

UNIVERSIDAD DEL BÍO - BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

Profesor Patrocinante: Dr. Pedro Cisterna Osorio.

Dinámica de recuperación de un humedal de flujo subsuperficial frente a un escenario de sequedad y ausencia de carga orgánica.

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

Álvaro Ignacio Mella Paredes

Concepción, octubre 2018

Índice General

RESUMEN	4
ABSTRACT	5
1. INTRODUCCIÓN	6
1.1. Justificación	7
1.2. Objetivo General:	8
1.3. Objetivos Específicos:	8
2. INFORMACIÓN PRELIMINAR	9
2.1. Ubicación	9
2.2. Humedales	10
2.3. Utilidad de los humedales	10
2.3.1. Humedales como depuradores de aguas	11
2.4. Humedales Artificiales	11
2.5. Descripción de Humedal domiciliar Coliumo.	13
2.6. Componentes del humedal artificial de flujo sub superficial.	14
2.6.1. El Agua	14
2.6.2. Vegetación	15
2.6.2.1. Espadaña (<i>Typha angustifolia</i>)	16
2.6.2.2. Cala (<i>Zantedeschia aethiopica</i>)	17
2.6.3. Los Microorganismos	17
2.6.4. El oxígeno	18
2.6.5. Temperatura	18
2.6.6. Remoción de materia orgánica	19
2.6.7. Demanda química de oxígeno (DQO)	19
3. METODOLOGÍA	20
3.1. Sistema de toma de datos	20
3.1.1. Zonificación y ubicación de dispositivos para medición	20
3.1.2. Diseño de dispositivo para medición	21
3.1.2.1. Proceso constructivo e instalación de tubos	22
3.2. Equipo de medición de oxígeno disuelto	24
3.3. Medición Altura de las plantas	25

3.4 Volumen de agua contenido en el humedal -----	26
3.5 Caudal de agua residual entrante -----	27
3.6 Pluviosidad-----	28
4 RESULTADOS Y ANÁLISIS-----	29
4.1 Vegetación -----	29
4.2 Oxígeno Disuelto-----	35
4.3 Pluviosidad y altura de agua-----	38
4.4 Caudales entrantes y Volumen de agua. -----	40
5 CONCLUSIONES-----	41
6 REFERENCIAS -----	42
ANEXOS -----	44

DINÁMICA DE RECUPERACIÓN DE UN HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL FRENTE A UN ESCENARIO DE SEQUEDAD Y AUSENCIA DE CARGA ORGÁNICA.

Autor: Álvaro Ignacio Mella Paredes.

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

Correo Electrónico: aimella@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

Tratar las aguas residuales es fundamental a nivel planetario, ya que permite un mejor ambiente, salud y calidad de vida. Los humedales artificiales cumplen la función de una planta de tratamiento de aguas residuales, siendo una opción de bajo costo de inversión, operación y mantención, obteniendo altos rendimientos.

Este estudio se realizó al interior del humedal artificial de flujo sub superficial de un domicilio de veraneo en la península de Coliumo, ubicada a 39 km de Concepción. Se realizó el monitoreo de los niveles de oxígeno disuelto del agua del humedal en distintos puntos de este, de la altura de agua del humedal, y también se midió el desarrollo de la altura de las distintas plantas espadañas y calas dispuestas, todo esto antes, durante y luego de un escenario de intensa sequedad y nulo aporte de carga orgánica que se extendió por 57 días. Además de los datos obtenidos in situ, se tomaron en cuenta las precipitaciones diarias ocurridas en el lugar y el caudal de agua residual ingresante al humedal, correlacionando estas variables. Se obtuvieron resultados que garantizan la resiliencia de la vegetación ante condiciones adversas, siendo factible la aplicación de humedales como solución de tratamiento de aguas residuales en lugares rurales de la región del Bío-Bío y con uso estacional, como domicilios o cabañas de veraneo y colegios.

Palabras claves: Humedal artificial, aguas residuales, oxígeno disuelto, vegetación.

Numero de palabras: 220.

DYNAMICS OF RECOVERY OF A SUBSUPERFICIAL FLOW WETLAND TO A DRY SCENARIO AND ABSENCE OF ORGANIC CARGO.

Author: Álvaro Ignacio Mella Paredes.

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

Email: aimella@alumnos.ubiobio.cl

Sponsor Professor: Dr. Pedro Cisterna Osorio.

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

Email: pcisterna@ubiobio.cl

ABSTRACT

Treat wastewater is essential to planetary level, allowing a better environment, health and quality of life. Constructed wetlands play an important role in the treatment of wastewater, being a low-cost investment, operation and maintenance, obtaining high yields in organic matter removal.

This study was carried out in the interior of the artificial subsurface flow wetland of an address in the Coliumo peninsula, located 39 km from Concepción, Biobío, Chile.

The dissolved oxygen levels of the water in the wetland were monitored at different points of the wetland, and the height of the different plants, bulrushes and coves were measured, keeping a photographic record of its evolution, all this before, during and after a scenario of intense dryness and zero organic load contribution that lasted for 57 days. In addition to the data obtained in situ, the daily precipitations occurred in the place and the flow of residual water entering the wetland were taken into account, correlating these variables. Results were obtained that guarantee the resilience of the vegetation before adverse conditions, being feasible the application of wetlands as a solution for wastewater treatment in rural places and with seasonal use, such as summer homes and cabins and schools.

1. INTRODUCCIÓN

En términos de desafíos en la gestión del agua, un elemento clave es el cambio climático y los escenarios que para Chile este implica. Las proyecciones indican transformaciones importantes en términos del ciclo hidrológico considerando efectos en el régimen de precipitaciones, disminución de las reservas de agua, aumento de la temperatura del mar y aumento de fenómenos extremos, como sequías e inundaciones (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático, 2008). En este sentido, contar con información de estudios que apunten a manejar de mejor manera este recurso permitirá optimizar su uso, incorporando en su gestión los desafíos futuros que implica el cambio climático y las variaciones que este traerá en su disponibilidad.

Chile posee una población de 17,57 millones de habitantes aproximadamente y una tasa de crecimiento demográfico de 0,93 % (Censo 2017), el consumo promedio nacional de agua varía entre los 137 a 167 litros por persona al día, generando anualmente altas descargas de agua residual.

El agua pierde su potabilidad cuando está contaminada, consecuencia de la alteración de sus características químicas, físicas y biológicas o su composición. Las aguas residuales se definen como aguas de composición variada, proveniente de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios agrícolas, pecuarios y domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general, de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas (Rodríguez-Monroy y Duran de Bazúa, citado por Romero, 2009).

El tratamiento de aguas residuales por humedales artificiales, ha sido una solución muy atractiva, ya que a pesar de la intervención humana, se acerca a lo que ocurre en la naturaleza, además de su versatilidad y rentabilidad económica. El objetivo del tratamiento de las aguas residuales es producir efluente reutilizable en el ambiente y un residuo sólido o fango (también llamado biosólido o lodo) convenientes para su disposición o reutilización.

En lo que respecta a este documento, el estudio se enfocará en el monitoreo de la dinámica de recuperación de un humedal artificial de flujo subsuperficial como sistema de tratamiento de aguas

residuales de un domicilio de veraneo ubicado en la península de Coliumo, (comuna Tomé, Provincia de Concepción, Región del Biobío) que contó con un período de dos meses sin recibir aportes de agua residual, debido a la irregularidad en su uso, y con bajos aportes de pluviosidad. Se correlacionarán datos de precipitaciones, altura de agua en humedal, evolución de altura de vegetación de calas y espadañas plantadas, y oxígeno disuelto en distintos puntos del humedal, y se evaluará la capacidad de resiliencia del humedal ante este escenario de sequedad.

1.1. Justificación

Uno de los componentes fundamentales de los humedales naturales y artificiales son las plantas, que a través de sus raíces y rizomas proporcionan la mayor parte del oxígeno necesario para favorecer la actividad de los microorganismos aerobios que degradan la materia orgánica del agua residual.

La vegetación de los humedales naturales y artificiales se caracteriza por ser capaz de crecer bajo diversas condiciones medioambientales, estando adaptada para vivir en terrenos inundados durante toda su vida o encharcados durante largos períodos de tiempo. Pero, ¿cómo se comportarán las plantas cuando no reciban aguas lluvias ni aguas residuales por largos períodos de tiempo? Este estudio tiene su justificación en analizar cómo evolucionará la vegetación de un humedal de flujo subsuperficial de un domicilio de veraneo, que aporta agua residual al humedal sólo durante época estival y algunos fines de semana largos, dejando al humedal en condiciones de sequedad por largos períodos de tiempo.

1.2. Objetivo General:

- Evaluar la capacidad de recuperación del humedal ante un escenario de sequedad y ausencia de carga orgánica.

1.3. Objetivos Específicos:

- Evaluar el crecimiento de las distintas plantas dispuestas en el humedal.
- Evaluar el comportamiento del oxígeno disuelto en distintas zonas del humedal domiciliario de Coliumo.
- Relacionar los niveles de agua en el humedal con la pluviosidad y caudal de agua residual del afluente.
- Establecer correlaciones de los parámetros medidos.

2. INFORMACIÓN PRELIMINAR

2.1. Ubicación

El domicilio que cuenta con el humedal en estudio se ubica en la península de Coliumo, en la comuna de Tomé, a 36km de la ciudad de Concepción, Biobío. La casa corresponde a un sitio de veraneo y cuenta con 3 habitaciones y un baño.

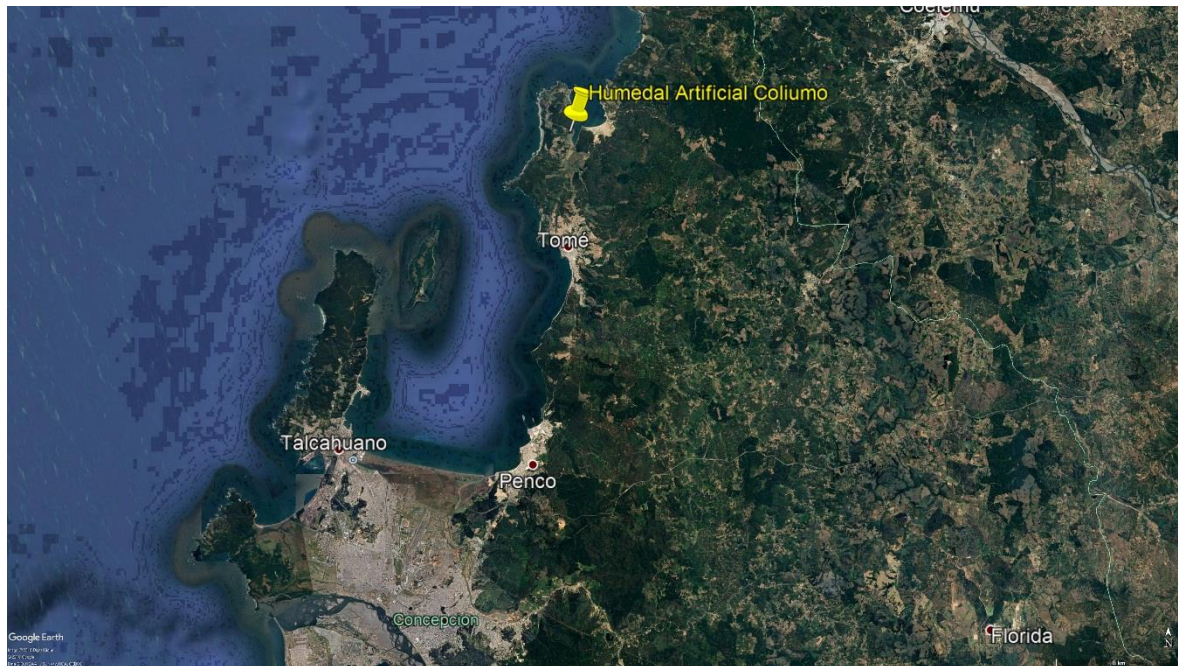


Figura 1. Ubicación Humedal Domiciliario Coliumo (Fuente: Google Earth)

2.2. Humedales

Los humedales son zonas donde el agua es el principal factor controlador del medio y la vida vegetal y animal asociada a él. Los humedales se dan donde la capa freática se halla en la superficie terrestre o cerca de ella o donde la tierra está cubierta por aguas poco profundas.

La Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971) lo define como, “las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de agua, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobre o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros”.

Los humedales se pueden agrupar de manera general en humedales **marinos** (humedales costeros, inclusive lagunas costeras, costas rocosas y arrecifes de coral); **estuarinos** (incluidos deltas, marismas de marea y manglares); **lacustres** (humedales asociados con lagos); **ribereños** (humedales adyacentes a ríos y arroyos); **palustres** (es decir, “pantanosos” – marismas, pantanos y ciénagas); y **artificiales** (tales como estanques de tratamiento de aguas residuales y embalses).

2.3. Utilidad de los humedales

Los humedales figuran entre los medios más productivos del mundo. Son cunas de diversidad biológica y fuentes de agua y productividad primaria de las que innumerables especies vegetales y animales dependen para subsistir. Dan sustento a altas concentraciones de especies de aves, mamíferos, reptiles, anfibios, peces e invertebrados. Los humedales son también importantes depósitos de material genético vegetal. El arroz, por ejemplo, una especie común de los humedales, es el principal alimento de más de la mitad de la humanidad.

Las interacciones de los componentes físicos, biológicos y químicos de un humedal con elementos naturales del planeta, tales como los suelos, el agua, las plantas y los animales, hacen posible que desempeñe muchas funciones vitales, como por ejemplo, almacenamiento de agua; protección contra tormentas y mitigación de crecidas; estabilización de costas y control de la erosión; recarga y descarga de acuíferos; retención de nutrientes sedimentos y contaminantes; estabilización de las condiciones climáticas locales, particularmente lluvia y temperatura; y **depuración de aguas**.

2.3.1. Humedales como depuradores de aguas

En el ecosistema de los humedales se desarrollan determinados procesos físicos, biológicos y químicos que son capaces de depurar el agua, eliminando grandes cantidades de materia orgánica, sólidos en suspensión, nitratos, fosfatos e incluso algunos metales pesados.

2.4. Humedales Artificiales

Los humedales artificiales son sistemas de depuración contruidos por el hombre en los que se reproducen, de manera controlada, los procesos físicos, químicos y biológicos de eliminación de contaminantes que ocurren normalmente en los humedales naturales. Cuentan con vegetación propia de humedales naturales y los procesos de descontaminación tienen lugar mediante las interacciones entre el agua, el sustrato sólido, los microorganismos y la vegetación, dando lugar a la aparición de procesos de sedimentación, filtración, adsorción, degradación biológica, fotosíntesis, fotooxidación y toma de nutrientes por parte de la vegetación.

En lo que respecta a su funcionamiento como tratamiento biológico, se opera en condiciones anaerobias, facultativas y/o aerobias en las que el oxígeno se aporta de forma espontánea por transporte desde la atmósfera, lo que representa un ahorro importante de energía por prescindir de aireación con procedimientos mecánicos. Sin embargo, se debe considerar que se requieren extensiones de terreno superiores a las de los sistemas convencionales, dada la baja velocidad de degradación de la materia orgánica del agua, por lo que son más lentos.

Actualmente existe el uso generalizado de tres tipos:

- 1) Humedal Vertical de Flujo Subsuperficial (VFSS), distribuyen el agua a través de la superficie de una cama de arena o grava plantada con vegetación propia de humedales naturales. El agua es tratada a medida que percola a través de la zona radicular de la planta.
- 2) Humedales Horizontal Superficial o de Flujo Libre (HFS), tienen áreas de agua abiertas y son similares en apariencia a los pantanos naturales.

3) Humedales Horizontales de Flujo Subsuperficial (HFSS), la lámina de agua no es visible y el flujo atraviesa un lecho relleno con arena, grava o suelo, en donde crecen plantas que tienen sus raíces y rizomas en contacto con el agua. El flujo se desplaza horizontalmente por gravedad desde la entrada a la salida.

El humedal en estudio es un Humedal Horizontal de Flujo Subsuperficial (HFSS), desarrollado prioritariamente para remover materia orgánica de aguas residuales domésticas o pequeñas comunidades.

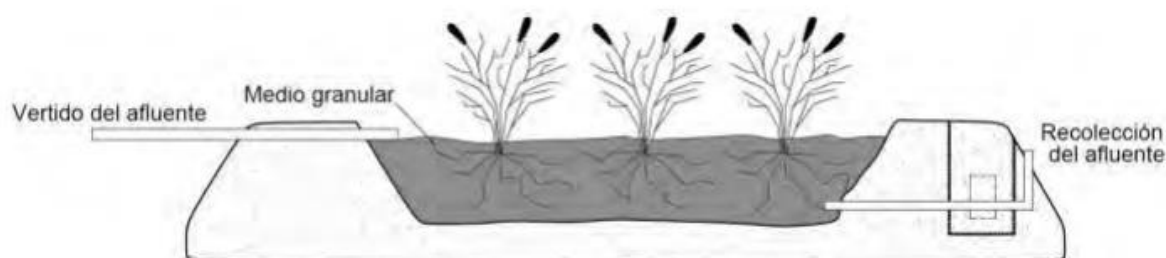


Figura 2. Humedal Horizontal de Flujo Subsuperficial (García, 2008).

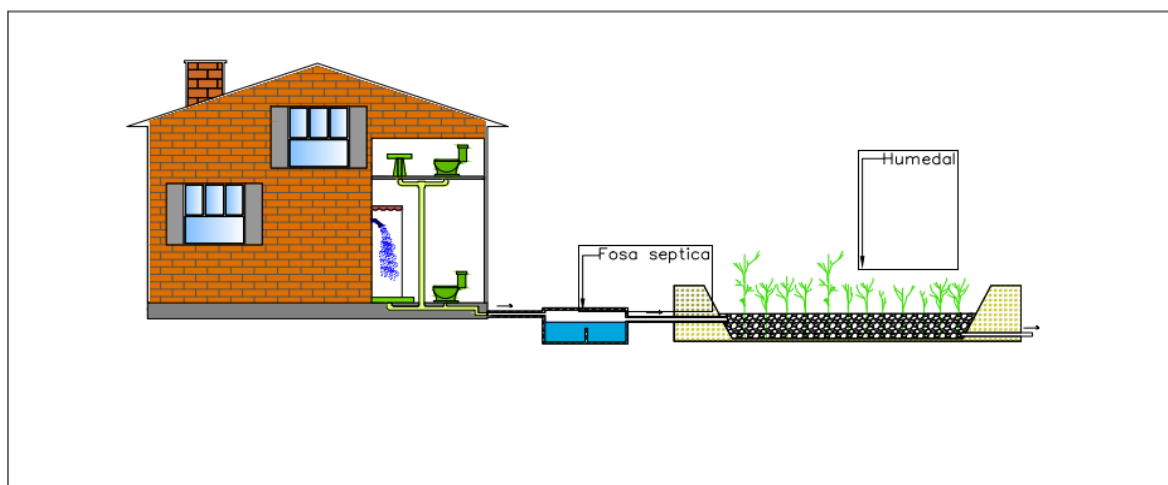


Figura 3. Aplicación de un humedal HFSS para tratamiento de aguas residuales domésticas.
(Elaboración propia).

2.5. Descripción de Humedal domiciliar Coliumo.

El humedal domiciliar de Coliumo es un humedal artificial de flujo sub superficial (HFSS), el cual consiste en una excavación tipo zanja en el suelo que va desde los 0.52 a 0.56 m de profundidad, cubierto con polietileno de alta densidad, para evitar la contaminación del suelo y la napa subterránea.

Para proteger el material aislante del punzonamiento que genera la grava sobre la geomembrana, se dispone una capa de arena gruesa de granulometría menor a 2 [mm], de 0.05 [m] de espesor. Sobre esta cama de arena, se rellena con grava gruesa de granulometría 19 [mm] y porosidad 0.35, la elección de este material se debe principalmente a su alta conductividad hidráulica.



Figura 4. Humedal al inicio del estudio.

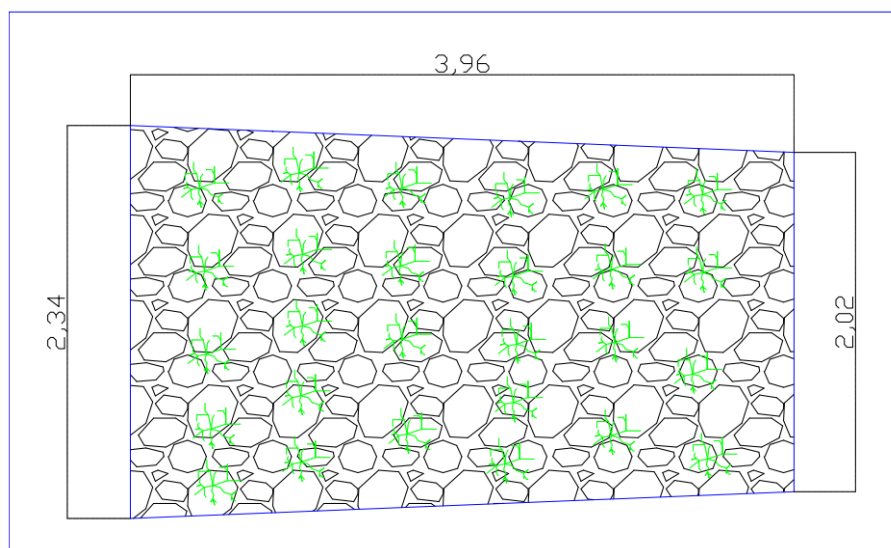


Figura 5. Vista en planta de Humedal en estudio.

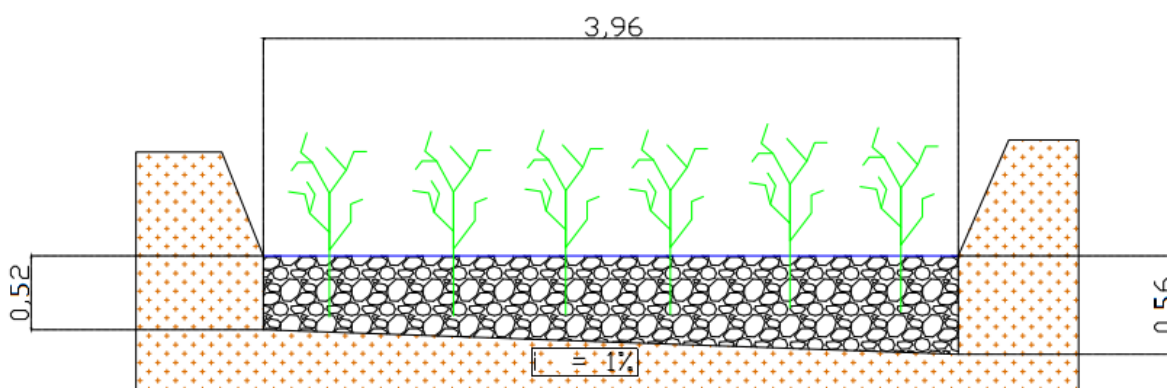


Figura 6. Corte Longitudinal de Humedal en estudio.

2.6. Componentes del humedal artificial de flujo sub superficial.

2.6.1. El Agua

El agua que circula es la encargada de transportar los contaminantes a través del sustrato y de la vegetación.

Las aguas residuales urbanas más típicas tienen componentes normalmente separables o biodegradables, como sólidos, materia orgánica, aceites y grasas, y no suelen presentar sustancias peligrosas. Los volúmenes generados por habitante son variables dependiendo del tamaño de la

población y época del año.

Las aguas residuales provienen principalmente de uso doméstico, y se pueden subdividir en aguas de cocina, con sales, materia orgánica y sólidos, aguas de baño, con jabones y productos de limpieza y aguas de lavado (Fernández, Beascochea, Muñoz, & Curt, 2001).

Los caudales de aguas residuales de los pequeños núcleos de población se caracterizan por presentar grandes variaciones horarias, diarias e incluso mensuales o estacionales (García & Corzo, 2008).

2.6.2 Vegetación

Las plantas son un componente esencial en el diseño y operación de un humedal construido (Konnerup, 2009). Entre la diversidad de funciones que proveen, se cuentan: a) promover el asentamiento y la retención de sólidos en suspensión (Aguirre, 2004), b) proporcionar superficie para el desarrollo de biopelículas microbianas (Bécares, 2004), y c) transportar oxígeno a su zona radicular (Vymazal, 2011). Adicionalmente, generan una vinculación con la vida silvestre al proveer hábitats, y mejoran estéticamente los lugares donde se implantan (Tanner, 2006). Para su utilización en humedales construidos, las plantas deben tener ciertas características, como son: a) ser tolerantes a altas cargas orgánicas (entre 3 y 25 gDBO5 /m² d), b) tener abundantes raíces y rizomas, y c) poseer biomasa aérea alta para asimilar nutrientes (Vymazal, 2011).

La vegetación que se emplea en este tipo de humedales es la misma que coloniza los humedales naturales, plantas acuáticas que se desarrollan en aguas poco profundas, arraigadas al subsuelo. Uno de los rasgos más característicos de la vegetación de los humedales es su adaptación a vivir con una fuerte limitación de la disponibilidad del oxígeno en el suelo, es decir, en condiciones de anaerobiosis que normalmente no soportan las plantas terrestres.

El Humedal Coliumo trabaja con 2 especies de plantas; **Espadañas** (*Typha angustifolia*) y **Calas** (*Zantedeschia aethiopica*).

2.6.2.1 Espadaña (*Typha angustifolia*)

Es una planta comúnmente utilizada en humedales construidos. Macrófita emergente adaptada para crecer en suelos saturados de agua o sumergidos (Kadlec & Wallace, Treatments wetlands, 2009), poseen un sistema radicular arraigado en el fondo del humedal, y estructura vegetativa que emerge por encima de la lámina de agua (Fernández, Beascochea, Muñoz, & Curt, 2001).

Estas pueden crecer hasta profundidades de 0,6 m. Sus tallos alcanzan alturas de 3 m en etapa madura. Se propagan mediante rizomas con una tasa de 0,3 m/ año, siendo capaces de desarrollarse a temperaturas entre 10 y 30°C (Borin, 2003; Wallace y Knight, 2006; USDA, 2012).

Las macrófitas juegan un papel importante en el flujo de energía y los ciclos de nutrientes en los sistemas lacustres. Durante la fotosíntesis son capaces de incorporar energía en forma de materia orgánica y durante este proceso toman nutrientes del agua y de manera importante fósforo y nitrógeno (Wetzel, 1981).

Typha sp puede entregar 0,04 g O₂/m² · d al sistema. Dentro de los beneficios de *Typha* sp. se encuentra su capacidad para generar extremidades radiculares permitiendo una mayor formación de biopelículas bacterianas, formando una interacción simbiótica con las plantas y el sistema (Coleman et al., 2000).



Figura 7. Espadaña (*Typha angustifolia*) de humedal en estudio.

2.6.2.2 Cala (*Zantedeschia aethiopica*)

Es una planta herbácea perenne. Crece en áreas con abundante agua. Se distribuye en todas las regiones subtropicales del mundo, con temperaturas entre 12 y 25 °C, aunque soporta las heladas. Alcanza los 1,5 m de altura y produce de 2 a 3 flores blancas por cada bulbo (Sacoto, 2010).

La profundidad de penetración de esta planta ornamental varía entre 10 y 15 cm. Por otro lado, la altura alcanzada por estas plantas ornamentales, varía entre 60cm y 1m. Prefiere áreas húmedas y sombreadas con abundancia de agua.



Figura 8. Calas (*Zantedeschia aethiopica*) de humedal en estudio.

2.6.3 Los Microorganismos

Los microorganismos se encargan de realizar el tratamiento biológico. En la zona superior del humedal, donde predomina el oxígeno liberado por las raíces de las plantas y el oxígeno proveniente de la atmósfera, se desarrollan colonias de microorganismos aerobios. En el resto del lecho granular predominan los microorganismos anaerobios (Delgadillo, Camancho, Perez, & Andrade, 2010).

Los principales procesos que llevan a cabo los microorganismos son la degradación de la materia orgánica, la eliminación de nutrientes y elementos traza y la desinfección (Arias, 2004).

2.6.4 El oxígeno

El consumo de oxígeno en los humedales es debido principalmente a los siguientes cuatro procesos: la demanda por parte de los sedimentos existentes, las necesidades para la respiración de los microorganismos y plantas que habitan el humedal y las demandas bioquímicas correspondientes a los compuestos disueltos carbonosos y nitrogenados (Píriz, 2000). Para hacer frente a estas demandas de oxígeno los humedales tienen dos mecanismos: la transferencia de oxígeno desde la atmósfera a su interior y la transferencia de oxígeno en el propio lecho (Arias, 2004).

En un suelo saturado los poros existentes están ocupados por el agua, la cual tiene un bajo coeficiente de difusión de oxígeno. Esto produce que este tipo de suelos tengan condiciones anaerobias por lo que las plantas que crecen en ellos se ven obligadas a obtener oxígeno de las partes aéreas y distribuirlo por toda la planta mediante el mecanismo de transporte interno a través de los tallos (Brix, 1994). Esta capacidad de transporte interno se manifiesta en las especies vegetales plantadas usualmente en los humedales construidos de flujo subsuperficial (Arias, 2004). De esta forma, el oxígeno es transferido a los humedales artificiales principalmente por medio de los rizomas de las plantas y la diferencia de concentración entre el agua presente en el medio de soporte y el rizoma.

El nivel de oxígeno disuelto puede ser un indicador de cuán contaminada está el agua y de cuánto sustento puede dar esa agua a la vida animal y vegetal. Generalmente, un nivel más alto de oxígeno disuelto indica una mejor calidad de agua. Si los niveles son demasiado bajos, algunos peces y otros organismos no pueden sobrevivir (Torres, 2009). Según Sardiñas et al., (2006) las aguas con concentraciones de oxígeno disuelto por encima de 4,1 mg/L son consideradas de buena calidad. Sobre esa base Roldán (2003) señala que el valor de OD en un cuerpo de agua depende de algunos factores ambientales como: temperatura, presión atmosférica, salinidad y materia orgánica disuelta.

2.6.5 Temperatura

Este parámetro es importante en el tratamiento de aguas residuales ya que muchos procesos

biológicos dependen de la temperatura.

Asimismo, es determinante para el desarrollo de la actividad bacteriana, cuyo rango óptimo se encuentra entre 25 °C a 35 °C. Cuando la temperatura se acerca a los 50 °C los procesos de digestión aerobia y nitrificación bacteriana se detienen; por otro lado, cuando la temperatura es menor a 5 °C la actividad microbiana se inhibe (Delgadillo, Camancho, Perez, & Andrade, 2010).

2.6.6 Remoción de materia orgánica

Los procesos que conducen a la remoción de la materia orgánica son de dos tipos: físicos y biológicos, ambos estrechamente inter-relacionados.

Los procesos físicos conducen a la separación de los sólidos suspendidos, por floculación y sedimentación de estas partículas.

Por otra parte, en los procesos biológicos intervienen organismos vivos e influyen de manera drástica factores como la disponibilidad de oxígeno, el pH del medio y la temperatura. En estos procesos pueden ocurrir reacciones de oxidación/reducción, hidrólisis y fotólisis, que conducen a la biodegradación de la materia orgánica (Fernández, Beascochea, Muñoz, & Curt, 2001).

2.6.7 Demanda química de oxígeno (DQO)

La DQO es una medida aproximada del contenido de materia biodegradable y no biodegradable de una muestra de agua. En las pruebas de DQO se acelera artificialmente la biodegradación que realizarán los microorganismos, mediante un proceso de oxidación forzada, utilizando oxidantes químicos y métodos estandarizados, que tienen por objeto garantizar la reproducibilidad y comparabilidad de las mediciones (APHA, 1992).

La DQO se utiliza para medir el grado de contaminación y se expresa en [mg/L]. Cuanto mayor es la DQO, más contaminante es la muestra.

3 METODOLOGÍA

A continuación, se describe la metodología y consideraciones utilizadas para la toma de datos en terreno. Se realizaron mediciones de Oxígeno Disuelto (OD) en distintos puntos del flujo del humedal, además se midió la altura de las plantas más representativas, 16 calas y 6 espadañas.

Al inicio del estudio ya se contaba con las espadañas plantadas en el humedal, estas se encontraban recién podadas a una altura promedio de 45cm y mayoritariamente secas.

En cuanto a las calas, estas fueron plantadas de distintos tamaños al comienzo del estudio.

Las mediciones se realizaron durante un período de 6 meses, con un promedio de 1 medición por semana.

3.1 Sistema de toma de datos

3.1.1 Zonificación y ubicación de dispositivos para medición

Previo a comenzar las mediciones se zonificó el humedal transversal y longitudinalmente de tal manera de ubicar los puntos relevantes para el muestreo. Las dimensiones y detalle de la zonificación se muestran en la Figura 9. Para determinar esta zonificación, se discriminó por la densificación y disposición de la vegetación en el humedal.

Para realizar las mediciones en terreno se insertaron 8 dispositivos de medición. La distribución de estos se decidió en terreno según la disposición de la vegetación en el humedal, tratando de no intervenir las plantas, y en puntos clave; al inicio del humedal, antes de que el agua residual fluya hacia las plantas; en medio del humedal, luego de que el agua fluyó por la zona más densamente poblada de plantas; y por último en la zona final del humedal. La distribución de los dispositivos de medición se muestra en la Figura 9.

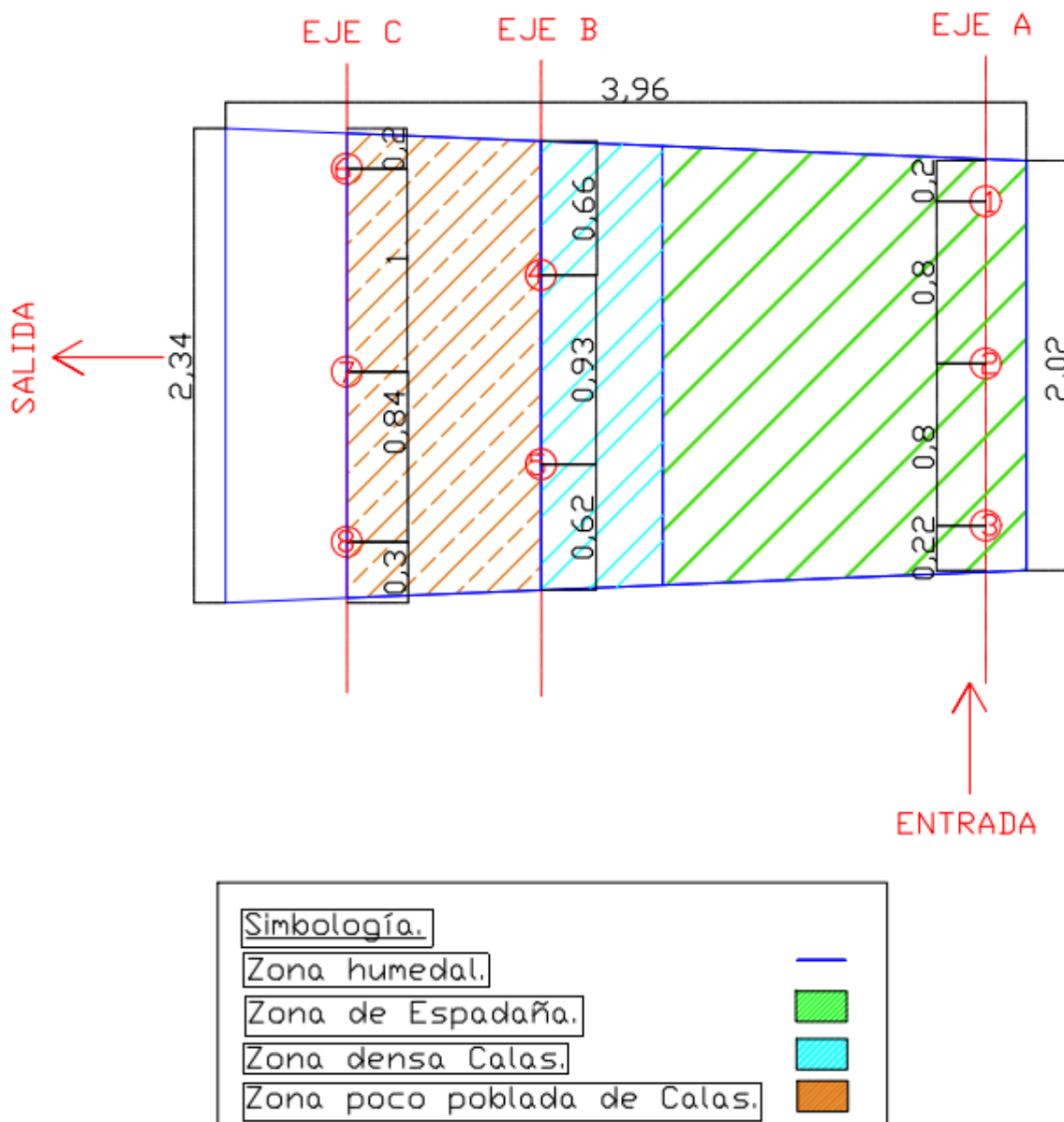


Figura 9. Esquema de zonificación y asignación de puntos de medición (vista en planta).

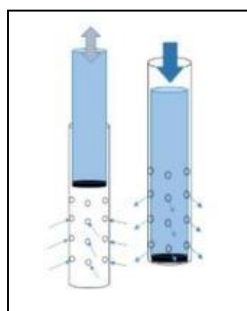
3.1.2 Diseño de dispositivo para medición

Ha sido necesario tomar algunas consideraciones de diseño previas, con respecto al dispositivo mediante el cual se realizarán las mediciones de OD in situ.

El tubo de PVC quedará inserto de forma permanente en el medio granular, para evitar cambios en el diseño geométrico inicial, ahorro de tiempo y mano de obra para insertar y retirar los tubos.

Para evitar tomar muestras de agua estancada o no representativa producto de que el tubo está fijo, se ideó un dispositivo que permite la circulación de agua al interior de éste, de manera tal que al momento de tomar las mediciones, la muestra corresponde realmente a la que transita por el medio filtrante (D'Appollonio, 2015).

Se utilizarán 2 tubos de PVC hidráulico de 1[m] de longitud para cada dispositivo. Primero se tiene el tubo exterior de PVC de 40 mm, el que va previamente perforado para permitir la entrada y salida de agua, luego el tubo interior de PVC hidráulico de 32 mm irá inserto dentro de éste, pero de forma móvil, tapado herméticamente en la parte inferior para evitar que ingrese agua o algún contaminante que impida el proceso de medición, como se muestra en la figura 9(b). De esta manera, al retirar el tubo interno, el agua se desplaza para ocupar el espacio antes ocupado por tubo, como se muestra en la figura 9(a).



(a)



(b)



(c)

Figura 10. (a) Diseño del flujo de agua del dispositivo de medición (Fuente: Dappollonio, 2015). (b) Tubos de PVC interno y externo (Fuente: Dappollonio, 2015). (c) Dispositivo inserto en humedal Bulnes (Fuente: Elaboración propia).

3.1.2.1 Proceso constructivo e instalación de tubos

- Cortar 16 tubos de 1 m de longitud, 8 tubos de diámetro 40 mm y 8 tubos de diámetro 32 mm.

- Perforar el tubo de 40 mm, con un espaciamiento de 3 cm entre una perforación y otra. Se perfora desde un extremo hasta llegar a 45 cm de longitud.
- Insertar tapón de goma dentro del tubo de 32 [mm].

Los tubos fueron introducidos 30 [cm] bajo la superficie, todos con igual profundidad como se muestra en la figura 10.

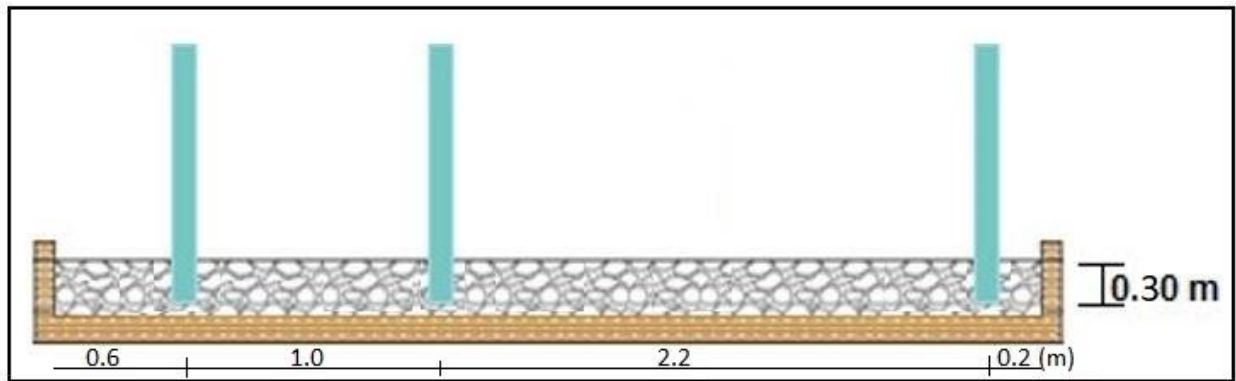


Figura 11. Perfil Transversal tubos en terreno.

3.2 Equipo de medición de oxígeno disuelto

Se utilizó un medidor de oxígeno disuelto portátil HANNA HI 98193, el cual es un microprocesador robusto, portátil e impermeable, diseñado para aplicaciones demandantes y pantalla gráfica de LCD para fácil lectura en exteriores con luz solar y áreas con baja luz gracias a que posee retroiluminación.

Para mediciones de oxígeno disuelto (OD), viene con una sonda polarográfica. El sistema exhibe la temperatura en °C y en °F y OD en [mg/L] y en porcentaje de saturación.

La característica de registro a demanda del HI98193 1 permite al usuario almacenar hasta 400 lecturas. Esta información puede ser transferida al PC con el cable USB HI920015 y el Software HI92000.



Figura 12. Medidor de oxígeno disuelto HANNA HI98193.

-Operación de la sonda

Procedimiento de medición:

1. Insertar la sonda en la muestra que se medirá.
2. Revolver o mover continuamente la sonda a través de la muestra.
3. Permita que las lecturas de temperatura y oxígeno disuelto se estabilicen (una vez que el reloj de arena que aparece en pantalla desaparezca).
4. Observe/Registre las lecturas (para almacenar dato registrado presionar “log”).
5. Si es posible, enjuague la sonda con agua limpia después de cada uso.

La medición se realizó en los 8 puntos para la obtención de datos y fue realizada en base al manual del equipo (HI98193).



Figura 13. Medición de Oxígeno Disuelto in situ.

3.3 Medición Altura de las plantas

La medición de altura de las plantas se llevó a cabo usando una huincha de medir común.

Las plantas medidas fueron 18 Calas (*Zantedeschia aethiopica*), que corresponden al total de calas en el humedal; y 6 Espadañas (*Typha* spp), que corresponden a las más representativas según su ubicación en el humedal.



Figura 14. Medición de Altura de las plantas.

3.4 Volumen de agua contenido en el humedal

Se midió la altura de agua del humedal en dispositivo instalado en humedal, que consistía, básicamente en un tubo vertical en el que se introducía una tabla recta hasta el fondo y luego medía la distancia mojada de esta, utilizando una huincha de medir convencional.

$$A_h = l \times a \quad \text{Ec 1.}$$

Donde:

A_h : área del humedal
 l : largo del humedal
 a : ancho del humedal

$$V_{m\acute{a}x} = A_h \times \bar{h} \times n \quad \text{Ec 2.}$$

Donde:

\bar{h} : altura promedio del humedal
 n : porosidad de la grava

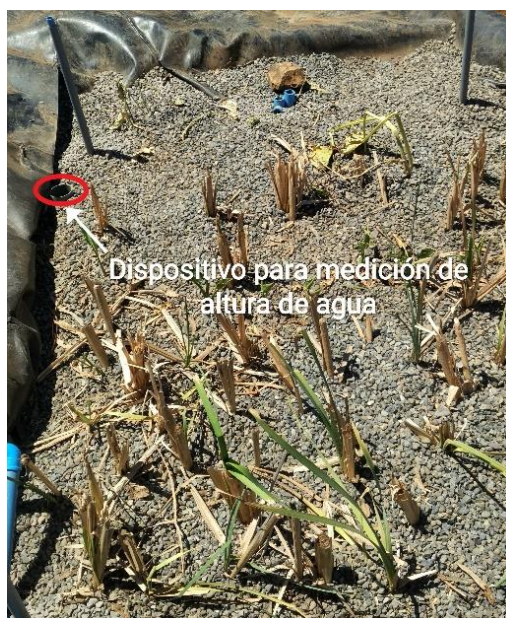


Figura 15. Ubicación del dispositivo para medición de altura de agua. (flujo de abajo hacia arriba de la imagen).

Relación de caudales del humedal:

$$\frac{dV}{dt} = Q_e - Q_s$$

Como $V = A \times h$, se tiene:

$$A \times \frac{dh}{dt} = Q_e - Q_s$$

$$A \times \frac{dh'}{dt} = Q_e - Q_s$$

donde $h' = 54 - h$, 54cm corresponde a la altura máxima de diseño.

Entonces:

Cuando

$$\frac{dh'}{dt} > 0 \rightarrow Q_s = 0$$

Y cuando

$$\frac{dh'}{dt} = 0 \text{ y } Q_e > 0 \rightarrow Q_s = Q_e$$

3.5 Caudal de agua residual entrante

Se registraron los días en que hubo personas habitando el domicilio de veraneo, muy regularmente eran dos las personas que utilizaban las instalaciones, con un promedio de aporte de agua residual de 150 L/persona*día, estimado según el tiempo que duraba el estanque de agua potable de 1000L del que se disponía, que debía recargarse cada 3 a 4 días de uso continuo.

3.6 Pluviosidad

Se utilizaron datos de precipitaciones diarias (mm) caídas durante el período de estudio, los datos fueron obtenidos por la estación meteorológica más cercana, que corresponde a Estación Dichato 08210002. Esta información fue entregada por el Departamento de Hidrología, Subdepto. de Meteorología y Nieve, de la Dirección General de Aguas (DGA), a través del canal de Solicitud de Información Ley Transparencia, conforme a Ley N°20.285 sobre transparencia y acceso a la información pública.

4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Vegetación

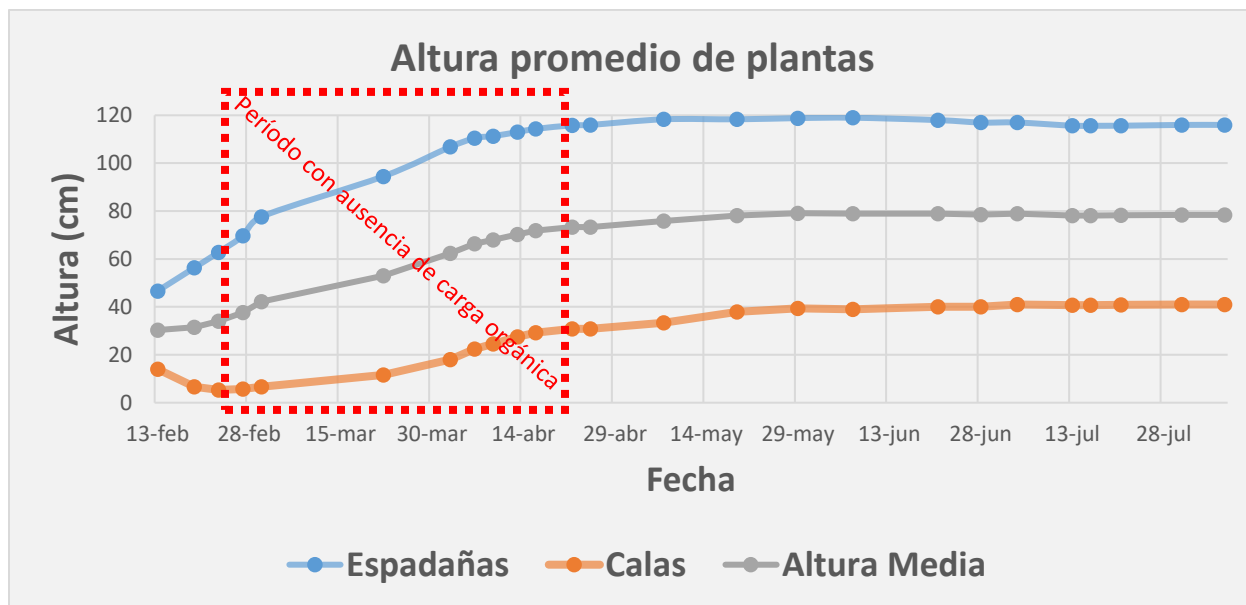


Figura 16. Altura promedio de plantas durante período de seguimiento.

Se observa un crecimiento de las espadañas de más de 60 cm las primeras 10 semanas, para luego crecer sólo 10 cm el mes siguiente, llegando a su altura máxima a fines de mayo y manteniéndola pareja con el correr de los siguientes 3 meses.

En cuanto a las calas, estas presentaron un crecimiento sostenido los primeros 3 meses, llegando a su máximo desarrollo foliar pasado este período, a fines de mayo, al igual que las espadañas. Luego mantuvieron su altura durante los siguientes 3 meses.

Se aprecia un comportamiento de crecimiento similar entre espadañas y calas durante todo el período de estudio. Sorprendentemente, la curva de crecimiento con mayor pendiente se da en el período donde hubo nulo aporte de aguas residuales y bajas precipitaciones, indicado con recuadro rojo.

Las espadañas se desarrollaron normalmente, creciendo y brotando hojas verdes hasta mediados de mayo, cuando empieza progresivamente a secarse debido a su carácter estacional (estudiar otros

humedales de la zona).

Las calas, luego de plantadas en distintos tamaños, se secaron y se cayeron a piso, para rápidamente recomponerse y empezar a crecer con brotes nuevos, como se aprecia en el primer tramo de la curva de crecimiento y en las imágenes a continuación.



Figura 17 (a) y (b).
Calas de distintos
tamaños recién plantadas

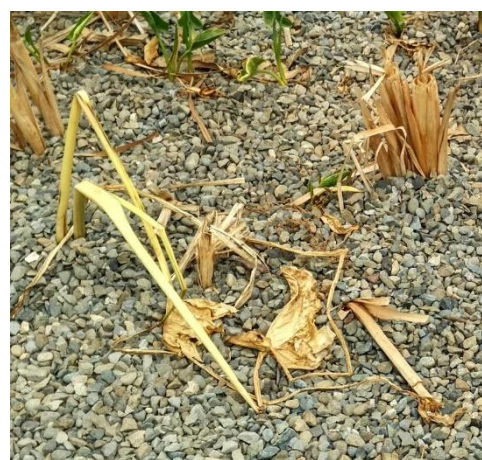


Figura 18 (a) y (b) Calas de distintos
tamaños 7 días después de
plantadas.

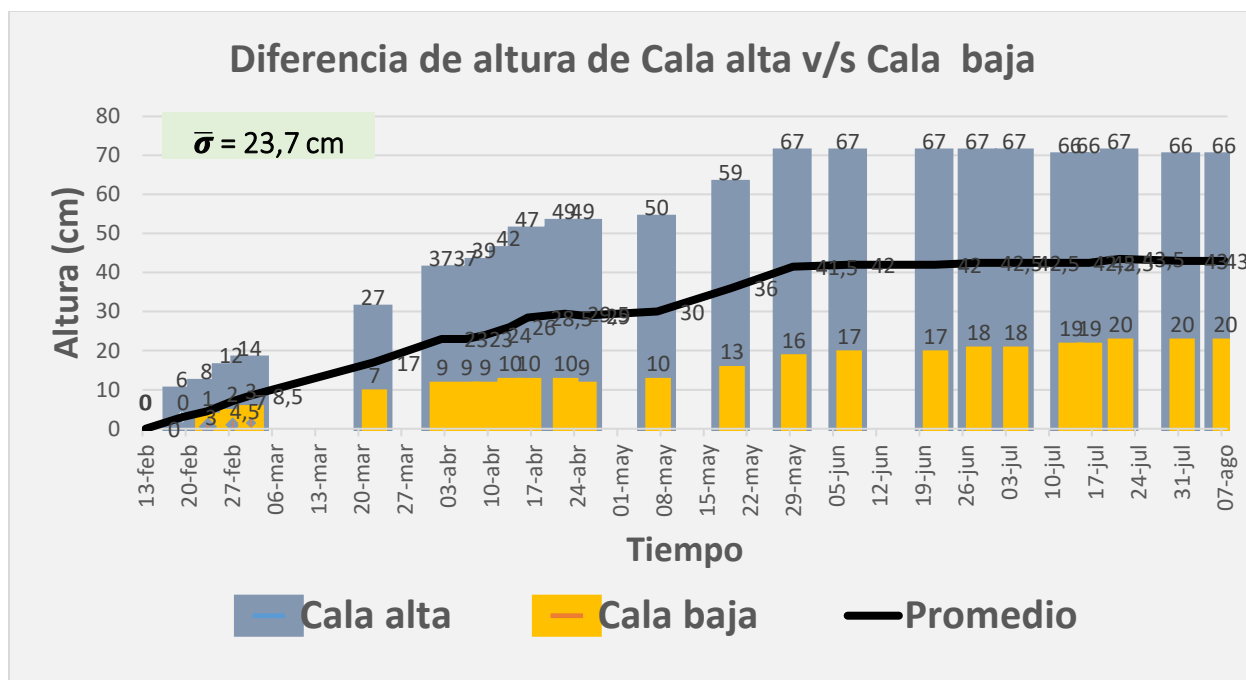


Figura 19. Diferencia de altura Cala alta v/s Cala baja.

Para contrastar la diferencia de altura de las calas se tomaron dos ejemplares representativos, una de las calas más grandes y altas, y otra de las más bajas y pequeñas.



Figura 20(a). Cala Alta, 62cm.



Figura 20(b). Cala pequeña, 15cm.

Se observa un cultivo de calas con alturas promedio de 40 cm, pero con una desviación estándar

final muy cercana a los 20cm, lo que indica una gran dispersión en la altura de las plantas. La dispersión se observa muy claramente a nivel longitudinal, siendo las calas más cercanas a la entrada del humedal las que presentan mayor altura, mientras que las más cercanas a la salida de este son las más pequeñas.

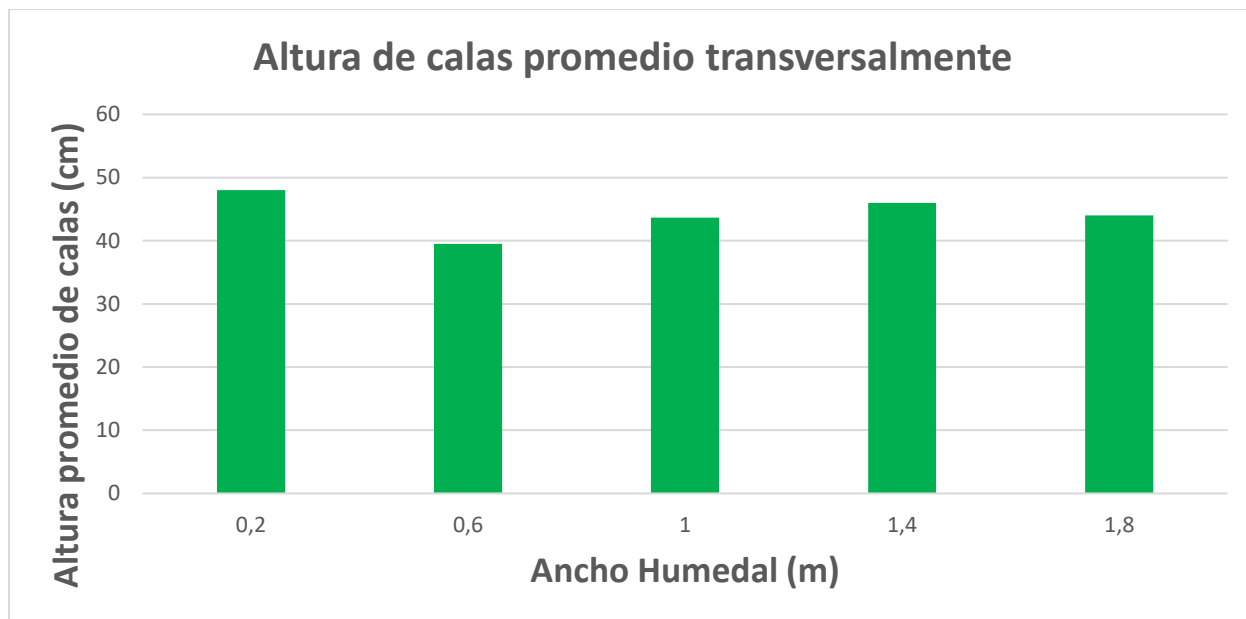


Figura 21. Altura de Calas a lo largo del humedal

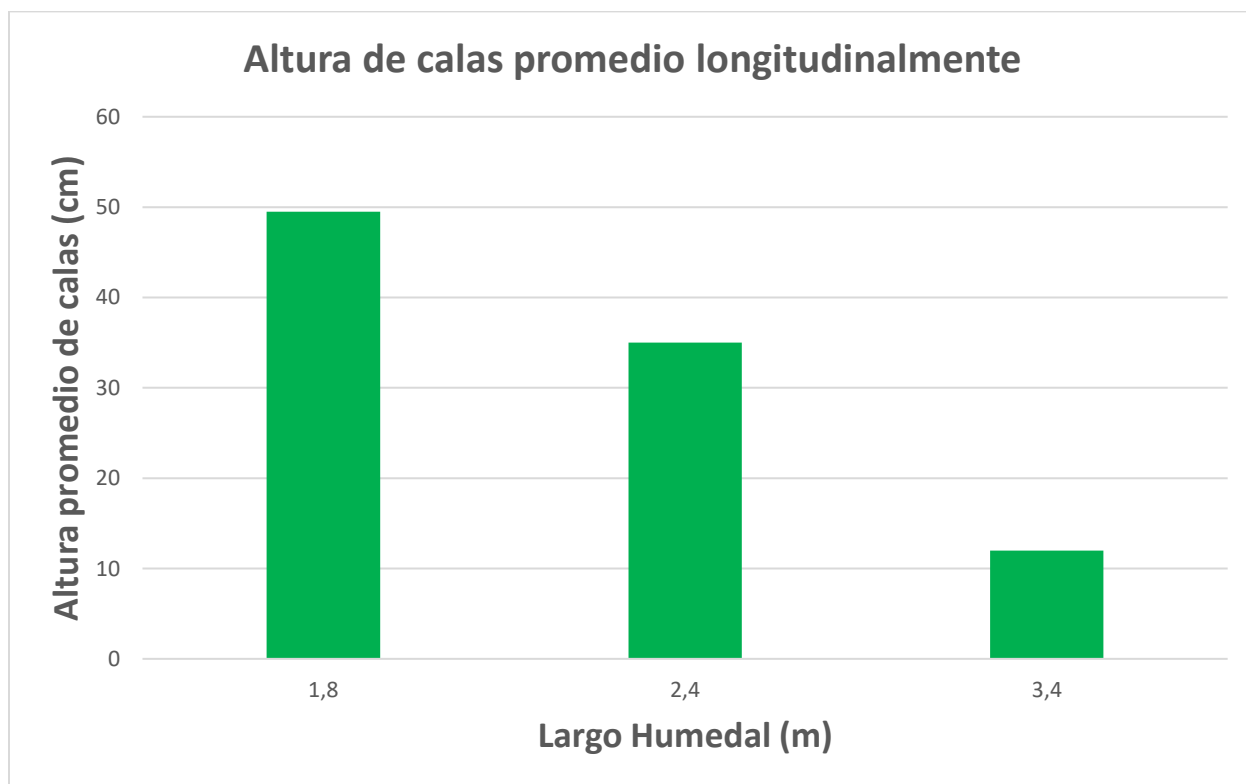


Figura 22. Altura de Calas transversalmente.



Figura 23. Diferencia visual de altura y área foliar de calas longitudinalmente. (Flujo humedal de derecha a izquierda)

Se observa claramente un crecimiento descendente de las plantas a medida que se avanza longitudinalmente de la entrada hacia la salida del humedal. Esto se atribuye a que en las primeras zonas (más cerca de la entrada) hay una mayor cantidad de carga orgánica y nutrientes, existiendo una correlación entre la cantidad de carga orgánica y el crecimiento de las plantas en una zona determinada. Mientras más carga orgánica, se muestra claramente una mayor altura.

En cuanto al crecimiento transversal, este se muestra parejo, lo que indica que no existen problemas de cortocircuitos en el humedal y este funciona correctamente ya que la carga orgánica no se va a ninguno de los dos extremos, en otras palabras, no hay presencia de flujos preferenciales.

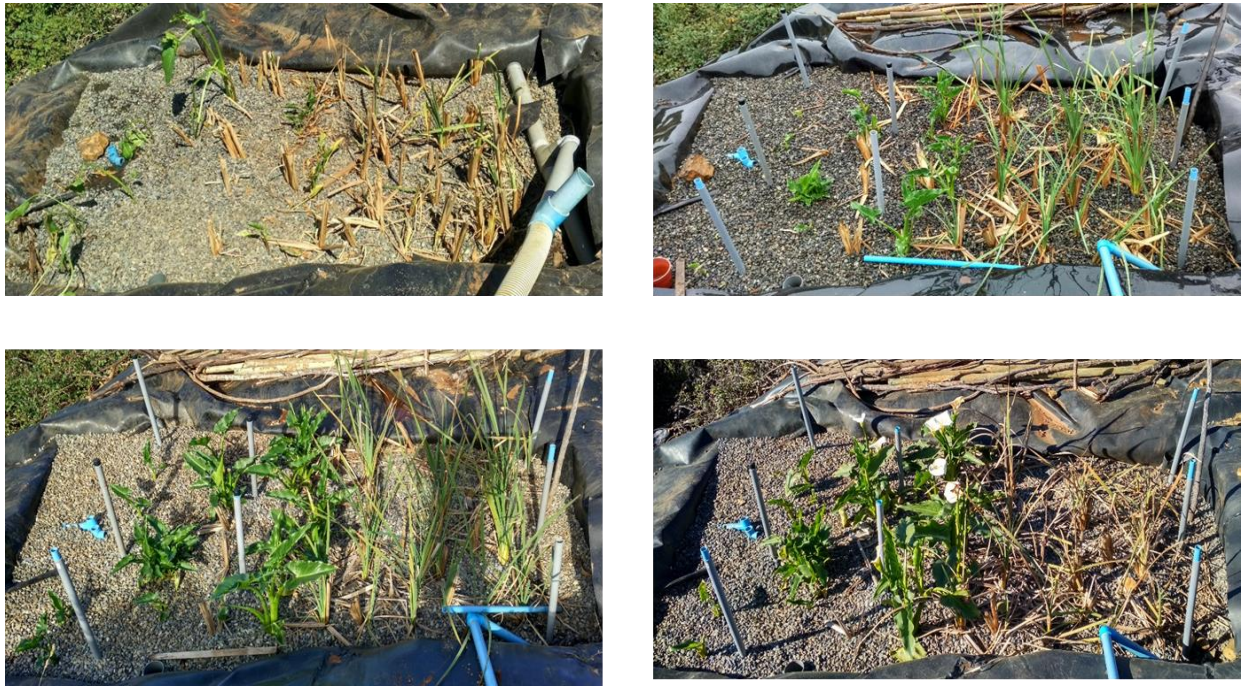


Figura 24. Dinámica visual de crecimiento de las plantas en el humedal. (De izquierda a derecha: 13 de feb, 09 de abr, 19 de may, 31 de jul).

4.2 Oxígeno Disuelto

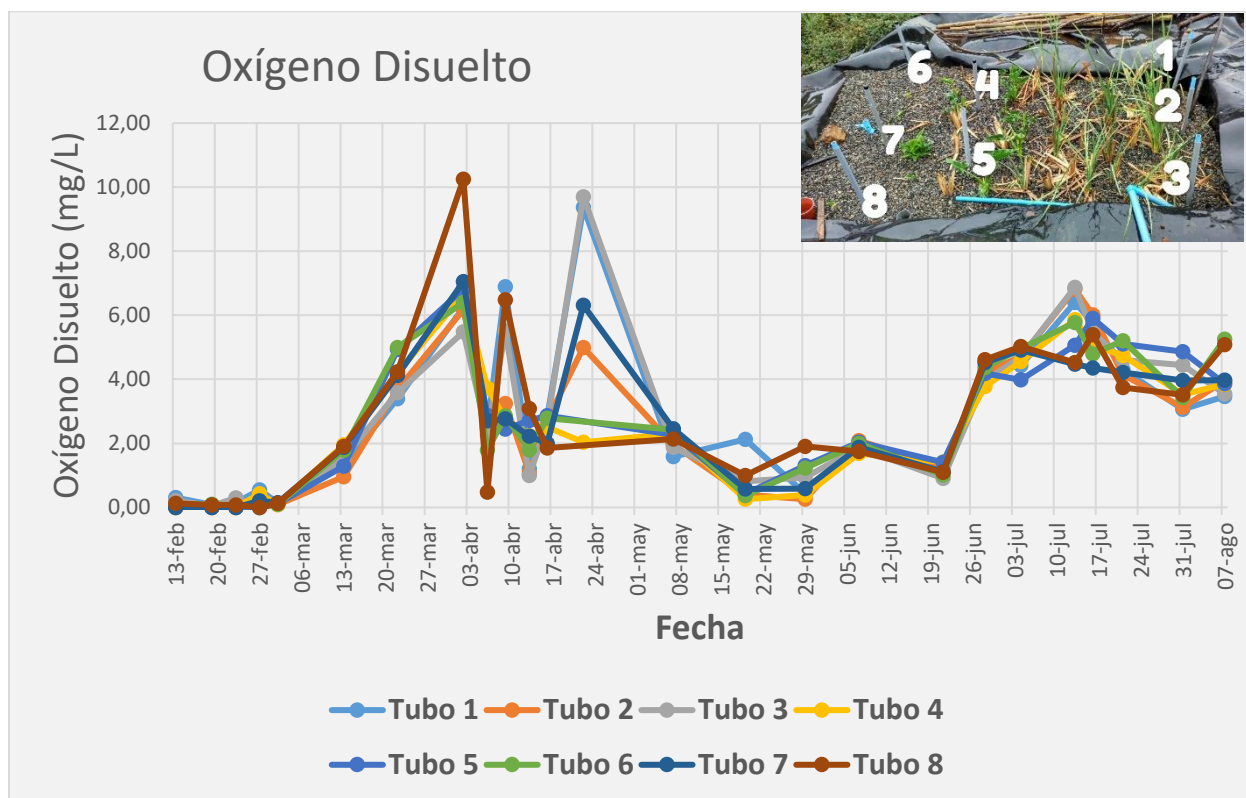


Figura 25. Comportamiento del OD en cada tubo de medición en función del tiempo de muestreo.

Independiente del lugar de medición, hay una coincidencia en los valores de OD en cada momento de medición, esto indica que humedal actúa como un todo, teniendo un comportamiento tendencial similar, con valores de oxígeno semejantes entre una zona y otra.

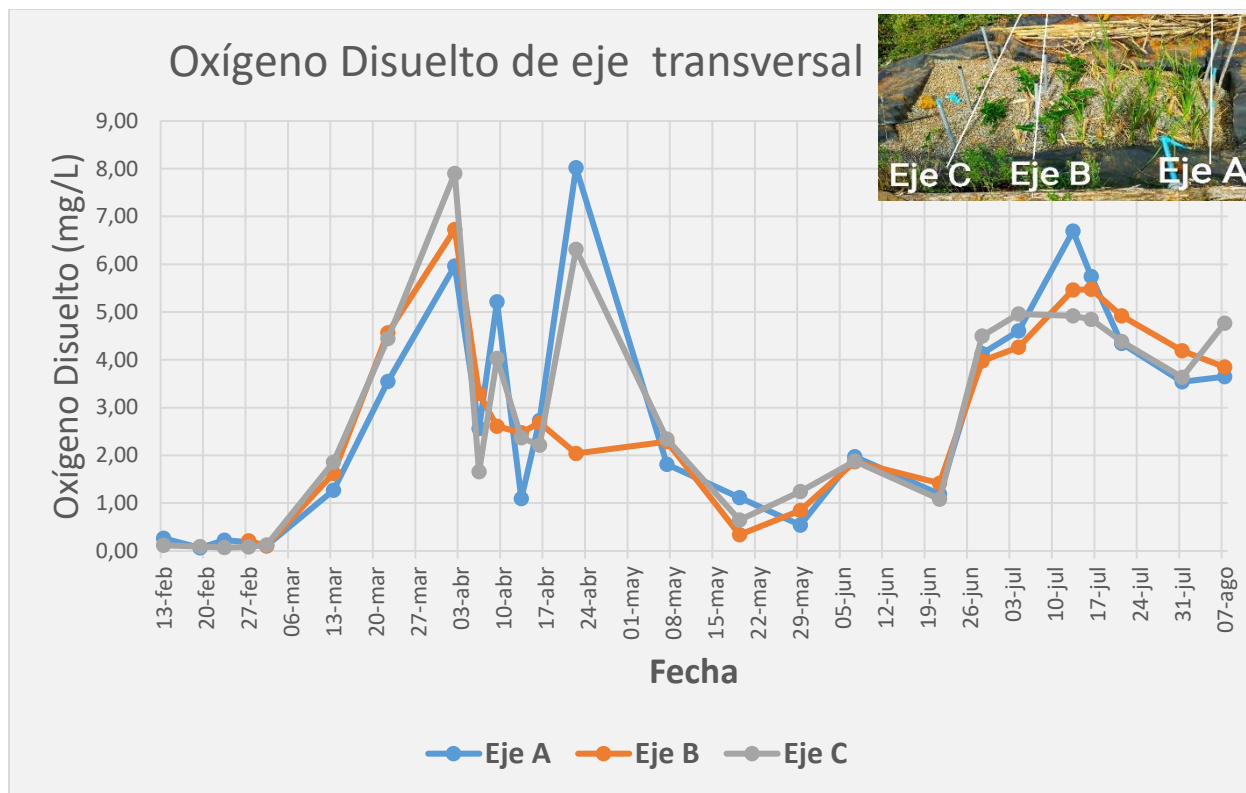


Figura 26. Oxígeno disuelto promedio de cada eje durante el tiempo de muestreo.

Se puede apreciar en términos generales que en los distintos ejes de medición del humedal se garantizó, durante todo el tiempo de estudio, una concentración de OD adecuada para el metabolismo microbiano en cada una de las distintas zonas de medición del sistema.

Se realizó un ANOVA (ANalysis Of VAriance) para determinar si los diferentes ejes de medición muestran diferencias significativas o por el contrario puede suponerse que sus medias no difieren, los resultados se muestran a continuación:

RESUMEN:

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Eje A	18	52,07	2,89	6,82
Eje B	16	45,57	2,85	4,54
Eje C	18	44,09	2,45	5,28

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	2,12	2,00	1,06	0,19	0,83	3,19
Dentro de los grupos	273,72	49,00	5,59			
Total	275,83	51,00				

Como el valor de F es menor que el valor crítico de F, se acepta la hipótesis nula, las medias de cada uno de los ejes de medición son iguales. La variable eje no crea un efecto significativo en la variable dependiente (OD).

4.3 Pluviosidad y altura de agua

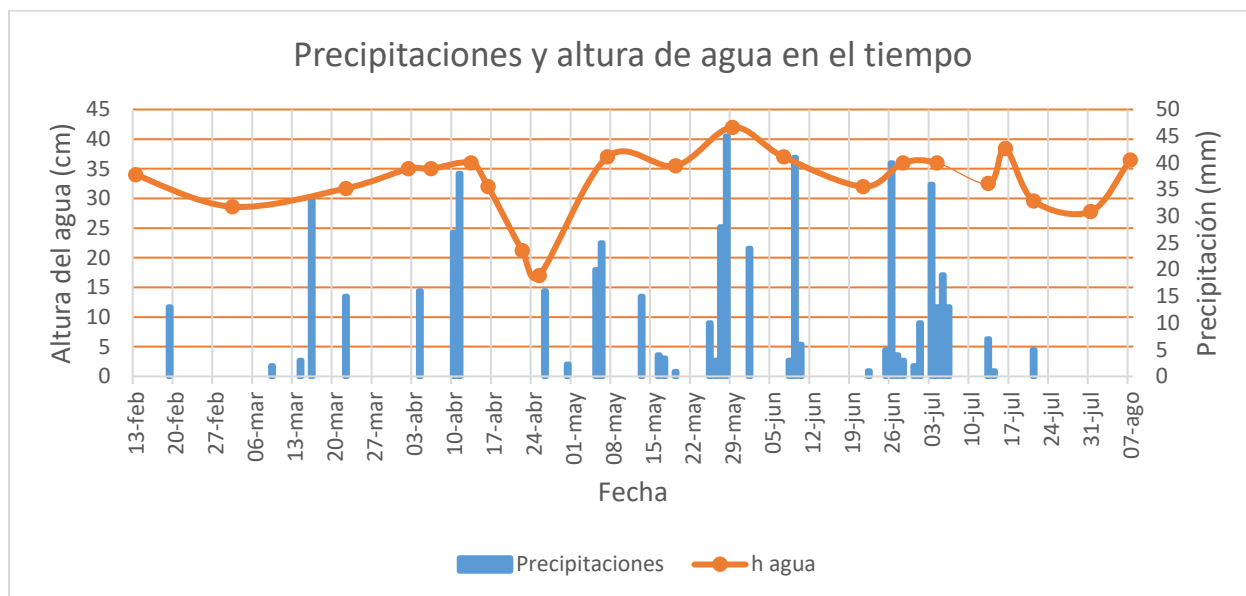


Figura 27. Relación de precipitaciones y altura de agua del humedal.

Se observa que, con cada precipitación ocurrida, aumenta el nivel de agua del humedal, esto es lógico. En la gráfica se nota lo anterior, existe un aumento de la altura de agua del humedal después de cada precipitación diaria (registros otorgados por la Estación Meteorológica Dichato). La última lluvia previa a este período fue de 11mm el 3 de enero, 6 semanas antes del primer día de medición, es decir, ocurrió el más largo período de sequía en cuanto a precipitaciones del año, a pesar de esto, en febrero no se encuentran los niveles más bajos de agua en el humedal, ya que el domicilio de veraneo fue utilizado periódicamente durante el mes de enero y febrero, aportando constantemente un caudal de agua residual al afluente. El nivel de mayor sequía del humedal se dio el 25 de abril, luego de 15 días sin aporte de lluvias y con un mínimo aporte de agua residual del domicilio. (ver figura siguiente).

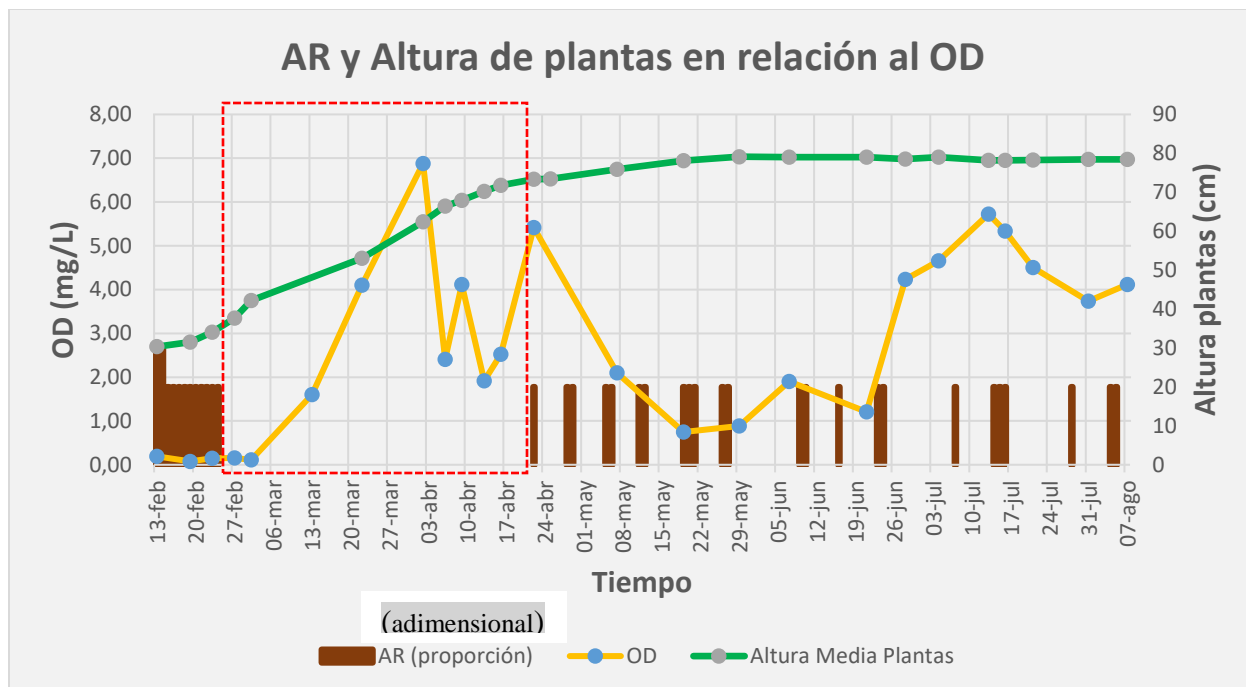


Figura 28. Agua Residual y altura de plantas promedio en relación al oxígeno disuelto, en el tiempo.

En esta gráfica se aprecia que los niveles más bajos de OD se tienen en las primeras semanas, coincidiendo con constantes aportes de agua residual al humedal y con las primeras semanas de trasplantadas las calas. Durante el período de nulo aporte de AR (encerrado en rojo) se ven irregulares pero altos niveles de OD, coincidiendo con el rápido crecimiento de las plantas debido a su alimentación autótrofa. Luego se ve que bajan los niveles de OD cuando vuelve a existir aporte de aguas con carga orgánica, para luego, desde fines de junio hasta el término del estudio, estabilizarse independientemente del uso del humedal, esto coincide con la consolidación de las plantas en cuanto a su altura y follaje.

4.4 Caudales entrantes y Volumen de agua.

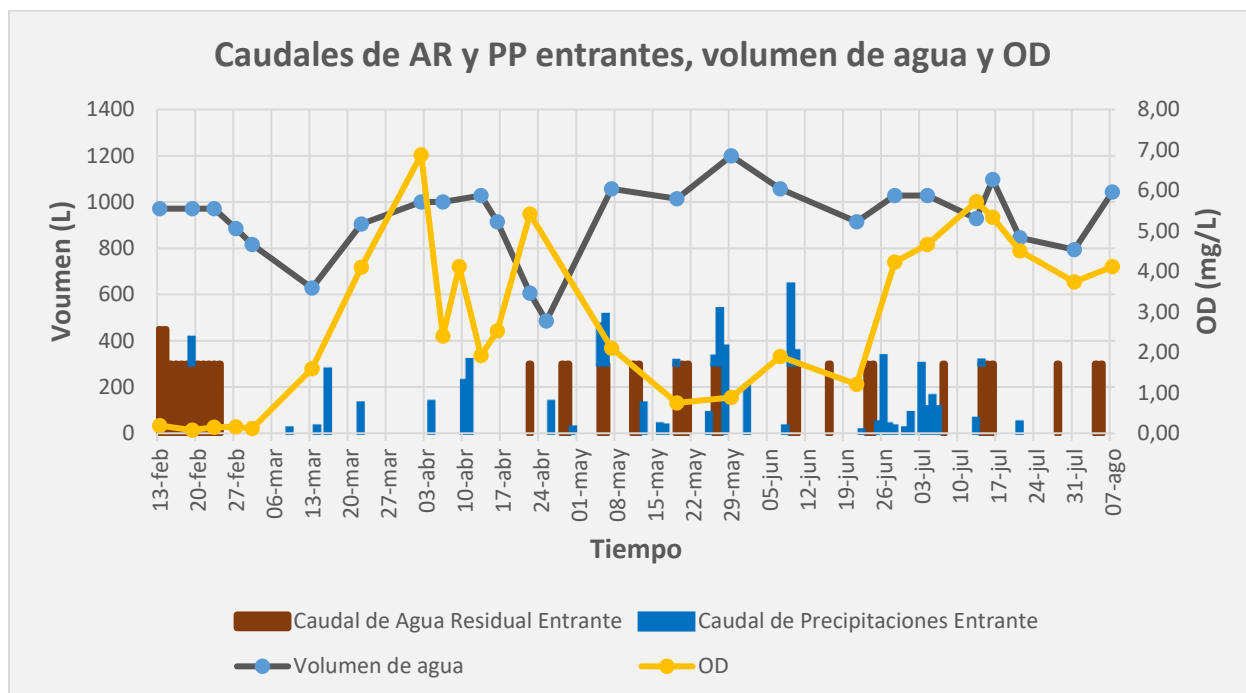


Figura 29. Caudales de AR y PP, volumen de agua y OD.

Este gráfico indica los caudales entrantes de agua residual (barra café) y precipitaciones (barra azul) y los relaciona con el volumen de agua existente en el humedal (línea gris) en el tiempo. La suma de los caudales de agua residual más precipitaciones se muestra en forma de columna apilada, así se observa la relación directa que existe entre los caudales de entrada y el volumen de agua del humedal. El volumen de agua más crítico se encuentra el 25 de abril, luego de un aporte de sólo 300 L en 15 días. Mientras que los niveles más altos de agua se encuentran justo después de ocurridas las precipitaciones más intensas combinado con el aporte de AR por el uso del domicilio.

La línea amarilla corresponde al oxígeno disuelto promedio del humedal. Se observan las concentraciones de OD más bajas y sostenidas el mes de febrero, cuando hay una constante aporte de AR debido a la actividad continua de personas veraneando en el domicilio, lo que genera un aumento del metabolismo de la población microbiana encargada de degradar la materia orgánica del AR, causando el agotamiento del oxígeno disuelto en la columna de agua (Gerardi, 2002). También al aumentar la temperatura, debido al verano, habrá mayor tasa de degradación como consecuencia de un incremento de la actividad microbiológica, reduciendo la cantidad de OD disponible (Lansing, 1994 y Montalvo, 2000).

5 CONCLUSIONES

- Las calas presentan un crecimiento parejo a nivel transversal, indicando que reciben agua residual con similares características de carga orgánica y nutrientes, lo que muestra un adecuado funcionamiento del flujo del humedal, sin problemas de cortocircuitos y sin flujos preferenciales.
- A nivel longitudinal se aprecia un crecimiento descendente de las calas a medida que se avanza desde la entrada hacia la salida del humedal, con una desviación estándar final de 18cm. Esto se debe a que en las zonas más cercanas a la entrada el agua residual viene con mayores concentraciones de carga orgánica y nutrientes.
- Independiente de la zona de medición, se observan valores similares de OD para cada momento.
- El fortalecimiento de la vegetación garantiza una concentración de oxígeno disuelto por sobre 1 mg/L.
- Efecto estacional favoreció el crecimiento de las calas por sobre las espadañas.
- Es factible el uso de humedales para domicilios de veraneo en zonas con clima similar, plantas se nutren de forma autótrofa, siendo notablemente resilientes ante condiciones adversas.

6 REFERENCIAS

- Borrero, J. A. (1999). *Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales*. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Brix, H. (1994). Use of constructed wetlands in water pollution control: Historical development, present status, and future perspectives. *Water Science and Technology*, 209-223.
- Calvo, M. S. (2005). *Depuración de las aguas residuales por tecnologías ecológicas y de bajo costo*. Madrid: Edicions Mundi-Prensa.
- Cisterna, P. (2004). *Ingeniería y tratamiento de aguas residuales*.
- Colombo, L. (2015). *Proceso constructivo de un humedal de flujo sub superficial para tratar aguas del centro recreativo Ainahue*. Universidad del Bío Bío., Concepción.
- Cortes, F. A. (1995). Geomorfología de la ribera norte del río Bío Bío en su curso inferior. Limitaciones y potencialidades del área. *Revista de Geografía Norte Grande*. (22), 27-33.
- Crites, G. T. (2000). *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. Colombia: McGraw-Hill.
- Dominguez, N. (2012). *Caracterización de las actividades bacterianas presentes en el humedal artificial 1 de la UAM Iztapalapa*. Mexico D.F.
- Fenoglio, F. (2001). Construcción y evaluación de electrodos de medición de potencial oxidoreducción, para la evaluación indirecta de las condiciones de aerobiosis en sistemas que simulan humedales artificiales. *Tecnología y ciencia*, 61-68.
- Fernández, J. (2000). *Manual de Fitodepuración. Filtros de macrófitas en flotación*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Fuentes, I. (2013). *Análisis del rendimiento en remoción de dos humedales con distintas soluciones hidrodinámicas*. Concepción.
- Kadlec, R. H. (1999). Chemical, physical and biological cycles in treatment wetlands. *Water science and technology*, 37-44.
- Kivaisi, A. (2001). The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: a review. *El Sevier*, 545-560.
- Levenspiel, O. (1986). *El omnilibro de los reactores químicos*. Barcelona: Revertè.

- Llanos, M. (2013). • *Incidencia de la demanda química de oxígeno (DQO) del afluente en la eficiencia de humedales de flujo subsuperficial con soluciones hidrodinámicas distintas*. Concepción: Universidad del Bío Bío.
- Lopez, D. (2016). *Evaluación estacional de humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial para la depuración de aguas servidas en zonas rurales: implicancias en la generación de metano* (tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias Ambientales con Mención en Sistemas Acuáticos Continentales). Dirección de Postgrado, Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad de Concepción, Centro EULA-Chile.
- Mena, J. (s.f.). *Depuración de aguas residuales con humedales artificiales: Ventajas de los sistemas híbridos*. Universidad de Castilla La-Mancha: ALQUIMIA SOLUCIONES AMBIENTALES.
- Píriz, A. (2000). *Condiciones de óxido-reducción en humedales construidos de flujo subsuperficial*. Barcelona: Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental (EHMA), Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona (ETSECCPB). Universitat Politècnica de Catalunya.
- Ramalho, R. (1996). *Tratamiento de aguas residuales*. Reverte.
- Suárez, A., Agudelo, N., Rincón, J., & Millán, N. (2014, septiembre 15). Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales domésticas. *Revista Mutis*, 4(1), 8-14. <https://doi.org/10.21789/22561498.905>
- Tchobanoglous, G., & Crites, R. (2000). *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. Colombia: Mc Graw Hill.
- Tyroller, L. (03 de Julio de 2008). *Method for the determination of oxygen transfer in a subsurface flow constructed wetland*. Obtenido de Portal del coneixement obert de la UPC: <http://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/6045>
- Vidal, G. & Hormazábal, S. (2018). *Humedales Construidos. Diseño y Operación*. Facultad de Ciencias Ambientales y Centro EULA-Chile, Universidad de Concepción.

ANEXOS

SEGUIMIENTO FOTOGRÁFICO DE LA FLORA DEL HUMEDAL ARTIFICIAL DOMICILIAR DE COLIUMO.



Figura A1. Humedal Coliumo, 1ª Semana de Estudio. 06 de feb.



Figura A2. Humedal Coliumo, 2ª Semana de Estudio. 13 de feb.



Figura A3. Humedal Coliumo, 3ª Semana de Estudio. 23 de feb.



Figura A4. Humedal Coliumo, 4ª Semana de Estudio. 02 de mar.



Figura A5. Humedal Coliumo, 9ª Semana de estudio. 06 de abr.



Figura A6. Humedal Coliumo, 11ª Semana de Estudio. 16 de abr.



Figura A7. Humedal Coliumo, 12ª Semana de estudio. 25 de abr.



Figura A8. Humedal Coliumo, 15ª Semana de estudio. 19 de may.



Figura A8. Humedal Coliumo, 24ª Semana. 13 de jul.



Figura A9. Humedal Coliumo, 28ª Semana de estudio. 07 de ago.



Figura A10. Humedal Coliumo, situación al momento de cerrar esta tesis. Octubre de 2018.