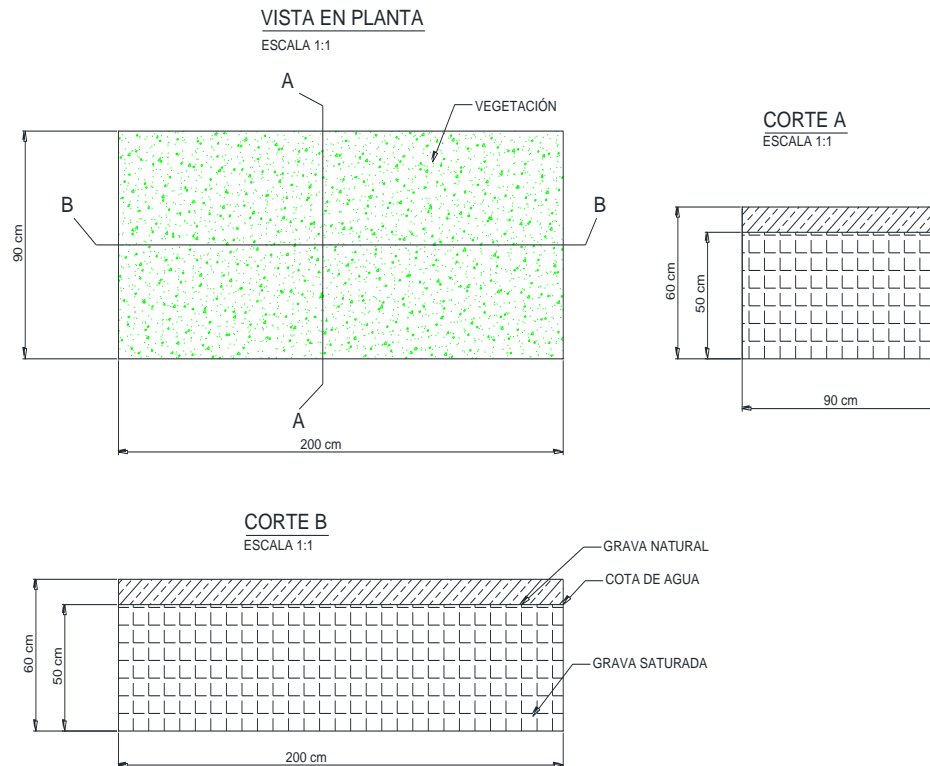


Figura B 1. Dimensiones de humedal con grava.

En el humedal con óxido de calcio las dimensiones y configuración de los medios granulares fueron distintas, dado que el material incorporado tiene un tamaño de partícula muy pequeño dejando la posibilidad de que las partículas de óxido de calcio se introduzca en el dispositivo de salida del humedal, es por esta razón que se decidió mezclar el material granular, dejándolo al medio del humedal y sus extremos con grava para evitar el estancamiento del flujo dentro de él.

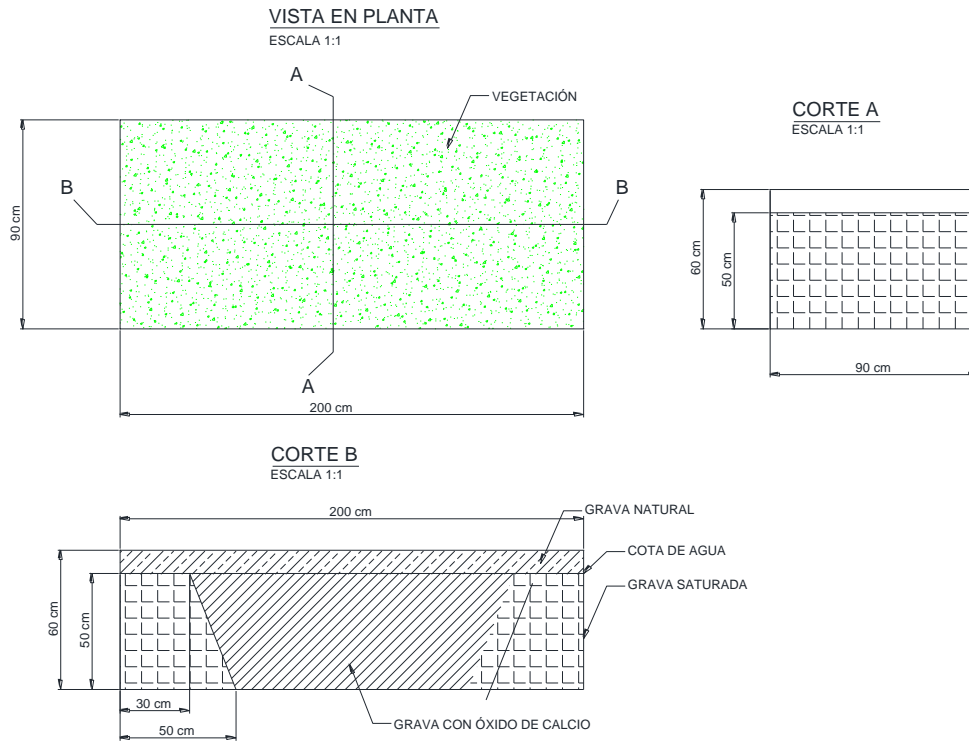


Figura B 2. Dimensiones de humedal con óxido de calcio.



Figura B 3. Distribución del medio granular dentro del humedal.



Figura B 4. Incorporación de óxido de calcio en humedal.

La característica de los humedales subsuperficial horizontal es que se deja una capa libre de agua, en estos humedales se usó un borde libre de 10 cm y 50 cm cubierto con agua como se ilustra en las Figuras B3 y B4.

❖ **Diseño Dispositivo de Salida.**

La Figura B4 muestra la disposición del dispositivo de salida para ambos humedales, se utilizaron 4 tubos de PVC sanitario de 40 mm de diámetro y 0,6 m de largo, para alcanzar 42 cm sobre el fondo del humedal. Cada tubo tiene 20 perforaciones por línea de descarga de 10 mm de diámetro garantizando captación del efluente de forma homogénea sobre el ancho del humedal.



Figura B 5. Dispositivo de captación del afluente del humedal.

❖ **Diseño del Dispositivo de Salida Externo.**

En la figura B5 se muestra la salida del efluente del humedal desembocando a la laguna. Para la salida, es necesario el diseño de un sifón para asegurar la cota de agua dentro del humedal (0,5m).

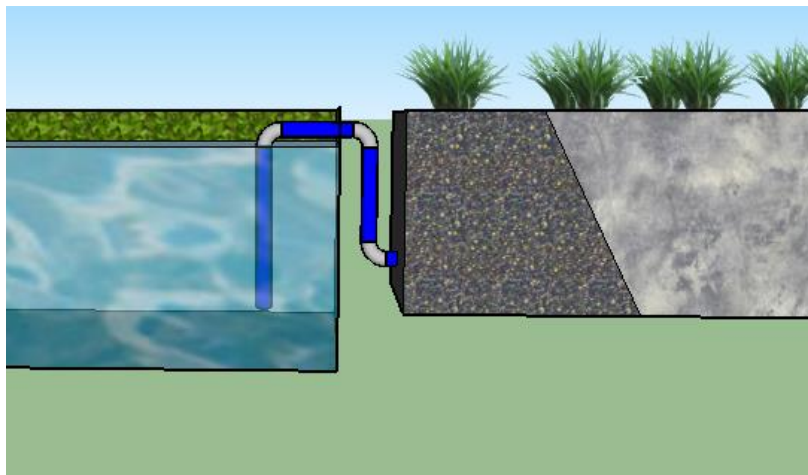


Figura B 6. Dispositivo de salida del humedal.

❖ **Excavación para los Humedales.**

La figura B6 muestra las excavaciones post presentación del material impermeable.



Figura B 7. Excavaciones construcción de los humedales.

❖ **Extracción e implantación de la Vegetación.**

Figura B 8 muestra la localización satelital, donde se extrajeron las Espadañas utilizadas en humedal esto corresponde al Club de Campo Ainahue, ubicado en comuna de Hualqui, Región del Bío-Bío.



Figura B 8. Localización satelital “Google Earth” complejo Ainahue

En esta investigación se distribuyó la vegetación de tal forma que cada planta tuviera un área tributaria, el total de plantas utilizadas para cada humedal es de 20 Figura B8.



Figura B 9. Distribución de plantas en los humedales.

❖ **Cierre Perimetral**

Fue necesario un cierre con control de acceso total, para evitar daños de animales y de terceros, dentro del área de la investigación. Figura B10



Figura B 10. Construcción definitiva de los humedales.

ANEXO C: OPERACIÓN DE LOS HUMEDALES

❖ Puesta en marcha de los humedales

El inicio del funcionamiento considerando el tiempo de acondicionamiento de la vegetación fue el 20 de enero, para luego dar paso al inicio de la toma de muestra el 21 de febrero considerando la alimentación de los humedales, en igualdad de condiciones, caudal y agua residual artificial del afluente.

En el comienzo de la puesta en marcha las plantas se encontraban en el mismo estado en que fueron extraída, luego en el pasar del tiempo se observó un evidente deterioro paulatinamente y progresivo en el tiempo en el caso del humedal que contiene óxido del calcio. Las figuras C1 muestran estado en que llegaron.



Figura C 1. Estado de vegetación antes de puesta en marcha.

En Figura C2 muestra el estado de ambos humedales en su puesta en marcha.



Figura C 2. Inicio de puesta en marcha.

Luego de 30 días, desde el inicio de la toma de muestra, se observa el deterioro de la vegetación correspondiente al humedal que contiene óxido de calcio y en cambio el humedal que no contiene el óxido de calcio, mantuvo su estado inicial, desde la puesta en marcha. Figura C3



Figura C 3. Humedales a los 30 días de funcionamiento.

❖ **Programación de toma de Muestras.**

La toma de muestra fue distribuida considerando el tiempo de residencia hidráulico de cada humedal tal como se muestra en la Tabla C1.

Tabla C 1. Programación de la toma de muestras

Mes	Febrero														Marzo																						
Semana	1				2					3					4				5					6													
Días	18	19	20	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			
Campaña	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	M	J	V	S	D	L	M			
Campaña 1																																					
Campaña 2																																					
Campaña 3																																					
Campaña 4																																					

Concetraciones (mg/l)			
	Nitrogeno	Fósforo	Sacarosa
	50	10	1000
	75	15	1000
	100	20	1000
	50	10	1000

ANEXO D: ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS MUESTRAS

❖ Análisis estadístico t Student

Para el comportamiento de los datos de ambos humedales se, realiza un análisis de t Students y se observa que si existen diferencias significativas entre ellos. Se trabajara con un valor de alpha de 0,05 y bajo la siguiente hipótesis.

- $H_0 = 0$

Indica que no existen diferencias significativas entre los resultados de Nitrógeno del humedal con óxido de calcio en el efluente.

- $H_1 \neq 0$

Indica que existen diferencias significativas entre ambos humedales.

La Tabla D1 muestra los resultados de las concentraciones de nitrógeno para el análisis de t Students.

Tabla D 1. Resultados de DQO de afluentes de ambos humedales

N° de Muestras	Afluente Nitrogeno (mg/l)	H. con óxido de calcio	H. sin óxido de calcio
1	50	28.5	34.6
2	50	25.3	31.4
3	50	27.6	33.7
4	75	46.2	53.7
5	75	40.8	58.5
6	75	46.8	54.3
7	100	73.6	76.8
8	100	78	79.2
9	100	78.4	78
10	50	40	41

A través del software Microsoft Excel, se analizan los datos de cada muestra vistoc anteriormente.

Tabla D2 muestra los resultados del análisis estadístico.

Tabla D 2. Resultados de análisis t Students.

Prueba t para medias de dos muestras emparejadas		
	<i>H. con óxido de calcio</i>	<i>H. sin óxido de calcio</i>
Media	48.52	54.12
Varianza	434.337	357.708
Observaciones	10.000	10.000
Coeficiente de correlación de Pearson	0.971	
Diferencia hipotética de las medias	0.000	
Grados de libertad	9.000	
Estadístico t	-3.453	
P(T<=t) una cola	0.004	
Valor crítico de t (una cola)	1.833	
P(T<=t) dos colas	0.007	
Valor crítico de t (dos colas)	2.262	

En resultado del análisis estadístico se observa que el valor absoluto del estadístico t (3,453) siendo mayor que el valor crítico de t dos colas (2,262) y además P es menor que 0,025, se concluye el rechazo de la hipótesis nula y se aprueba H1, en otras palabras existen diferencias significativas entre las concentraciones de Nitrógeno del efluente del humedal con óxido de calcio.