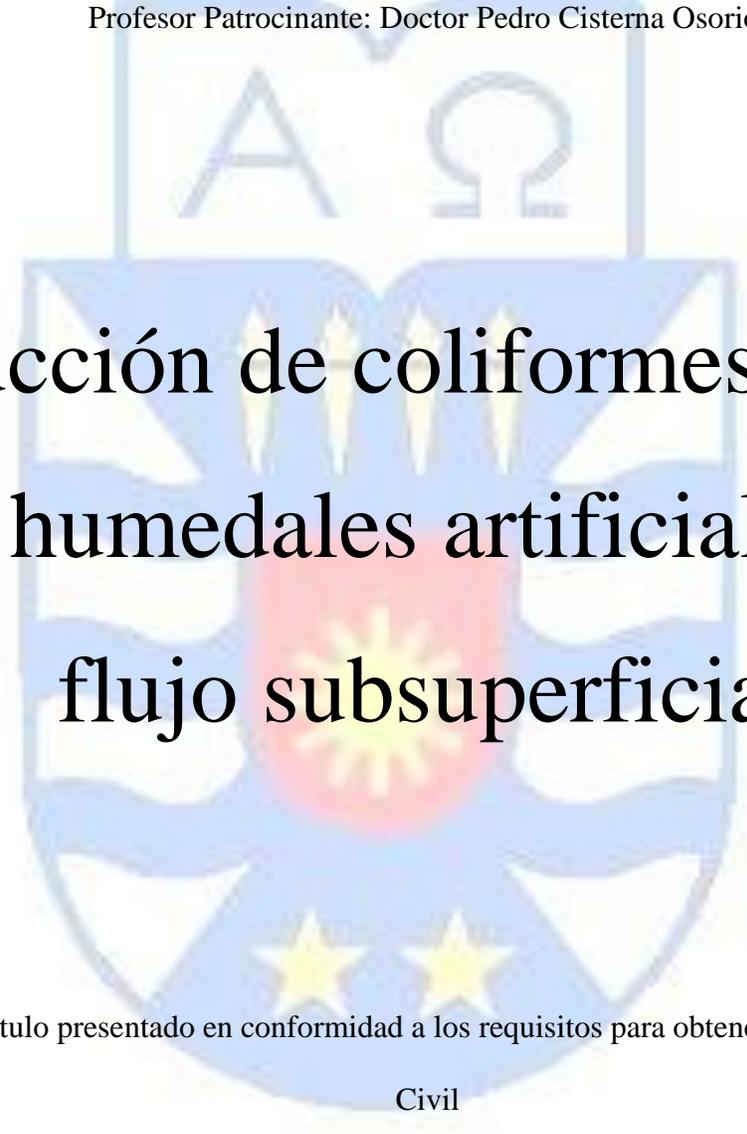


UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIRÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL

Profesor Patrocinante: Doctor Pedro Cisterna Osorio.



Reducción de coliformes fecales en humedales artificiales de flujo subsuperficial

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

Civil

PABLO ESTEBAN ARAYA VALDEBENITO

Concepción, 2017

INDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	3
1.1 Justificación	4
1.2 Objetivo general	5
1.3 Objetivos específicos	5
2. Marco teorico	6
2.1 Descripción de un Humedal Artificial.....	6
2.1.1 Tipos de humedales artificiales	7
2.1.1.1 Humedales de Flujo superficial o Flujo Libre (HFL).	7
2.1.1.2 Humedal de flujo sub superficial (HFS)	7
2.1.1.2.1 Humedal de flujo sub superficial vertical (HFSV)	7
2.1.1.2.2 Humedal de flujo sub superficial horizontal (HFSH).....	8
2.2 Componentes del humedal de flujo sub superficial.....	8
2.2.1 El agua	8
2.2.2 Microorganismos	8
2.2.3 Material Impermeabilizante.....	8
2.2.4 Las plantas	9
2.2.5 Material granular	10
2.2.6 Dispositivos de entrada y salida	10
2.2.6.1 Dispositivo de Entrada.	10
2.2.6.2 Dispositivo de salida.	10
2.3 Diseño y construcción de humedales artificiales.....	11
2.3.1 Calculo de área superficial.	11
2.3.2 Relación Largo – Ancho.....	12
2.3.3 Cálculo del ancho del humedal.....	13

2.3.4	Cálculo de largo humedal	13
2.4	Agua residual	15
2.4.1	Clasificación Respecto a su generación	15
2.4.2	Características del agua residual.....	16
2.4.2.1	Características físicas	16
2.4.2.1.1	Temperatura	16
2.4.2.1.2	Turbiedad y el color	16
2.4.2.1.3	Olor	17
2.4.2.2	Características químicas	17
2.4.2.2.1	PH	17
2.4.2.2.2	Nutrientes.....	17
2.4.2.2.3	Metales pesados	17
2.4.2.3	Características biológicas.....	17
2.4.3	El agua como vehículo de infección.....	18
2.5	Indicadores de contaminación fecal en el control de la calidad del agua.....	18
2.5.1	Coliformes Totales	18
2.5.2	Coliformes fecales	18
2.5.3	Escherichia coli.....	19
2.5.4	Factores que influyen en la eliminación de coliformes	20
2.5.4.1	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	20
2.5.4.2	Temperatura	21
2.5.4.3	Oxígeno disuelto	21
2.6	Tratamiento de aguas residuales.....	21
2.6.1	Fases de tratamiento de aguas residuales	21
2.6.1.1	Desinfección.....	22
2.6.1.1.1	Tecnologías convencionales de desinfección de aguas residuales	23

2.6.1.2	Tecnologías blandas de tratamiento de aguas residuales	23
2.6.1.2.1	Lagunas de maduración	23
2.6.1.2.2	Radiación solar	24
2.6.1.2.3	Humedales	24
3.	Metodología	25
3.1	Ubicación de los humedales estudiados	25
3.1.1	Ubicación Humedal Bulnes	25
3.4.3	<i>Ubicación Humedal Ainahue</i>	25
3.2	Caracterización de la Zona de estudio.....	26
3.2.1	Caracterización en Bulnes	26
3.6.3	<i>Caracterización Hualqui</i>	26
3.3	Descripciones de humedales estudiados.....	27
3.3.1	Descripción del Humedal de la aldea SOS, Bulnes.....	27
3.3.2	Descripción del Humedal Ainahue, Hualqui.....	28
3.4	Toma de muestras.....	30
3.4.1	Programación de la toma de muestras	30
3.4.2	Instrucciones para la recolección y transporte de muestra de agua.....	31
3.4.3	Toma de muestras en la Aldea SOS, Bulnes.	31
3.4.3.1	Afluente.....	31
3.4.3.2	Efluente	32
3.4.4	Toma de muestra del Humedal Ainahue, Hualqui.	33
3.4.4.1	Afluente.....	33
3.4.4.2	Efluente	33
3.4.4.3	Post Laguna.....	33
3.4.5	Materiales utilizados.....	34
3.4.5.1	Frasco	34

3.5	Calculo de Caudal.....	34
3.6	Calculo de TRH.....	35
3.7	Calculo de pluviosidad	35
4.	Análisis y resultados.....	35
4.1	Análisis de los CF con respecto a los Caudales.....	36
4.2	Análisis de concentración de CF con respecto al TRH en el efluente.....	37
4.3	Análisis de la concentración de CF y las precipitaciones según los días en donde se obtuvieron las muestras	39
	39
4.4	Comentarios y discusión de los resultados obtenidos	40
5.	Conclusiones	41
6.	Recomendaciones.....	41
7.	Bibliografía.....	41
8.	Anexos.....	Error! Bookmark not defined.

INDICE DE FIGURAS.

Figura 1	Humedal de flujo sub superficial vertical (fuente eawag)	7	
Figura 2	Humedal de flujo sub superficial horizontal (fuente eawag)	8	
Figura 3	Espadañas y Calas, humedal Bulnes. Figura 4	Espadañas humedal Hualqui.	10
Figura 5	Coliformes, Coliformes fecales y Escherichia Coli	20	
Figura 6	Esquema general del tratamiento de aguas servidas	22	
Figura 7.	Aplicación de un humedal para el tratamiento de aguas residuales.....	22	
Figura 8.	Laguna de maduración, humedal Ainahue, Hualqui.....	24	
Figura 9.	Ubicación aldea infantil SOS Bulnes.....	25	
Figura 10.	Ubicación del centro turístico Ainahue.....	26	
Figura 11.	Humedal aldea SOS, Bulnes.	27	
Figura 12.	Vista en planta humedal aldea SOS, Bulnes.	28	
Figura 13.	Corte longitudinal A-A de la figura 12.	28	

Figura 14. Humedal Ainahue, Hualqui.....	29
Figura 15. Vista en planta del humedal Ainahue (D`Appollonio, 2015).	29
Figura 16. Corte longitudinal A-A de la figura 15 (D`Appollonio, 2015).	29
Figura 17. Calendario de los viajes realizados.	30
Figura 18. Calendario de la toma de muestras.....	Error! Bookmark not defined.
Figura 19. Lugar de muestreo del Afluente y Efluente del humedal de Bulnes.....	32
Figura 20. Muestras del Afluente y Efluente en el humedal de Bulnes.	32
Figura 21. Muestras tomadas en ambos humedales.	33
Figura 22. Frasco facilitado por el laboratorio para la toma de muestras.	34

INDICE DE TABLAS

Tabla I Características de las especies vegetales más utilizadas en HA (Delgadillo, 2010).	9
Tabla II Cuadro de material constructivo (Delgadillo, 2010)	14
Tabla III Parámetros constructivos (Delgadillo, 2010),	14
Tabla IV Parámetros típicos de las aguas residuales de origen doméstico (Tchobanoglous, 1999)	16
Tabla V Bacterias Patógenas presente en las heces.....	20
Tabla VI Datos obtenidos del laboratorio y calculados.....	36

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 relación de los coliformes totales con la DBO. (Gallardo, 2013)	20
Gráfico 2 análisis de CF Y caudal humedal Bulnes.	36
Gráfico 3. Análisis de CF y caudal humedal Hualqui.	37
Gráfico 4. Relación de la concentración de CF y TRH en el efluente.	38
Gráfico 5. Relación eficiencia de los humedales con respecto al TRH.....	38
Gráfico 6. Concentración de CF en el efluente y la pluviosidad.....	39
Gráfico 7. Concentración de CF en el Afluente, Efluente y la eficiencia.	39

Reducción de coliformes en humedales artificiales de flujo subsuperficial.

Autor: Pablo Esteban Araya Valdebenito.

Departamento de ingeniería civil y ambiental, Universidad del Bío Bío.

Correo Electrónico: pearaya@alumnos.ubiobio.cl

Profesor Patrocinante: Doctor Pedro Cisterna Osorio

Departamento de ingeniería civil y ambiental, Universidad del Bío Bío.

Correo Electrónico: pcisterna@ubiobio.cl

RESUMEN

En este estudio se midió de forma cuantitativa los niveles de coliformes fecales en el agua servida que es tratada por 2 humedales artificiales de flujo sub superficial de manera independiente. El primer humedal está ubicado en la aldea Infantil S.O.S de Bulnes, provincia de Ñuble y tiene un área de 161 m². El segundo humedal se encuentra en el centro turístico Ainahue, ubicado en la comuna de Hualqui, provincia de Concepción y posee un área de 559 m². Las mediciones se realizaron in situ, en zonas determinadas para la toma de datos, en el Afluente y Efluente, siendo realizadas 4 veces al mes, durante un periodo total de 3 meses. El análisis de los ensayos se realizó a través del laboratorio LECYCA (Laboratorio de Experimentación, Control y Certificación de la Calidad de los Alimentos), Universidad del Bío Bío, Chillán. Mediante el método de tubos múltiples APHA, 2012, y a través del medio de cultivo EC-MUG, Manual SISS, 2007.

Los resultados obtenidos indican que los humedales artificiales de flujo sub superficial eliminan coliformes fecales, de tal manera que las aguas del efluente cumplen con el requisito bacteriológico de la NCH 1333 (Requisitos del agua para distintos usos) (SAG, 2005), según la cual, el agua del efluente puede ser usada para riego, recreación con contacto directo y recreación sin contacto directo, sin embargo, no cumple con la NCH 409, que es la responsable de que el agua sea usada como bebestible, para animales y humanos.

Palabras claves: Coliformes fecales, humedal artificial, humedal.

Numero de palabras: 9848 palabras

9848 Palabras Texto + 35 Tablas/Figuras*250 = 18598 palabras.

Reduction of coliforms in artificial subsurface flow wetlands.

Author: Pablo Esteban Araya Valdebenito.

Department of Civil and Environmental Engineering, Universidad del Bio Bio.

E-mail: pearaya@alumnos.ubiobio.cl

Sponsoring Professor: Doctor Pedro Cisterna Osorio

Department of Civil and Environmental Engineering, Universidad del Bio Bio

E-mail: pcisterna@ubiobio.cl

ABSTRACT

In this study, fecal coliform levels in the wastewater treated by 2 artificial sub-surface wetlands were quantitatively measured. The first wetland is located in the village of Bulnes S.O.S of Bulnes, province of Ñuble and has an area of 161 m². The second wetland is located in the tourist center Ainahue, located in the commune of Hualqui, province of Concepción and has an area of 559 m². Measurements were made in situ, in areas determined for data collection, in the Influent and Effluent, being performed 4 times a month, for a total period of 3 months. The analysis of the tests was done through the Laboratory LECYCA (Laboratory of Experimentation, Control and Certification of Food Quality), University of Bío Bío, Chillán. Using the multiple tube method APHA, 2012, and through the EC-MUG culture medium, Manual SISS, 2007.

The results indicate that sub-surface artificial wetlands eliminate fecal coliforms, so that effluent water meets the bacteriological requirements of some of the elements indicated in NCH 1333 (Water requirements for different uses) according to which they can be use for irrigation, recreation with direct contact and recreation without direct contact, however, does not comply with NCH 409, which is responsible for the water being used as drinkable, for animals and humans.

Key words: Fecal coliforms, artificial wetlands, wetlands.

Number of words: 9848 words

9848 Words Text + 35 Tables / Figures * 250 = 18598 words.

1. INTRODUCCIÓN

El agua es el elemento más importante del planeta, gracias a ella se ha producido la aparición y el mantenimiento de la vida en la forma que hoy la conocemos. La obtención, uso y posterior tratamiento de este recurso son esenciales para la salud tanto del planeta, como de los animales que lo habitan. La problemática actual es la escasa obtención del agua en algunas regiones del planeta, por ello es de vital importancia generar nuevos estudios que ayuden a desarrollar sistemas de tratamiento de agua que sean accesibles para el común de las personas y así aprovechar al máximo este recurso vital.

Los humedales son áreas que se encuentran saturadas por aguas superficiales o subterráneas con una frecuencia y duración tales, que sean suficientes para mantener la condición de saturadas. (Lara, 1999) Estos son sistemas óptimos para el tratamiento de aguas residuales tanto del punto de vista económico, puesto que son sistema de un bajo costo de inversión y mantención en comparación con sistemas convencionales, como de un punto de vista paisajístico ya que no son invasivos con el entorno, sobre todo en zonas donde es escasa la vegetación.

Las bacterias coliformes fecales son un tipo de impureza que está presente en el agua. La ocurrencia de estas indica la posible presencia de bacterias causantes de enfermedades de materia fecal. Los niveles elevados de nutrientes y patógenos en las aguas subterráneas pueden causar problemas de salud en los niños y pueden deteriorar o destruir hábitats ambientalmente sensibles. Por ello se hace de vital importancia la reducción de estos patógenos en el agua. Además, se ha explorado continuamente el potencial de los humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales específicas, como lo demuestra un gran número de publicaciones. El siguiente estudio evaluó la efectividad en la mejora de la calidad del agua de un sistema de humedales de una sola familia de tanques sépticos construidos en Ohio. Concluyeron que los humedales de tratamiento doméstico pueden reducir la producción de coliformes fecales de un 88% a 27% (Steer, 2002).

Según un estudio hecho en Madrid la remoción de Coliformes fecales es un 96,14 %. Los resultados obtenidos en este proyecto mostraron la eficacia del método para la depuración de aguas residuales de una forma natural y económica, con un gasto mínimo de energía y un mantenimiento relativamente sencillo. En el caso de que se deseara lograr una depuración más completa, se podría

complementar con otros sistemas como a través de radiación solar, o bien ampliar la superficie de plantación de macrofitas (González, 2006)

Esta investigación se enfocará en la medición de coliformes fecales de las aguas tratadas mediante distintos humedales de flujo sub superficial. Para ello se extraerán muestras de 2 humedales artificiales de distintas dimensiones y ubicados en distintas localidades (Bulnes y Hualqui), en los cuales se realizarán mediciones de CF en el Afluente y Efluente. Se espera llegar a un nivel considerable de remoción de coliformes fecales de tal manera que el agua puede ser reutilizada.

1.1 Justificación

El agua es esencial para la vida, debido a esto las infecciones transmitidas por la misma son una fuente altamente peligrosa por los riesgos de masificación. Bajo esta verdad, es que se utilizan tecnologías de tratamiento de aguas residuales, en las cuales el proceso de desinfección contra los microorganismos patógenos se lleva a cabo, generalmente, por agentes químicos, como el cloro, que es ambientalmente incompatible y de comprobada toxicidad para el ser humano.

Según el SINIA (sistema nacional de información ambiental) en Chile existe un 95,9% de la población urbana que tiene acceso al sistema de alcantarillado, ósea, existen alrededor de 676.000 personas que no tienen acceso. Considerando información disponible del Censo 2002 del Instituto Nacional de Estadísticas, INE, “en el ámbito rural, el déficit existente en cuanto a soluciones de alcantarillado es un 48,1 %, lo que debe su origen entre otros, a la inexistencia de sistemas de alcantarillado de aguas servidas en las proximidades de la población objetivo”. La población rural total del país alcanza aproximadamente a los 2.026.322 habitantes, de los cuales 407.628 corresponden al universo total de población con demanda por sistemas de Agua Potable Rural y 1.552.801 a la población con demanda por Saneamiento Rural. (INE, 2009)

Los humedales artificiales se proyectan como una solución adecuada al tratamiento de aguas residuales para pequeñas poblaciones, debido a su bajo costo de inversión, mantenimiento y reducido impacto ambiental, es un agente favorable en la preservación de especies y ecosistemas, colabora a la recuperación de cuerpos de agua superficial, como lagunas y lagos, potenciando el valor paisajístico y la conservación de la biodiversidad.

1.2 **Objetivo general**

- Evaluar la capacidad de remoción de coliformes fecales en 2 humedales artificiales de flujo sub superficial instalados en la región del Bio bio.

1.3 **Objetivos específicos**

- Revisar el estado de arte de humedales artificiales como sistema de tratamiento de aguas residuales y de remoción de coliformes fecales.
- Caracterizar los humedales de flujo sub superficial a seguir.
- Evaluar parámetros que afectan la capacidad de remoción de los coliformes fecales en los humedales de flujo sub superficial.

2. MARCO TEORICO

Con el fin de introducir y explicar el concepto de humedales artificiales ya sea desde el punto de vista de su composición como de su funcionalidad se proporcionará información que fue recopilada a partir de la bibliografía estudiada.

2.1 Descripción de un Humedal Artificial

Los humedales son zonas saturadas cubiertas por flujos aguas superficiales o subterráneas, cuyo nivel de agua es poco profundo (menos de 1m). Presentan condiciones ideales para el crecimiento de plantas acuáticas emergentes (macrófitas), las cuales proporcionan superficies fijas en su zona radicular (raíces) para la formación de películas bacterianas (microorganismos), facilitando la filtración y absorción de los nutrientes que constituyen el agua residual. Además, las plantas cumplen la función de transportar el oxígeno hacia la columna de agua, para llevar a cabo la realización de los procesos de biodegradación de la materia orgánica, mediante procesos físicos, químicos y biológicos característicos de los humedales naturales (Kadlec, 1996)

Este sistema de tratamiento reduce con eficiencia altos niveles de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Sólidos Suspendidos (SS) y Nitrógeno (N) (rendimientos superiores al 80 %), así como niveles significativos de compuestos orgánicos, metales y patógenos, logrando niveles de tratamiento consistentes con un bajo consumo de energía y poco mantenimiento. No ocurre lo mismo con la eliminación de fósforo, que es mínima en estos sistemas (Lara, 1999)

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. (Mena, 2005)

La gran desventaja de este sistema de tratamiento, es que presenta una baja velocidad de degradación de la materia orgánica, por lo que se requieren mayores superficies de terreno, entre 20 a 80 veces que los sistemas convencionales (García & Corzo, 2009).

En comparación a los sistemas convencionales de tratamiento, los humedales construidos son de bajo costo, son fácilmente operados y mantenidos, y tienen un gran potencial para su aplicación en los países en desarrollo, en particular de las pequeñas comunidades rurales. (Kaiyasi, 2001)

2.1.1 Tipos de humedales artificiales

Existen 2 tipos de humedales artificiales, los de flujo superficial y los de flujo sub superficial.

2.1.1.1 Humedales de Flujo superficial o Flujo Libre (HFL).

En este tipo de humedal de flujo superficial el agua está expuesta directamente a la atmósfera y circula preferentemente a través de los tallos y hojas de las plantas. Estos tipos de humedales se pueden entender como una modificación del lagunaje natural con una profundidad de la lámina de agua entre 0,3 y 0,4 m, y con plantas. Se suelen aplicar para mejorar la calidad del efluentes que ya han sido previamente tratados en una depuradora (Garcia & Corzo, 2009).

2.1.1.2 Humedal de flujo sub superficial (HFS)

Existen dos tipos de sistemas de humedales artificiales de flujo sub superficial desarrollados para el tratamiento de aguas residuales:

2.1.1.2.1 Humedal de flujo sub superficial vertical (HFSV)

En este sistema las aguas residuales se vierten o dosifican a la superficie del humedal desde arriba usando un sistema mecánico de dosificación. El agua fluye verticalmente hacia abajo por la matriz del filtro. La diferencia importante entre el **humedal** vertical y el horizontal no sólo es la dirección del flujo, sino las condiciones aeróbicas. Estos humedales pueden llegar a tener un 99,9% de remoción de coliformes fecales. (Solórzano, 2017)

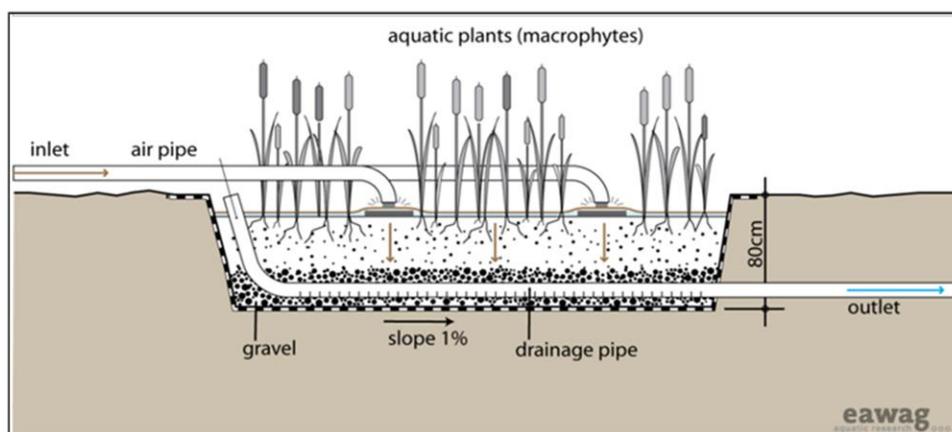


Figura 1 Humedal de flujo sub superficial vertical (fuente eawag)

2.1.1.2.2 Humedal de flujo sub superficial horizontal (HFSH)

En este tipo de humedal el nivel del agua está por debajo de la superficie del terreno; el agua fluye a través de la cama de arena o grava, las raíces penetran hasta el fondo de la cama de grava. Este tipo de humedal no necesita de tubos de aireación como el HFSV.

De este último humedal artificial descrito fueron los humedales de Bulnes y de Hualqui en donde se realizó la investigación.

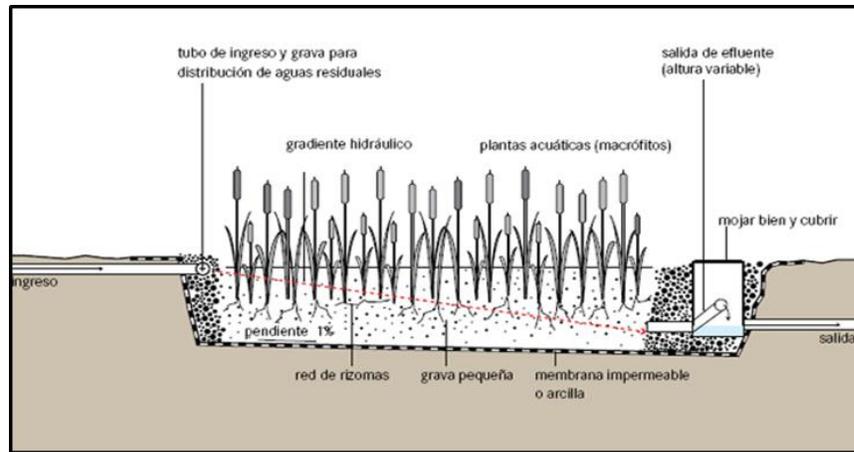


Figura 2 Humedal de flujo sub superficial horizontal (fuente eawag)

2.2 Componentes del humedal de flujo sub superficial

2.2.1 El agua

El agua es la fase móvil dentro del humedal, la encargada del transporte de los contaminantes y en la cual se van a producir la mayoría de las reacciones responsables de la depuración. En el Capítulo 2.4 se profundiza este tema.

2.2.2 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, 2010).

2.2.3 Material Impermeabilizante.

Es necesario disponer de una barrera impermeable para confinar al sistema y prevenir la contaminación de las aguas subterráneas, éste debe ser fuerte, grueso, liso y debe ser protegido de

la perforación por piedras puntiagudas o grava. El material impermeabilizante más utilizado en proyectos a gran escala, es el polietileno de alta densidad (HDP).

2.2.4 Las plantas

Sobre el medio granular se encuentra la vegetación, en este humedal se utilizó la espadaña (*Typha* spp), la cual fue proporcionada por el humedal Ainhue. Este tipo de vegetación se caracteriza por ser capaz de crecer bajo diversas condiciones medioambientales, se propaga fácilmente lo que la hace ideal para un humedal artificiales, los cuales se inundan al nivel del material granular tal que las raíces permanezcan sumergidas, y puedan tomar los nutrientes necesarios del agua residual, como es el caso del fosforo, nitrógeno, minerales, metales, etc. Para la selección de la vegetación a utilizar en los humedales se debe tener en cuenta que las plantas puedan crecer fácilmente en las condiciones ambientales donde está proyectado el sistema y que puedan tolerar los contaminantes presentes en las aguas residuales. Preferencialmente se deben utilizar especies propias de la flora local (García & Corzo, 2009). En la tabla 1 se observan las características de las especies vegetales más utilizadas en los humedales artificiales (Delgadillo, 2010)

Nombre científico	Familia	Nombres comunes	Características	Distancia de siembra	Penetración de raíces en grava	Temperatura		pH
						Deseable	Germinación de semilla	
<i>Typha</i> spp	Tifácea	Espadaña, enea, anea, junco, chuspata	Ubicua en distribución Capaz de crecer bajo diversas condiciones medio ambientales Se propaga fácilmente Capaz de producir una biomasa anual grande Tiene potencial pequeño de remoción de N y P por la vía de la poda y la cosecha	60 cm	Relativamente pequeña (30 cm) por lo que no es recomendable para sistemas de flujo subsuperficial	10-30	12-24	4-10
<i>Scirpus</i> spp	Ciperácea	Totora, tule	Perennes Crecen en grupo Plantas ubicuas Crecen en aguas costeras, interiores salobres y humedales Crecen bien en agua desde 5 cm hasta 3 m de profundidad	30 cm	60 cm por lo que es recomendable para sistemas de flujo subsuperficial	18-27		4-9
<i>Phragmites</i> spp	Gramínea	Carrizo	Anuales Altos Rizoma perenne extenso Plantas acuáticas usadas más extensas Pueden ser más eficaces en la transferencia de oxígeno porque sus rizomas penetran verticalmente y más profundamente. Son muy usadas en humedales porque ofrecen un bajo valor alimenticio	60 cm	40 cm por lo que es recomendable para sistemas de flujo subsuperficial	12-23	10-30	28

Tabla I Características de las especies vegetales más utilizadas en HA (Delgadillo, 2010).

En ambos humedales estudiados se pueden observar las espadañas en diferentes etapas, en el humedal de Bulnes se encuentran en condición natural sin cortar con un pequeño porcentaje de Calas (13%), mientras que en el humedal de Hualqui se encuentran podadas. Ver figuras 3 y 4.



Figura 3 *Espadañas y Calas, humedal Bulnes.*



Figura 4 *Espadañas humedal Hualqui.*

2.2.5 *Material granular*

Factor importante en la estimación del comportamiento hidrodinámico, medio donde crecen la vegetación, los microorganismos y se realizan los principales procesos de depuración. El sustrato más utilizado para HFSH es el suelo granular (Silva, 2015)

El medio granular es de suma importancia puesto que en el ocurren múltiples procesos como la retención y sedimentación de la materia en suspensión, la degradación de la materia orgánica, la transformación y asimilación de los nutrientes, y la inactivación de los microorganismo patógenos. Una característica muy importante del medio granular es su conductividad hidráulica, ya que de esta propiedad depende la cantidad de flujo de agua que puede circular a través de él. Durante el diseño debe tenerse en cuenta que la conductividad hidráulica disminuirá con el paso del tiempo (García & Corzo, 2009).

2.2.6 *Dispositivos de entrada y salida*

2.2.6.1 *Dispositivo de Entrada.*

Los humedales son sistemas que requieren una buena repartición (uniformidad del flujo a través del canal) y recogida de las aguas para alcanzar los rendimientos estimados, es por ello que las estructuras de entrada y salida deben estar muy bien diseñadas y construidas (García & Corzo, 2009). El agua residual ingresa al humedal en forma uniforme respecto al ancho del humedal mediante el dispositivo de forma “T” invertida que se instala en el inicio del humedal.

2.2.6.2 *Dispositivo de salida.*

La recogida del agua en el humedal se realiza con una tubería perforada asentada sobre el fondo del humedal, captando de manera uniforme el caudal del efluente, evitando flujos preferenciales

entre entrada y salida del humedal. Posteriormente, es dirigida hacia la salida por medio de un sifón, el cual permite mantener el nivel de agua dentro del humedal.

2.3 Diseño y construcción de humedales artificiales

El diseño hidráulico es fundamental para la obtención de buenos rendimientos en la eficiencia de depuración. En los modelos de diseño se asume condiciones uniformes y de tipo pistón. Para lograr esto es importante realizar un cuidadoso diseño hidráulico y los métodos constructivos apropiados. El flujo de agua en el interior del humedal debe romper las resistencias creadas por la vegetación, capa de sedimentos, raíces y sólidos acumulados en los humedales (Delgadillo, 2010).

Para el diseño de humedales se deben considerar los siguientes criterios:

1. Se consideran reactores biológicos.
2. Se considera que el flujo a través del medio poroso es flujo pistón y en forma uniforme.
3. La ley de Darcy describe el flujo a través del medio poroso.

Para el diseño de este tipo de humedales los pasos a seguirse son:

- *Cálculo del área necesaria.*
- *Profundidad del humedal.*
- *Pendiente.*
- *Sustrato.*
- *Relación largo – ancho*

2.3.1 Cálculo de área superficial.

El cálculo del área superficial se realiza en función al parámetro que se desea disminuir o remover, generalmente los diseños se realizan para disminución de la DBO.

Área superficial:

$$\text{Ecuación 1} \quad AS = \frac{Q \cdot \ln\left(\frac{c_0}{c}\right)}{K_T \cdot h \cdot N}$$

Dónde:

Q= caudal de diseño del humedal (m³/día)

C= concentración efluente (mg/l)

C₀= concentración afluente (mg/l)

K_T= Constante de reacción de primer orden dependiente de la temperatura (d⁻¹)

h= profundidad del humedal (m)

D= porosidad del medio granular (porcentaje expresado en fracción).

La constante de reacción de primer orden se calcula mediante

Constante de reacción de primer orden

$$\text{Ecuación 2} \quad Kt = 1,104 * 1,06^{T_2 - 20}$$

Dónde:

T₂ = temperatura del agua (°C)

La profundidad del humedal generalmente varia de 0,3 a 1 m (valor usual 0,6m), con una pendiente de 0,1 a 1%, siendo el valor usual de 0,5%.

2.3.2 Relación Largo – Ancho

Para calcular el ancho del humedal consideramos la ley de Darcy (ecuación 3), para flujo en medio poroso.

Principio de Darcy para flujo en medios porosos

$$\text{Ecuación 3} \quad Ac = \frac{Q}{(ks * S)}$$

Dónde:

A_c = área vertical (m²)

Q = caudal medio (m³/s)

K_s = Conductividad hidráulica (m/s)

S = pendiente (m/m)

2.3.3 Cálculo del ancho del humedal.

El ancho del humedal (m) se determina en función al área vertical y la profundidad del nivel de agua a tratar.

Ecuación 4
$$W = \frac{A_c}{h}$$

2.3.4 Cálculo de largo humedal

El largo del humedal se determina en función al ancho y al área superficial como se muestra en la ecuación 5:

Ecuación 5
$$L = \frac{A_s}{W}$$

Dónde:

A_s = Área superficial del humedal (m²)

W = Ancho del humedal (m)

Tipo de material	Tamaño efectivo D10 (mm)	Conductividad hidráulica, ks (m ³ /m ² /d)	Porosidad, n %
Arena gruesa	2	100-1.000	28-32
Arena gravosa	8	500-5.000	30-35
Grava fina	16	1.000-10.000	35-38
Grava media	32	10.000-50.000	36-40
Roca gruesa	128	50.000-250.000	38-45

Tabla II Cuadro de material constructivo (Delgadillo, 2010)

Posteriormente calculamos la relación largo-ancho (L/A). Mientras mayor es la relación largo-ancho se tiene mejor depuración de las aguas, pero se tiene problemas de cortocircuitos, flujos preferenciales, presencia de agua sobre el lecho de grava y otros.

Por ello se recomienda relación largo – ancho de: 2 a 1, 3 a 1 y 4 a 1

En la tabla 3 se muestra un resumen de los principales parámetros de diseño de los humedales sub superficiales de flujo horizontal.

Parámetros	Unidad	Intervalo	Valor usual
Tiempo de retención hidráulico	Días	4-15	7
Profundidad agua	M	0,1-0,8	0,6
Área	m ² /heq	2,5-5	
Carga orgánica	gDBO ₅ /m ² .dia	3-7,5	<11
Carga orgánica	kg DBO ₅ /heq.di	<70	
Carga hidráulica	m ³ /m ² .dia	0,1-0,2	
Características constructivas			
Grava ingreso salida	mm	50-100	50
		3-6	
Grava media	mm	5-10	19
		6-12	
Coefficiente uniformidad		3-5	<5
Profundidad medio	m	0.70-1.5	0.7
Pendiente	%	0-1	0.5
Relación largo - ancho		2:1 – 7:1	3:1
Drenaje			
Tubería perforada- tamaño	pulgada	3-4	4
Distribución de agua			
Tubería perforada - canal	pulgada	2-4	3

Tabla III Parámetros constructivos (Delgadillo, 2010),

2.4 Agua residual

Estas aguas se pueden clasificar de diferentes maneras.

2.4.1 Clasificación Respecto a su generación

Estas se clasifican en cuatro fuentes fundamentales de aguas residuales: Aguas residuales domésticas o urbanas, aguas residuales industriales, aguas residuales de uso agrícola, y aguas residuales de cursos pluviales (Ramalho R. , 1996).

Las aguas residuales de un domicilio se originan por:

- La preparación de alimentos, el lavado de platos, la limpieza de la casa, el lavado de la ropa e higiene personal.
- El uso del inodoro
- El lavado de superficies pavimentadas externas y de automóviles.

En estos humedales el agua residual será de uso doméstico, tanto para la Aldea SOS y para Ainahue.

La Tabla 4 presenta datos típicos de los constituyentes encontrados en el agua residual doméstica. En función de las concentraciones de estos, podemos clasificar el agua residual como fuerte, media o débil. Tanto los constituyentes como sus concentraciones presentan variaciones en función de la hora del día, el día de la semana, el mes del año y otras condiciones locales. Por ello, los datos de la Tabla 4 pretenden solamente servir de guía, y no como base de proyecto (Tchobanoglous, 1999)

Parámetros	Concentración			
	Unidades	Fuerte	Media	Débil
Sólidos Totales	mg/l	1200	720	350
Sólidos Disueltos Totales	mg/l	850	500	250
Fijos	mg/l	525	300	145
Volátiles	mg/l	325	200	105
Sólidos Suspendidos	mg/l	350	220	105
Fijos	mg/l	75	55	20
Volátiles	mg/l	275	165	80
Sólidos Sedimentables	ml/l	20	10	5
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/l	400	220	110
Carbono Orgánico Total	mg/l	290	160	80
Demanda Química de Oxígeno	mg/l	1000	500	250
Nitrógeno (total en la forma N)	mg/l	85	40	20
Orgánico	mg/l	35	15	8
Amoniaco libre	mg/l	50	25	12
Nitritos	mg/l	0	0	0
Nitratos	mg/l	0	0	0
Fósforo (total en la forma P)	mg/l	15	8	4
Orgánico	mg/l	5	3	1
Inorgánico	mg/l	10	5	3
Cloruros	mg/l	100	50	30
Alcalinidad (como CaCO ₃)	mg/l	200	100	50
Grasa	mg/l	150	100	50
Sulfatos	mg/l	34	22	12
Coliformes totales	NMP/100 ml	10 ⁷ - 10 ⁹	10 ⁷ - 10 ⁸	10 ⁶ - 10 ⁷
Compuestos orgánicos volátiles	¹ g/l	>400	100 - 400	<100

Tabla IV Parámetros típicos de las aguas residuales de origen doméstico (Tchobanoglous, 1999)

2.4.2 Características del agua residual.

El agua residual se puede caracterizar basándose en sus constituyentes físicos, químicos y biológicos, permitiendo cuantificar los contaminantes presentes.

2.4.2.1 Características físicas

Dentro de las características físicas se encuentran:

2.4.2.1.1 Temperatura

La que puede determinar la solubilidad de diversos gases como el oxígeno y también ejercer efecto en las reacciones químicas y biológicas que pueden ocurrir (Metcalf & Eddy, 2003)

2.4.2.1.2 Turbiedad y el color

Debido a la materia en suspensión, organismos microscópicos y partículas que afectan el traspaso de la luz a través del agua, perturbando el desarrollo de organismos fotosintéticos (Ramalho R. S., 1998)

2.4.2.1.3 *Olor*

Causado por los gases liberados durante el proceso de descomposición de la materia orgánica (Metcalf & Eddy, 2003).

2.4.2.2 *Características químicas*

Estas se agrupan en constituyentes inorgánicos y orgánicos. Dentro de los constituyentes inorgánicos se encuentra principalmente:

2.4.2.2.1 *PH*

Que expresa una tendencia de acidez del agua y generalmente se sitúa en un rango neutro (6,5 - 8,5)

2.4.2.2.2 *Nutrientes*

Compuestos principalmente por nitrógeno y fósforo en sus diferentes formas, los cuales tienen un rol fundamental en la eutrofización de las aguas.

2.4.2.2.3 *Metales pesados*

Como arsénico (As), cadmio (Cd), cromo (Cr), plomo (Pb), mercurio (Hg) y plata (Ag). Estos metales en altas cantidades pueden generar toxicidad en sistemas de tratamiento biológicos (Metcalf & Eddy, 2003).

Por otra parte, en los constituyentes orgánicos, la materia orgánica presente en las aguas servidas está constituida principalmente por proteínas (40 a 60 %), carbohidratos (25 a 50 %) y aceite y grasas (8 a 12 %) (Metcalf & Eddy, 2003).

2.4.2.3 *Características biológicas*

Son de gran importancia, ya que se asocian principalmente a la presencia de microorganismos que pueden causar enfermedades a humanos y animales. Los microorganismos presentes en las aguas servidas pueden ser bacterias, protozoos, virus, helmintos, rotíferos, algas, entre otros, siendo las bacterias, las que se encuentran en mayor abundancia (Oakley, 2005). En particular, los organismos bacterianos patógenos excretados por el hombre, se presentan en pequeñas cantidades y son difíciles de aislar y de identificar. Para ello se emplea el organismo coliforme (grupo de bacterias presentes en el suelo, plantas, humanos y animales) como indicador (Metcalf & Eddy, 2003).

2.4.3 *El agua como vehículo de infección*

El agua que está contaminada por aguas residuales, puede intervenir, directa o indirectamente, en la propagación de enfermedades, favoreciendo el desarrollo de artrópodos o moluscos, que son eslabones en sus cadenas epidemiológicas, o difundiendo agentes infecciosos procedentes de excretas de enfermos y portadores, que a través de ella pueden llegar al agua de bebida, o a las hortalizas, que son regadas con estas aguas, sin tratamiento previo. Si el agua es vertida al mar, contribuirá al envenenamiento de peces y mariscos en los estuarios y plataformas costeras y de los criaderos de ostras y áreas dedicadas a la pesca.

El vertido de aguas residuales en los ríos, lagos y mares produce otro tipo de contaminación llamada psicossocial, ya que afecta al entorno natural del hombre, modificando la estética de su paisaje y haciéndolo cada vez más inhóspito. En aquellos lugares en que se vierten sustancias coloreadas al agua, procedentes de algunas industrias, se puede cambiar el color de ésta, y afectar a la penetración de la luz. En las zonas turísticas, este aspecto adquiere mayor relevancia, puesto que, su medio de vida es la afluencia y visita de personas, y han de atender, prioritariamente, los criterios estéticos y sanitarios.

2.5 **Indicadores de contaminación fecal en el control de la calidad del agua**

2.5.1 *Coliformes Totales*

Este grupo incluye las bacterias aerobias y anaerobias facultativas, gran-negativas, no formadoras de esporas, de morfología bacilar y que fermentan la lactosa con producción de gas cuando son incubadas durante 48 h a 30-37°C. Estos coliformes son eliminados a través de las heces humanas en números altos, pero no todos ellos son de origen fecal. Estos indicadores son muy útiles para determinar la calidad del agua. Ellos son menos sensibles que los virus y quistes de protozoos a factores de estrés ambientales y tratamientos de desinfección. En las plantas de tratamientos de aguas residuales los coliformes totales son considerados uno de los mejores indicadores de la eficiencia de la planta de tratamiento (Benítez Rodas, 2013).

2.5.2 *Coliformes fecales*

Los coliformes fecales o coliformes termo tolerantes incluyen todos los coliformes que pueden fermentar la lactosa a 43,5-45,5°C y con capacidad de crecer en presencia de sales biliares. El grupo

de los coliformes fecales comprende las bacterias como *E. coli* o *Klebsiella pneumoniae*. La presencia de coliformes fecales indica la presencia de materia fecal procedente de animales de sangre caliente. Sin embargo, los humanos y animales como fuente de contaminación no se pueden diferenciar. Algunos investigadores han sugerido el uso exclusivo de *E. coli* como un indicador de contaminación fecal, ya que puede ser fácilmente distinguido de otros miembros del grupo de coliformes fecales por indicadores enzimáticos como la ausencia de ureasa o la presencia de β -glucuronidasa. Los coliformes fecales muestran un patrón de supervivencia similar al de las bacterias patógenas, pero su utilidad como indicadores de contaminación por protozoos o virus son muy limitados, ya que son mucho menos resistentes que los quistes de protozoos y virus en los procesos de desinfección. Por tanto, la utilización de los coliformes como estándares de calidad de agua es poco fiable en ambientes acuáticos contaminados con virus y quistes de protozoos, que luego podrían volver a crecer en agua potable y aguas residuales bajo condiciones apropiadas (Benítez Rodas, 2013).

2.5.3 *Escherichia coli*

Escherichia coli es un bacilo corto Gram negativo que se encuentra clasificado dentro de la familia Enterobacteriaceae (bacterias entéricas), existe como comensal en el intestino delgado de humanos y animales. Sin embargo, existen algunas cepas de *E. coli* patógenas que provocan enfermedades diarreicas. Estas se clasifican con base en las características que presentan sus factores de virulencia únicos, cada grupo provoca enfermedad mediante un mecanismo diferente, revisar Tabla V. Se sabe que sus propiedades de adherencia a las células epiteliales de los intestinos grueso y delgado son codificadas por genes situados en plásmidos. De manera similar las toxinas son mediadas por plásmidos o fagos (Benítez Rodas, 2013).

Bacteria	Enfermedad	Receptor
<i>Escherichia coli</i> patogena	Diarrea	Hombre y animales
Salmonelas		
<i>S. typhi</i>	Fiebres tifoideas	Hombre
<i>S. paratyphi</i>	Fiebres paratifoideas	Hombre
<i>Shigella</i>	Disentería bacilar	Hombre
<i>Vibrio Cholerae</i>	Cólera	Hombre
<i>Yersinia enterocolitica</i>	Diarrea y septicemia	Hombre y animales

Tabla V Bacterias Patógenas presente en las heces.

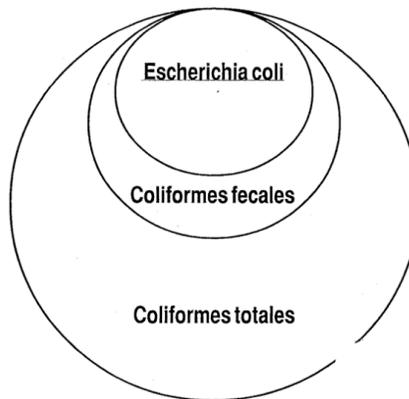


Figura 5 Coliformes, Coliformes fecales y Escherichia Coli

2.5.4 Factores que influyen en la eliminación de coliformes

Diversos son los factores que influyen en la reducción de los coliformes.

2.5.4.1 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

En el gráfico 1, se presentó el caso de coliformes totales y la DBO, se logró determinar una relación directa, presentando un grado de asociación del 94,91%. (Gallardo, 2013)

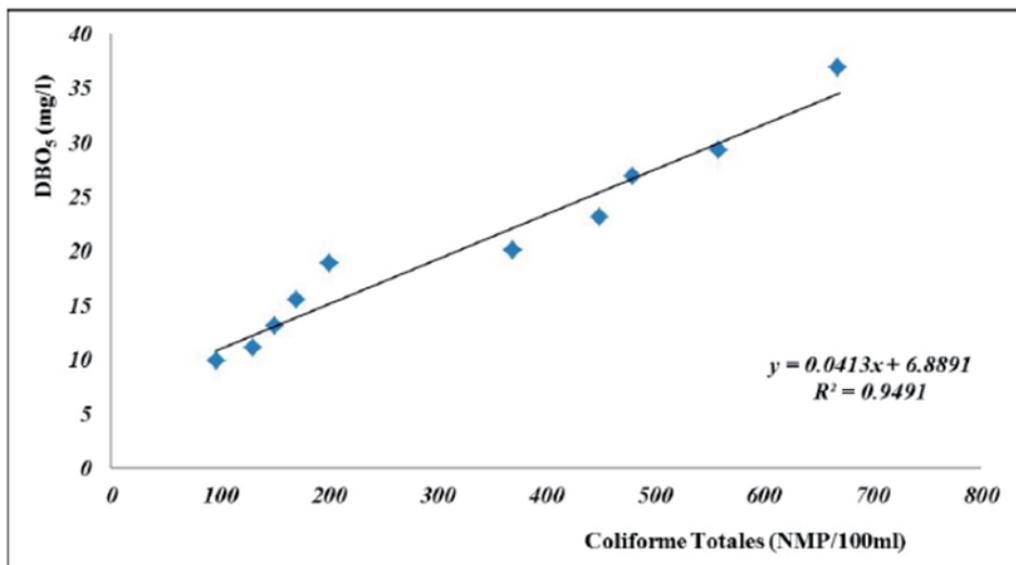


Gráfico 1 relación de los coliformes totales con la DBO. (Gallardo, 2013)

2.5.4.2 *Temperatura*

Algunos autores indican que un aumento en la temperatura reduce la densidad de bacterias fecales y otros (Ahumada-Santos, 2014) indican que la mortalidad bacteriana está relacionada directamente con la temperatura. Durante el proceso de experimentación, no hubo cambios de temperatura considerables, dado que las muestras siempre fueron extraídas en una hora similar y en un periodo de tiempo no considerable (junio, julio y agosto) por lo que no se podrá determinar si afecta o no la temperatura.

2.5.4.3 *Oxígeno disuelto*

La presencia de radicales libres de oxígeno y peróxido de oxígeno fueron tóxicos para las bacterias, concluyendo que la tasa de mortalidad de CF aumenta con la concentración de OD. (Mara D., 1992). Si hay mayor cantidad de oxígeno disuelto, este favorece la fotooxidación y, consecuentemente, el proceso de desinfección (Kadlec RH, 2009)

2.6 **Tratamiento de aguas residuales**

El objetivo del tratamiento de las aguas residuales es producir efluente reutilizable en el ambiente y un residuo sólido o lodo. Convenientes para su disposición o reutilización.

2.6.1 *Fases de tratamiento de aguas residuales*

Estas incluyen una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que tienen como fin eliminar los contaminantes presentes en el efluente del uso humano. Tales procesos de tratamiento son típicamente referidos a un tratamiento primario, donde principalmente se retienen sólidos; tratamiento secundario, donde se transforma la materia orgánica disuelta en sólidos suspendidos, para finalmente pasar a un tratamiento terciario o de refinado, ver figura 6 y 7.

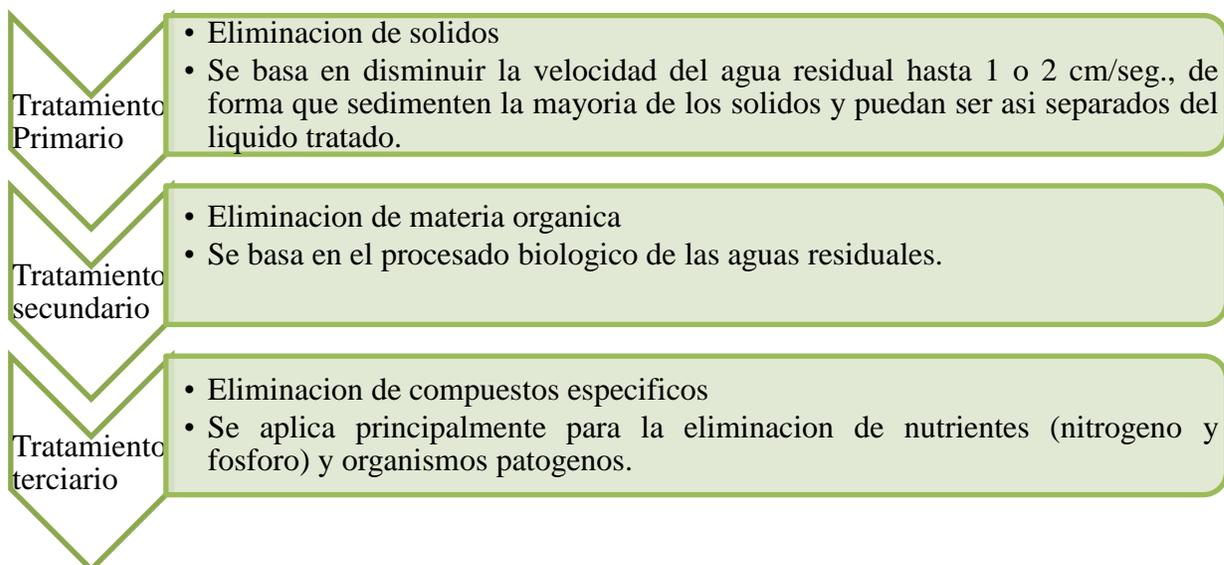


Figura 6 Esquema general del tratamiento de aguas servidas

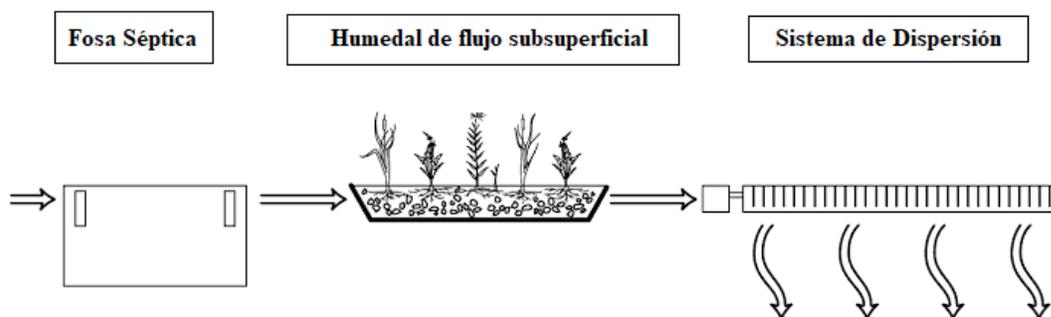


Figura 7. Aplicación de un humedal para el tratamiento de aguas residuales.

2.6.1.1 Desinfección

La desinfección, perteneciente al tratamiento terciario, es el proceso de inactivación de organismos patógenos (causante de enfermedad) o para impedir su reproducción. Los organismos patógenos que se encuentran comúnmente en las aguas residuales domésticas incluyen bacterias, virus, helmintos y quistes de protozoos. El objetivo del proceso de desinfección es proteger al público de enfermedades transmitidas por el agua tales como el cólera, la fiebre tifoidea, la disentería, la hepatitis y la salmonella, entre otras. (Vera, 2014)

Existen diferentes métodos para desinfectar aguas servidas que incluyen agentes químicos (ejemplo: cloro, cloroamina, ozono, dióxido de cloro, permanganato de potasio, entre otros), agentes físicos (ejemplo: radiación UV) e irradiación (ejemplo: electromagnetismo, rayos gamma).

2.6.1.1.1 Tecnologías convencionales de desinfección de aguas residuales

Las plantas de tratamiento convencionales de depuración de aguas residuales se caracterizan por necesidades constructivas elevadas, bajo valor estético, y especialización para su operación. Ej. Planta de lodos activos, las cuales son de un alto grado de costo de operación.

El cloro, es el desinfectante más usado para el tratamiento del agua residual doméstica porque destruye los organismos al ser inactivados mediante la oxidación del material celular. El cloro puede ser adicionado al agua como cloro gaseoso, líquido (hipoclorito de sodio) o sólido (hipoclorito de calcio). Cuando se agrega cloro al agua, la acción desinfectante y sanitaria que resulta es efectuada mediante un agente químico intermedio, el “Ácido Hipocloroso”. El cloro y el agua reaccionan para formar el ácido hipocloroso. El ácido hipocloroso es el que realmente mata a los microorganismos presentes en el agua. Esto se debe a que el ácido hipocloroso tiene la capacidad de difundirse a través de las paredes de las células y de llegar así a las partes vitales de la célula bacteriana (Ramalho R. S., 1998).

La ventaja del sistema de desinfección por cloración es su bajo costo, Otra ventaja es que el cloro residual que permanece en el efluente puede prolongar el efecto de desinfección aún después del tratamiento inicial.

2.6.1.2 Tecnologías blandas de tratamiento de aguas residuales

La aplicación de tecnologías denominadas blandas al tratamiento de las aguas residuales encuentra un campo de aplicación especialmente adecuado en las pequeñas y medianas poblaciones (menor a 10.000 personas) debido fundamentalmente a su buen rendimiento en eliminación de patógenos, su facilidad de operación y mantenimiento, y buena integración en el medio rural.

2.6.1.2.1 Lagunas de maduración

Las lagunas de maduración, en general prosiguen de un proceso de laguna facultativa primaria o secundaria, están diseñadas principalmente para el tratamiento terciario, es decir, la eliminación de patógenos, nutrientes y posiblemente algas. Son muy poco profundas, por lo general de 0.9 a 1 m, esto, para permitir la penetración de la luz a la parte inferior y condiciones aeróbicas durante toda la profundidad. (Gonzales, 2016).

El objetivo principal de las lagunas de maduración es producir un efluente de alta calidad. El tiempo de retención de una laguna de maduración, así como el número de lagunas, está condicionado por

el grado de depuración bacteriana que se quiere. En el humedal de Ainahue existe una laguna pos humedal. Ver figura 8.



Figura 8. Laguna de maduración, humedal Ainahue, Hualqui

2.6.1.2.2 Radiación solar

La radiación solar es el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el Sol en todas las direcciones del espacio. El Sol es una estrella que se encuentra a una temperatura media de 6000 K, en cuyo interior tienen lugar una serie de reacciones de fusión nuclear que producen una pérdida de masa que se transforma en energía. Esta energía liberada del Sol se transmite al exterior mediante la radiación solar. (Romero Tous, 2009).

2.6.1.2.3 Humedales

Las características de los humedales ya han sido mencionadas en el capítulo 2.1.

3. METODOLOGÍA

En este capítulo se detalla la metodología utilizada para el desarrollo de las experiencias, además de las consideraciones y criterios empleados para llevar a cabo cada actividad.

3.1 Ubicación de los humedales estudiados

3.1.1 Ubicación Humedal Bulnes

El humedal ubicado en la aldea infantil S.O.S de Bulnes que acoge alrededor de 100 personas, está ubicado a 7,5 km al Este de Bulnes por la ruta N-69, perteneciente a la región de Ñuble. Ver figura 9.

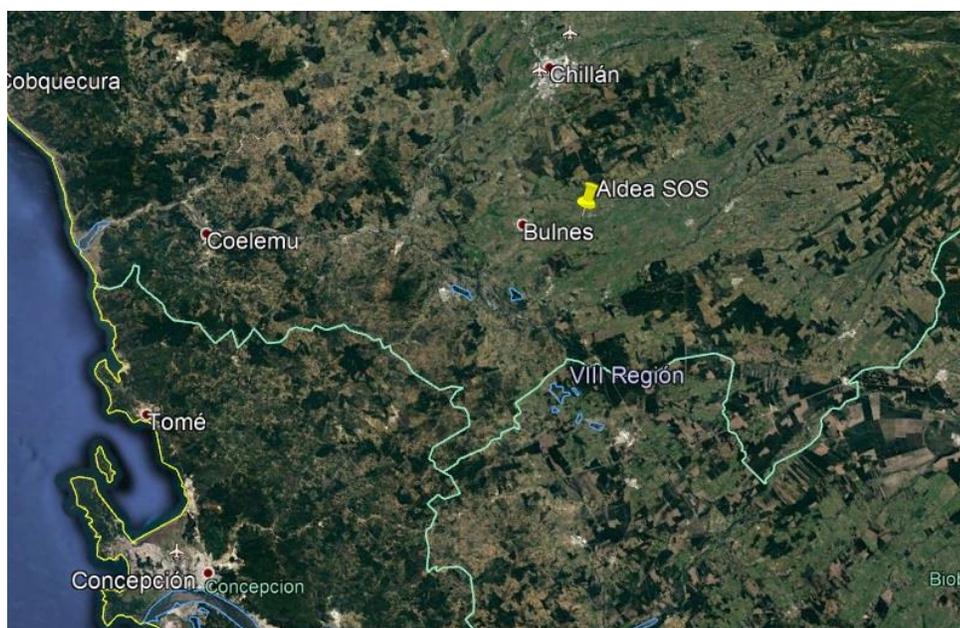


Figura 9. Ubicación aldea infantil SOS Bulnes.

3.4.3 Ubicación Humedal Ainhue

El Complejo turístico Ainhue se ubica en la comuna de Hualqui, a 24 km de la ciudad de Concepción. Este lugar cuenta con piscinas recreativas, cabañas y restaurant. Ver figura 10

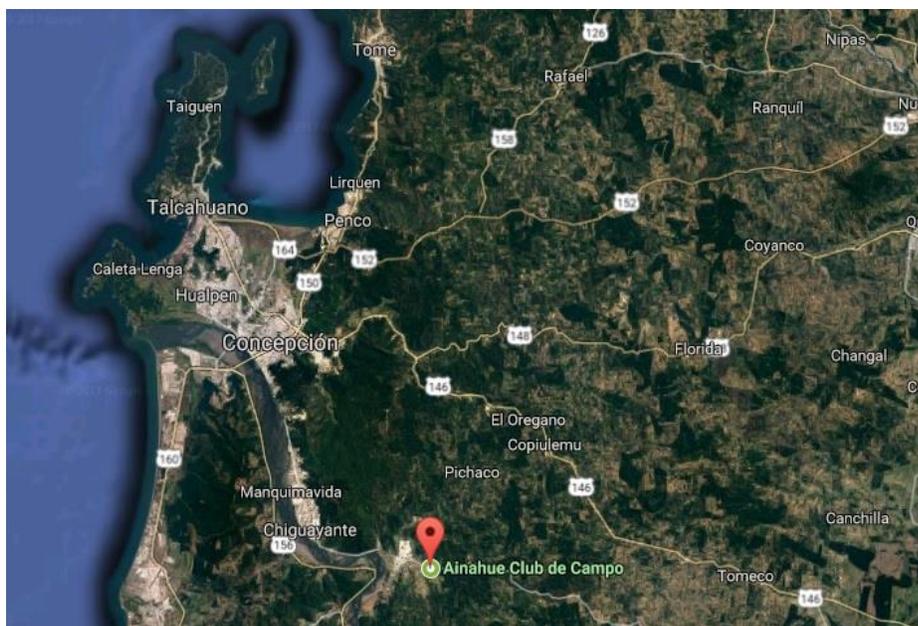


Figura 10. Ubicación del centro turístico Ainahue.

3.2 Caracterización de la Zona de estudio

El clima es un factor importante a considerar al momento de proponer un sistema de tratamiento de aguas servidas.

3.2.1 Caracterización en Bulnes

En Bulnes se presenta un clima mediterráneo con altas temperaturas en verano y bajas en invierno, las precipitaciones promedio medidas en los meses de Junio, Julio y Agosto son 222, 183 y 160 mm Respectivamente, siendo esos los meses en donde se realizó el estudio, en tanto en el verano solo se promedian 22 mm. (Torres, 2003)

3.6.3 Caracterización Hualqui

En Hualqui ocurre un contraste entre el verano seco, con fuerte insolación subtropical y el invierno caracterizado por lluvias recias y persistentes. En efecto, en el área se reconoce el dominio mediterráneo. El clima es templado cálido con una estación húmeda de 7 a 8 meses de duración y una corta estación seca en verano. Según los registros de la estación meteorológica Bellavista, de la Universidad de Concepción, las temperaturas del área presentan una media de 15,5° C. El mes más frío es julio, con una media de 9,1° C y el mes más cálido es enero, con 18° C. En cuanto a intensidad y precipitación acumulada, éstas tienen una media anual de 1.222,1 mm y registran valores máximos absolutos en 24 horas de 148,9 mm (25 de noviembre de 1986). (Cortés, 1995)

3.3 Descripciones de humedales estudiados

3.3.1 Descripción del Humedal de la aldea SOS, Bulnes

El humedal de Aldea SOS Bulnes es un humedal artificial de flujo sub superficial (HFSS) diseñado para una demanda de 100 personas, el cual consiste en una excavación tipo zanja en el suelo que va desde los 0.42 a 0.56 m de profundidad, tiene un ancho de 7 [m] y un largo de 23 [m], su área es de 161 [m²]. Está cubierto con polietileno de alta densidad para evitar la contaminación del suelo y la napa subterránea. Para proteger este material del punzonamiento que genera la grava, se dispone una capa de arena gruesa de granulometría menor a 2 [mm], el volumen estimado sobre el fondo del humedal es de aproximadamente 8.05 [m³]. Sobre la cama de arena, se rellena con grava gruesa de granulometría 19 [mm], la elección de este material se debe principalmente a su alta conductividad hidráulica. Para calcular el volumen dispuesto de grava se considera una altura promedio de 0.49 [m]. Así el volumen estimado de relleno con grava en el humedal es de 78.89 [m³]. Sobre el material filtrante, que sirve de soporte para la vegetación y permite la fijación de población microbiana, se encuentran las plantas. 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. La principal especie en el humedal Aldea SOS de Bulnes, es la Espadaña (*Typha* spp.), también posee un 18% de Cala (*Zantedeschia aethiopica*).



Figura 11. Humedal aldea SOS, Bulnes.

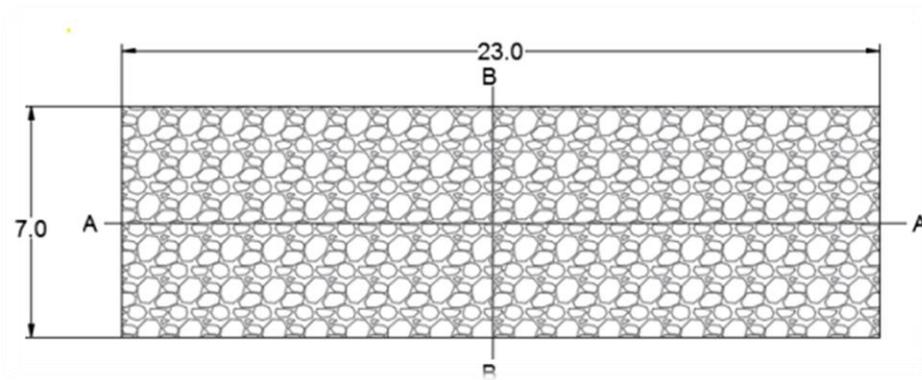


Figura 12. Vista en planta humedal aldea SOS, Bulnes.

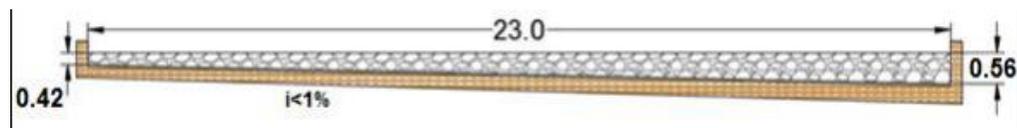


Figura 13. Corte longitudinal A-A de la figura 12.

3.3.2 Descripción del Humedal Ainahue, Hualqui.

El humedal Ainahue es un humedal artificial de flujo sub superficial (HFSS), el cual consiste en una excavación tipo zanja en el suelo que va de los 0,8 a 0,3 m de profundidad, cubierto con polietileno de alta densidad, de manera de evitar la contaminación del suelo y la napa subterránea. Está cubierto por un material filtrante, se aplica una capa de arena de 5 cm de manera de proteger el material aislante. El material filtrante, es una cama de arena gruesa de granulometría < 2 [mm], de 0.05 [m] de espesor, con el propósito de proteger la geo membrana del punzonamiento que genera la grava que será agregada posteriormente, el volumen estimado de arena sobre el fondo del humedal es de aproximadamente 28 [m³]. Sobre la cama de arena, esta relleno con grava chancada gruesa de granulometría 19 [mm], la elección de este material filtrante se debe principalmente a su alta conductividad hidráulica. El volumen estimado de relleno con grava en el humedal, es de aproximadamente 365 [m³]. Este valor se estima, considerando una altura promedio de 0.65 [m] entre ambas cotas y la superficie de 559 [m²]. (Colombo, 2015). Estas dimensiones se pueden ver en la figura 15 y en la figura 16. (D`Appollonio, 2015).



Figura 14. Humedal Ainahue, Hualqui

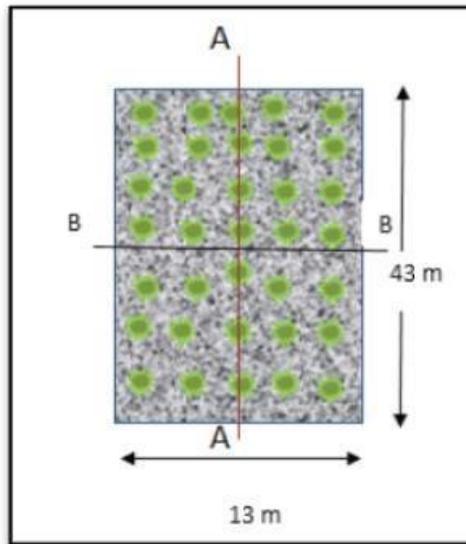


Figura 15. Vista en planta del humedal Ainahue (D`Appollonio, 2015).

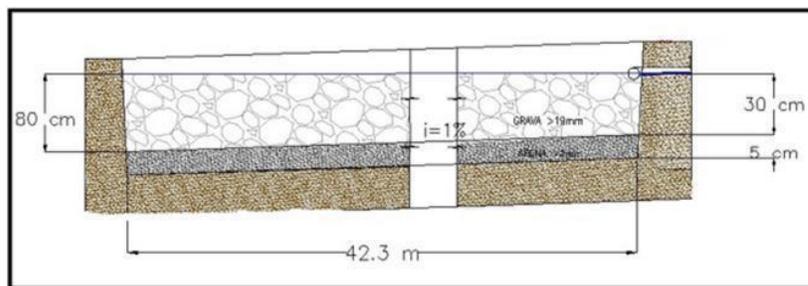


Figura 16. Corte longitudinal A-A de la figura 15 (D`Appollonio, 2015).

3.4 Toma de muestras

La toma de muestras se realizó de la misma manera para ambos humedales, se usó un frasco de 250 ml entregado por el laboratorio LECYCA de la Universidad del Bio bío, Chillán. Se tomaron 2 muestras, en el Efluente y Afluente las que fueron llevadas durante el mismo día al laboratorio, en donde se le aplicaron el método EC-MUG, Manual SISS, 2007 de tubos múltiples para estimar la concentración de coliformes fecales presentes en cada una de las muestras.

3.4.1 Programación de la toma de muestras

En total se hicieron 9 viajes desde Concepción a Hualqui, luego a Bulnes y para finalizar a Chillán, lugar donde se encuentra el laboratorio de LECYCA. Ver figura 18.

Se tomaron un total de 27 muestras, 16 en el humedal de la aldea SOS de Bulnes y 11 en Ainahue, Hualqui. La toma de muestras en Bulnes comenzó el día martes 27 de junio y terminaron el día 21 de agosto, por su parte en Ainahue se comenzaron a tomar las muestras el día 24 de julio y finalizaron el 21 de agosto. Ver tabla 17. Los días encerrados en círculos indican que solo se muestreo en el humedal de Bulnes.



Figura 17. Calendario de los viajes realizados.

El horario de extracción de las muestras fue similar en cada viaje, siendo este alrededor de las 11:00 a.m. de cada día en Hualqui. Las extracciones del agua en Bulnes se realizaron posterior a la de Hualqui, siendo ejecutadas alrededor de las 14:00 p.m., así se llevaron las 4 muestras (2 en Hualqui y 2 en Bulnes) al laboratorio en Chillán alrededor de las 3:30 de la tarde cada vez que se muestreo..

3.4.2 Instrucciones para la recolección y transporte de muestra de agua.

Con la finalidad de que los resultados de los análisis solicitados reflejen de la mejor manera posible las características reales del agua al momento de su recolección, se siguieron estrictamente los requerimientos establecidos en la normativa pertinente al tipo de agua que se quiere controlar respecto al perseverante, tiempo transcurrido desde la toma de muestra y la recepción en el laboratorio.

Los requisitos son los siguientes:

- a. Recolectar las muestras únicamente en los envases proporcionados por el laboratorio.
- b. Ejecutar el muestreo de manera que las muestras sean recolectadas en el último momento antes de su transporte. En forma especial programar las muestras que requieran análisis microbiológico.
- c. Ponerse los guantes proporcionados por el laboratorio.
- d. Destapar el envase asignado, girando la tapa conjuntamente con la protección de papel, sin desprenderla.
- e. Llenar el envase, sin enjuagar, hasta aproximadamente $\frac{3}{4}$ de su capacidad, cuidando de no contaminar el gollete del envase.
- f. Volver la tapa a su lugar y asegurar de manera que el papel proteja la tapa y cuello del envase.
- g. Las muestras deben ser tomadas el mismo día del traslado.
- h. Durante el traslado, las muestras deben ser refrigeradas rodeándolas de hielo o icepack al interior de la caja aislante, evitando el congelamiento.

3.4.3 Toma de muestras en la Aldea SOS, Bulnes.

Se tomaron muestras en el afluente y efluente del humedal. Es evidente la diferencia en la calidad del agua de estos. Ver figura 21.

3.4.3.1 Afluente

Las muestras del Afluente en el humedal de la Aldea SOS, fueron extraída en una cámara de monitoreo ubicada a unos 15 metros antes de la entrada al humedal. Ver figura 19

3.4.3.2 Efluente

La toma de muestra del Efluente del humedal, fueron tomadas en la salida de una tubería que transporta el agua que sale del humedal Ver figura 19



Figura 18. Lugar de muestreo del Afluente y Efluente del humedal de Bulnes



Figura 19. Muestras del Afluente y Efluente en el humedal de Bulnes.

3.4.4 *Toma de muestra del Humedal Ainahue, Hualqui.*

En Ainahue se tomaron muestras en el Afluente y Efluente, también, en 2 ocasiones en la salida de la laguna post humedal. Ver figura 22, se pueden observar las 5 muestras.

3.4.4.1 *Afluente*

La toma de muestras del afluente en el humedal de Ahinahue se realizó en una cámara ubicada a unos 90 metros aprox. de la entrada del humedal, esta cámara tiene un cota menor que el humedal, para solucionar este problema, hay una bomba que transporta el agua servida mediante cañerías hacia el humedal.

3.4.4.2 *Efluente*

La toma de muestras del efluente se realizó en la salida del humedal, lugar en donde se encuentra un sifón que permite extraer el agua de buena manera.

3.4.4.3 *Post Laguna*

En este humedal también se tomó muestras del efluente de la laguna que almacena el agua que sale del humedal.

En la figura x se observan las 5 muestras tomadas el lunes 21 de agosto, las primeras 3 del humedal de Ahinahue y las últimas 2 del humedal de La Aldea SOS



Figura 20. Muestras tomadas en ambos humedales.

1 Entrada humedal Ainahue. 2 salida humedal Ainahue 3 Salida de la laguna Ainahue.

4 Entrada humedal aldea SOS. 5 Salida humedal aldea SOS.

3.4.5 Materiales utilizados

3.4.5.1 Frasco

Los envases facilitados por el laboratorio tienen una capacidad de 250 ml. Contienen un preservante adecuado para el tipo de muestra, la tapa es envuelta con un papel café amarrado con una liga. También tiene una etiqueta que se debe llenar con los siguientes datos: nombre de la muestra, fecha, hora, tipo de análisis, preservante y empresa. Vea figura 23



Figura 21. Frasco facilitado por el laboratorio para la toma de muestras.

3.5 Cálculo de Caudal

Los caudales se obtuvieron mediante un aforo, en la aldea SOS se utilizó un recipiente demarcado en los 3 lt. Por su parte en Ainahue se utilizó un balde de 5 lt. De esta manera se cronometra el tiempo en que se llenaban los recipientes y así poder obtener los caudales en cada visita mediante la siguiente fórmula.

Ecuación 6
$$Q = V/t$$

En donde:

Q: Caudal (m³/día).

V: Volumen de aforo (m³).

t: tiempo (días).

3.6 Cálculo de TRH

El tiempo de residencia hidráulico (TRH) es el tiempo que permanece el agua dentro del humedal, según (Gallardo, 2013) a mayor TRH es mayor la remoción de coliformes fecales. Este tiempo se calcula con la siguiente fórmula:

$$\text{Ecuación 7} \quad TRH = (V * K)/Q$$

En donde:

TRH: tiempo de residencia hidráulico (días)

V: Volumen que utiliza el agua dentro del caudal (m³)

Q: Caudal (m³/día)

K: Índice de porosidad del material granular, en este caso 0,35.

3.7 Cálculo de pluviosidad

La pluviosidad promedio de cada ensayo se determinó mediante las pluviosidades de los 4 días anteriores a la extracción de la muestra, se les dio una ponderación que iba subiendo a medida que el día era cercano al día en donde se ensayó. Los datos se obtuvieron del sitio web accuweather (Myers, 2017)

$$\text{Ecuación 8} \quad P = p1 * 0,4 + p2 * 0,3 + p3 * 0,2 + p4 * 0,1$$

En donde:

P: Pluviosidad ponderada (mm).

pn: Pluviosidad de hace n días atrás. (mm).

4. ANÁLISIS Y RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados de la remoción de coliformes fecales obtenidos en cada uno de los humedales, los cuales fueron entregados por el laboratorio certificado LEYCA, de la Universidad de Chillán).

En la tabla VI se resumen los datos medidos y calculados que servirán para los posteriores análisis, se obviaron valores que no entregaron información.

	Muestras	Afluente	Efluente	Eficiencia (%)	Q (m3/día)	TRH (Día)	Precipitación
Bulnes	Muestra 1	240	170	29,17	31,23	0,88	8,7
	Muestra 2	920	280	69,57	26,45	1,04	5,1
	Muestra 3	920	540	66,25	32,40	0,85	5,4
	Muestra 5	1600	170	89,38	21,07	1,31	0,4
	Muestra 6	1600	13	99,19	17,28	1,60	8,1
Hualqui	Muestra 7	920	49	94,67	81,51	1,56	1,4
	Muestra 8	1600	280	82,50	55,38	2,30	0,6
	Muestra 9	1600	240	85,00	30,86	4,12	0
	Muestra 10	1600	23	98,56	27,00	4,71	8,3

Tabla VI Datos obtenidos del laboratorio y calculados.

4.1 Análisis de los CF con respecto a los Caudales.

En los gráficos 2 y 3 se aprecia el nivel de coliformes fecales en el efluente en función de los caudales en los humedales de Bulnes y Hualqui, respectivamente.

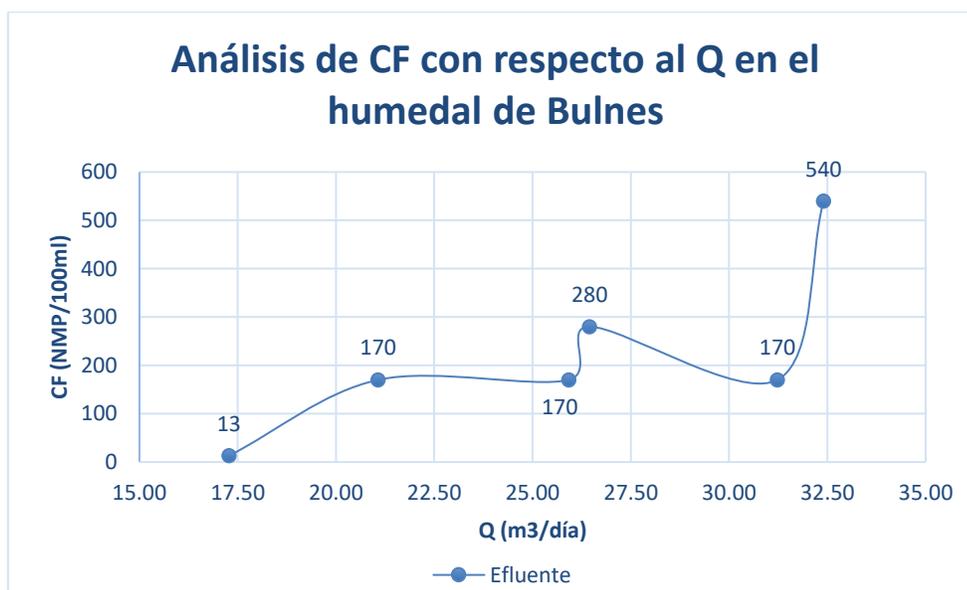


Gráfico 2 análisis de CF Y caudal humedal Bulnes.

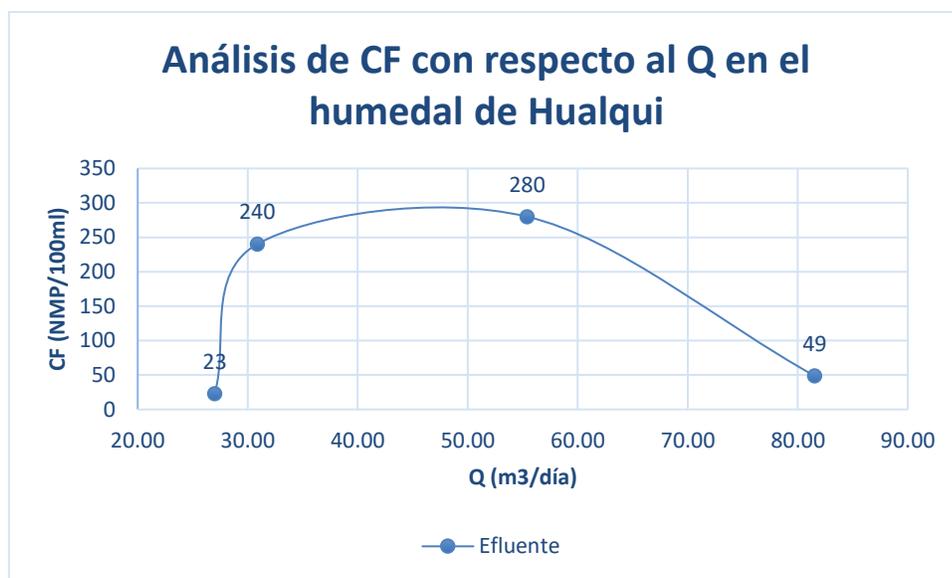


Gráfico 3. Análisis de CF y caudal humedal Hualqui.

Tabla 5. Valores de las concentraciones de coliformes fecales (NMP/ 100ml) de las muestras y porcentaje de remoción de la carga orgánica de las aguas residuales.

Tiempo de retención (días)	COLIFORMES TOTALES		COLIFORMES FECALES	
	Concentración (10 ⁴ NMP/100ml)	Porcentaje de retención	Concentración (10 ⁴ NMP/100ml)	Porcentaje de retención
1	670,0	----	135,0	----
2	560,0	0,16	126,0	0,07
3	480,0	0,28	122,0	0,10
4	450,0	0,33	79,0	0,41
5	370,0	0,45	47,0	0,65
6	200,8	0,70	32,0	0,76
7	170,4	0,75	19,4	0,86
8	150,4	0,78	17,0	0,87
9	130,6	0,81	10,3	0,92
10	96,3	0,86	9,5	0,93

Tabla VII Relación de coliformes fecales y el TRH (Gallardo, 2013).

4.2 Análisis de concentración de CF con respecto al TRH en el efluente

Para estos resultados se consideraron los resultados de ambos humedales. El gráfico 4 muestra la concentración de CF con respecto al TRH.

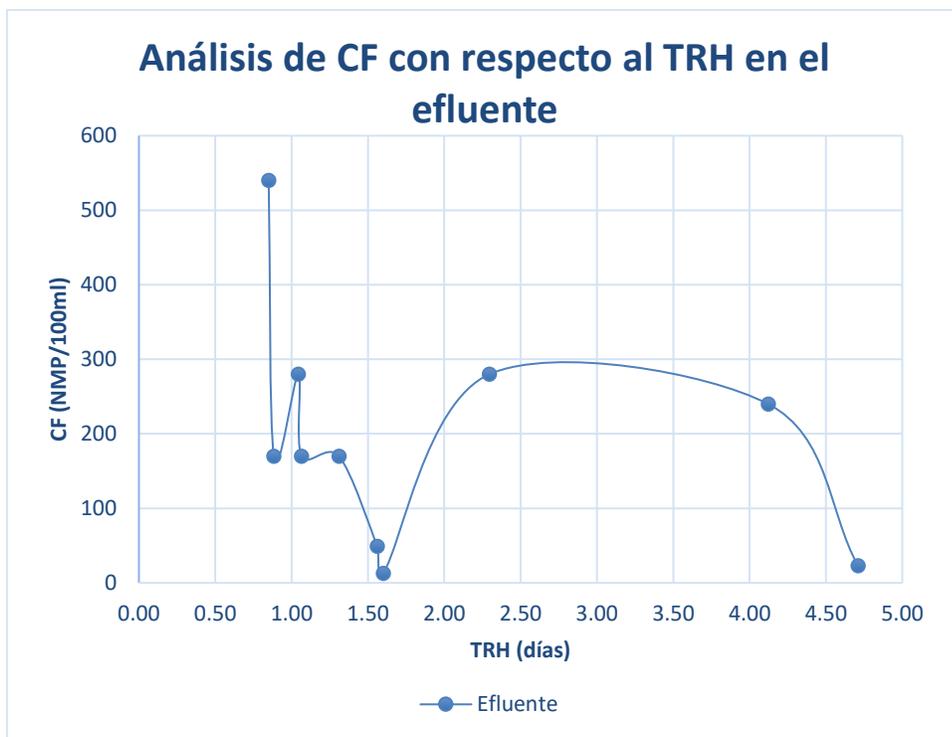


Gráfico 4. Relación de la concentración de CF y TRH en el efluente.

La figura 5 representa la eficiencia de remoción de CF de ambos humedales respecto al TRH.

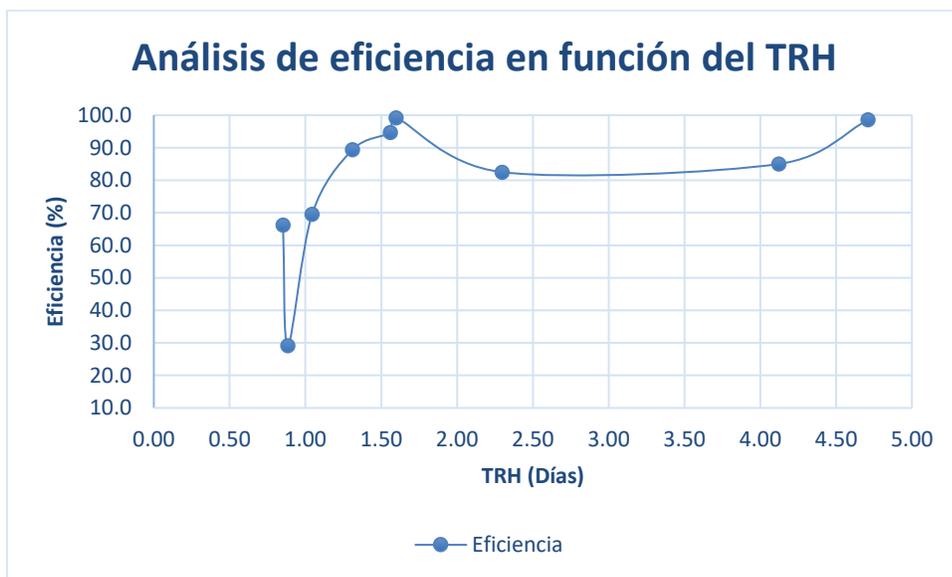


Gráfico 5. Relación eficiencia de los humedales con respecto al TRH.

4.3 Análisis de la concentración de CF y las precipitaciones según los días en donde se obtuvieron las muestras

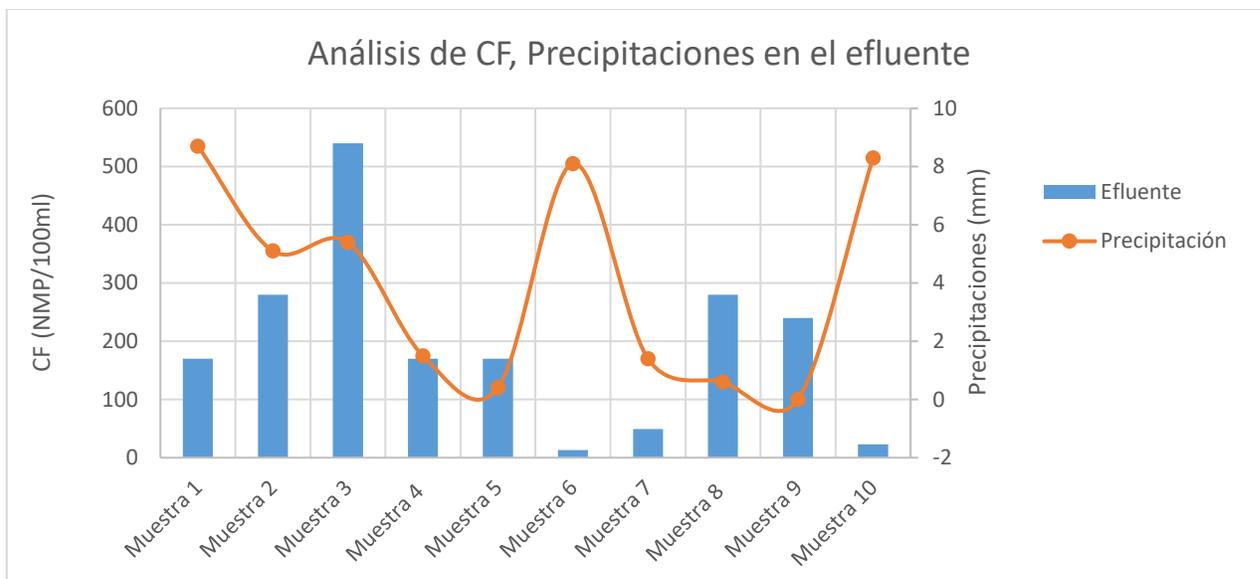


Gráfico 6. Concentración de CF en el efluente y la pluviosidad.

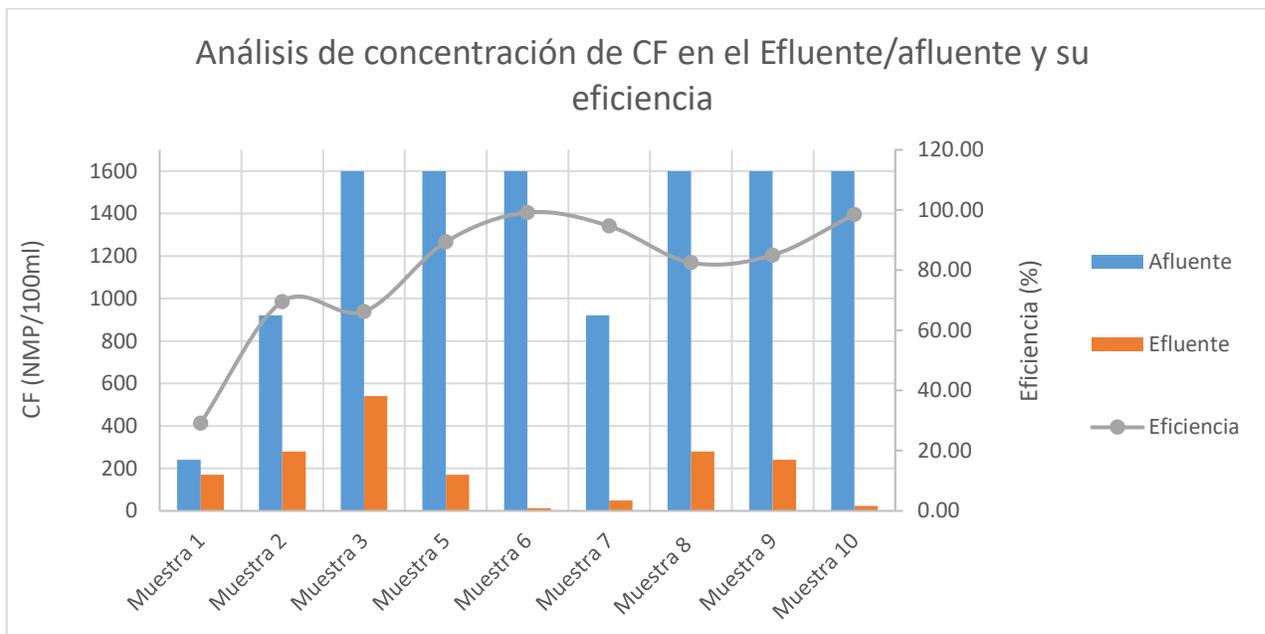


Gráfico 7. Concentración de CF en el Afluente, Efluente y la eficiencia.

4.4 Comentarios y discusión de los resultados obtenidos

De los valores obtenidos y mostrados en las gráficas se puede apreciar el considerable nivel de remoción de coliformes fecales por parte de los humedales estudiados.

En la gráfica de concentración de CF con respecto a los caudales, en el humedal de Bulnes (gráfico 2) se aprecia que a mayor caudal también es más alto la concentración de CF. En el gráfico de concentración de CF y caudal del humedal de Hualqui (gráfico 3) no se encuentra tal relación.

En la gráfica de eficiencia en el efluente con respecto al TRH (gráfico 4) se aprecia una directa relación, mientras más alto sea el TRH, mayor es el porcentaje de eficiencia del humedal, por ende las concentraciones de CF en el efluente son menores a mayor TRH (gráfico 5), esto coincide con lo plasmado en la bibliografía que indica que la eficiencia de un humedal artificial instalado en Perú tiene directa relación con el TRH y una relación inversa entre la concentración de CF y el TRH. (Ver tabla VII) (Gallardo, 2013)

Con respecto a la gráfica de concentración de CF y las precipitaciones caídas durante los días anteriores se observa que entre mayor son las precipitaciones, las concentraciones de CF descienden.

Según la bibliografía, la reducción de coliformes fecales en un humedal artificial de flujo sub superficial está en el orden del 85-95%. Según (González, 2006) la reducción media de los coliformes fecales de las aguas residuales es de 94,14 %. En tanto (Ramos, 2007) establece que los HFSH con plantas de tipo *thipa* tienen una eficiencia de remoción de coliformes fecales de un 88%. Los resultados obtenidos en este estudio tienen una eficiencia promedio de remoción del 79%. Si bien es cierto, el rendimiento es considerable, este se pudo ver afectado por la época en que se hizo el análisis, (época de lluvia), esto provoca un efecto de lavado en la grava removiendo la población microbiana. Esto no permite la generación de toda la biomasa potencialmente desarrollable en la superficie del material granular, por esto se espera que en la época de verano, se alcancen eficiencias más altas, ya que existirá una carga más sostenida y un clima favorable para los procesos biológicos

Los resultados obtenidos en el proyecto mostraron la eficacia del método para la depuración de aguas residuales de una forma natural y económica, con un gasto mínimo de energía y un

mantenimiento relativamente sencillo. En el caso de que se deseara lograr una depuración más completa, se podría complementar con otros sistemas, o bien ampliar la superficie de plantación de macrofitas.

5. CONCLUSIONES

La eficiencia de remoción de coliformes fecales en ambos humedales artificiales monitoreados (80%) está dentro del rango expuesto por la bibliografía.

Las concentraciones de Coliformes fecales en el efluente de los humedales artificiales estudiados cumplen con la NCH1333 por la cual el agua puede ser utilizada para riego y recreación con y sin contacto.

A mayor tiempo de residencia hidráulico en el humedal artificial de flujo sub superficial, mejor es la eficiencia de remoción de coliformes fecales.

La poda de espadaña no interviene en la remoción de coliformes fecales por parte de los humedales artificiales de flujo sub superficial.

6. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar los mismos análisis en época de verano cuando las precipitaciones sean menores o casi nula y las temperaturas sean mayores y más favorables para el funcionamiento del humedal de manera de generar un cuadro comparativo con los resultados obtenidos en este estudio.

7. BIBLIOGRAFÍA

Ahumada-Santos, Y. (2014). Distribución espaciotemporal de la contaminación bacteriana del agua residual agrícola y doméstica descargada a un canal de drenaje.

Benítez Rodas, G. A. (2013). *Análisis y modelización de la inactivación de Escherichia coli en aguas residuales*. Madrid: Memoria, Universidad Complutense de Madrid.

Colombo, L. (2015). *Proceso constructivo de un humedal de flujo sub superficial para tratar aguas del centro recreativo Ainahue*. Concepción: Universidad el Bio bio.

Cortés, F. A. (1995). *Geomorfología de la ribera norte del río Bio Bio en su curso inferior. Limitaciones y potenciales de áreas*. Concepción .

- D'Appollonio, C. (2015). *Evaluación térmica y de oxígeno disuelto en el humedal Ainahue en función del dispositivo de salida*. Concepción: Universidad del Bio bio.
- Delgadillo. (2010). *Depuración de aguas residuales*. Cochabamba: Nelson Antequera Durán.
- Durán, D. R. (2017). *INCIDENCIA DE CONSIDERACIONES DE DISEÑO EN CÁMARAS DE RADIACIÓN SOLAR PARA LA ELIMINACIÓN DE COLIFORMES*. Concepción: Universidad del Bio Bio.
- Fernández Gonzáles, J., de Miguel Beascochea, E., de Miguel Muñoz, J., & Fernández de la Mora, D. C. (2005). *Manual de Fitodepuración filtros de macrofitas en flotación*. Madrid.
- Gallardo, J. L. (2013). *Humedales artificiales en el tratamiento de las aguas residuales domésticas de la mina Barrick*. Trujillo, Perú.
- García, J., & Corzo, A. (2009). *Guía práctica de diseño, construcción, y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial*. Catalunya.
- García, J., & Corzo, A. (2009). *Guía práctica de diseño, construcción, y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial*. Catalunya.
- González, J. F. (2006). Capítulo 6. En J. F. González, *Humedales artificiales*. Madrid: Universidad politecnica de Madrid .
- INE. (2009). *Censo 2002*. Santiago.
- Kadlec RH, W. S. (2009). *Treatment Wetlands. 2nd ed. Taylor & Francis Group*. Boca de Raton, Florida: Scielo.
- Kaiyasi, A. (2001). *The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing*.
- Lara, J. (1999). *Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales*. Barcelona.
- Mara D., C. T. (1992). *The effect of sunlight on fecal coliforms in*.
- Mena, J. (2005). *Depuración de aguas residuales con humedales artificiales: Ventajas de los sistemas híbridos*.

- Metcalf & Eddy. (2003). *Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización*. Madrid: McGraw-Hill.
- Myers, J. N. (09 de Septiembre de 2017). *Accuweather*. Obtenido de Accuweather: <https://www.accuweather.com/es/cl/bulnes/57572/july-weather/57572?monyr=7/1/2017&view=table>
- Oakley, S. (2005). *Lagunas de estabilización en Honduras; manual, diseño, construcción, operación y mantenimiento, monitoreo y sostenibilidad*. Honduras: Red Regional de Agua y Saneamiento de centro america.
- Ramalho, R. (1996). *Tratamiento de aguas residuales*. Reverte.
- Ramalho, R. S. (1998). *Tratamiento de aguas residuales*. Barcelona, España: Reverté, S.A.
- Ramos, M. G. (2007). *Uso de macrofitas acuáticas en el tratamiento de aguas para el cultivo de maíz y sorgo*. Mexico: Scielo.
- Romero. (2002). *Calidad del agua*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de ingeniería.
- Romero. (2004). *TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES TEORÍA Y PRINCIPIOS DE*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de ingeniería.
- Romero Tous, M. (2009). *Energía solar térmica*. Barcelona, España: CEAC.
- SAG. (2005). *CRITERIOS DE CALIDAD DE AGUAS O EFLUENTES TRATADOS PARA USO DE RIEGO*. Santiago: Universidad de Chile.
- Silva, G. (2015). *INCIDENCIA DEL DISPOSITIVO DE SALIDA DEL EFLUENTE EN LA EFICIENCIA DEL HUMEDAL*. Concepcion .
- Solórzano, R. H. (2017). *Cinética de decaimiento de coliformes fecales en un humedal artificial*. Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de tecnología del agua.
- Steer, D. (2002). *Efficiency of small constructed wetlands for subsurface treatment of single-family domestic effluent*.
- Tchobanoglous, C. y. (1999). *Características de las aguas residuales*.
- Torres, E. R. (2003). *Estudio climatológico de las áreas de Bulnes, Los Angeles y Collipulli; Purranque y Frutillar*.

