UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

Repositorio Digital USM **https://repositorio.usm.cl**

Departamento de Ingeniería Química y Ambiental Ingeniería Civil Ambiental

2018

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

PARRAO LÓPEZ, LEONARDO ANDRÉS

https://hdl.handle.net/11673/47123

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL
VALPARAÍSO – CHILE

"Diseño y Construcción de un Prototipo de Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial para el Tratamiento de aguas Residuales Domesticas"

Leonardo Andrés Parrao López

Memoria para optar al título de:
Ingeniero Civil Ambiental

Profesor Guía Dr. Henrik Hansen

Profesor Correferente Camila Mery

Noviembre 2018

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todos porque de alguna forma ayudaron en el proceso. Algunos me obligaron a terminar la memoria, otros me alentaron durante el proceso, otros me dieron una mano en algunos temas y otros estuvieron al lado mío como apoyo en tiempos difíciles.

Cuando comencé el trabajo de esta memoria no imaginé lo difícil que me resultaría terminar mi ciclo, sin embargo, esta memoria es la culminación de un trabajo que ha requerido un gran esfuerzo prolongado en el tiempo. El camino hasta aquí ha sido largo, duro y lleno de dudas, pero ha merecido la pena llegar y me siento muy orgulloso de ello. Es enorme la satisfacción de terminar lo empezado, de querer avanzar siempre, de querer seguir creciendo y nunca dejar de aprender de las vivencias positivas y negativas experimentadas.

DEDICATORIA

Dedico esta memoria a todos aquellos que se quieran aventurar en el mundo de los humedales artificiales y naturales, conociendo sus características de fitodepuración e importancia ecosistémica.

"La capacidad de entender y aprender de la naturaleza es infinita.
Observemos y convivamos con ELLA"

RESUMEN

La utilización de humedales artificiales en el tratamiento de aguas servidas está siendo ampliamente utilizados en la actualidad en países como Francia, Alemania, Dinamarca e Italia, entre otros; con el fin de tratar las aguas residuales de manera natural, sin utilización de energía, y junto a ello, reutilizándola principalmente en riego, disminuyendo el consumo de agua en lugares donde esta necesidad básica está en vías de agotarse. Sumado a esto, el aumento de residuos biológicos y químicos en las aguas superficiales, presiona la creación de una alternativa de bajo costo para el tratamiento de agua, en comparación a las convencionalmente utilizadas.

El objetivo principal de este estudio fue determinar la capacidad de remoción de contaminantes de aguas residuales negras, mediante el tratamiento de humedales artificiales a nivel domiciliario.

Se estudiaron los diferentes mecanismos de remoción de contaminantes de estos sistemas, parámetros y criterios de diseño, para luego llevar a cabo la construcción de un humedal artificial como prototipo en la localidad de Pomaire, Región Metropolitana, Chile, para finalmente, analizar las tasas de remoción de cada contaminante presente en las aguas.

La tasa de remoción de materia orgánica removida por la especie de planta utilizada *Scirpus* spp., fue determinada mediante los parámetros de Demanda Química de Oxigeno, Demanda Biológica de Oxigeno, Fósforo, Nitrógeno Total Kjeldahl y Sólidos Suspendidos Totales, entre otros.

Los resultados obtenidos a través de análisis físico-químicos de las aguas, demostró que en un periodo de tres años, una vez estabilizado el sistema, se produce del orden de 77% a 94% de remoción de los componentes de aguas servidas, tales como: Demanda química de oxigeno, sólidos suspendidos totales, sólidos sedimentables, fósforos, grasas y aceites, y coliformes totales. Sin embargo, para el sistema estudiado, se obtuvieron valores más bajos de remoción en la demanda biológica de oxígeno y nitrógeno, estando dentro del orden de 53% y 29% respectivamente, parámetros que serán estudiados más detalladamente en futuros sistemas.

Los humedales artificiales son sistemas eficientes en la remoción de contaminantes para las aguas residuales domiciliarias, y con bajos costos de construcción, operación y mantención

ABSTRACT

The use of artificial wetlands for the treatment of wastewater is being used widely in countries such as France, Germany, Denmark and Italy, among others; in order to treat the wastewater naturally, without the use of energy and with the advantage of reusing it, for example, in irrigation systems, in order to reduce water consumption in places where this basic need, is becoming exhausted. Moreover, the increased biological and chemical waste in superficial water bodies, is pushing the need to create an alternative system for water treatment, low cost, in comparison to those conventionally used.

This main objective of this study, is to determine the pollutant removal capacity of artificial wetlands for residential wastewater.

The different removal mechanisms of pollutants from these systems, parameters and design criteria were studied, to then carry out the construction of an artificial wetland as a prototype in the town of Pomaire, Región Metropolitana, Chile, to finally analyze the removal rates of each pollutant.

The removal rate of organic matter by the plant, Scirpus spp., was determined by the parameters of Chemical Oxygen Demand, Biological Oxygen Demand, Phosphorus, Total Kjeldahl Nitrogen and Total Suspended Solids, among others.

The results obtained through physico-chemical analysis of the waters, showed that the removal of wastewater components, in a period of three years, once the system stabilized, occurs in the order of 77% to 94%, components such as: Chemical oxygen demand, total suspended solids, settleable solids, phosphorus, fats and oils, and total coliforms. However, for the studied system, lower removal values were obtained in the biological oxygen demand and nitrogen, being in the order of 53% and 29% respectively, parameters that will be studied in more detail in future systems.

Artificial wetlands are efficient systems in the removal of pollutants for domestic wastewater, with low construction, operation and maintenance costs.

GLOSARIO

Aeróbicas: Condición en presencia de oxígeno.

Afluente: Aguas negras o parcialmente tratado, que entra a un depósito, estanque.

Aguas grises: Son las aguas producidas por el uso doméstico excepto las del inodoro. Provienen de lavamanos, lavaplatos, ducha, lavadoras. Estas contienen principalmente grasas, sedimentos y restos de comida.

Aguas industriales: Son las aguas que provienen de la actividad industrial en cuyo proceso se utilice agua.

Aguas negras: Que son la mezcla de agua y excretas y posee alta cantidad de nutrientes y patógenos, proviene básicamente de los domicilios de inodoros y urinarios.

Aguas pluviales: Son las aguas generadas por lluvias, que no son infiltradas por el suelo por lo que terminan en el alcantarillado.

Anaeróbicas: Condición sin presencia de oxígeno.

Coliformes totales: Conjunto de especies bacterianas que tienen ciertas características bioquímicas en común e importancia relevante como indicadores de contaminación del agua y los alimentos.

Coliformes fecales: Es un subgrupo de bacterias coliformes totales que se encuentran en grandes cantidades en los intestinos y excrementos de los humanos y animales

Demanda Bioquímica de Oxigeno: Es una prueba usada para la determinación de los requerimientos de oxígeno para la degradación bioquímica de la materia orgánica en las aguas municipales, industriales y en general residuales.

Demanda Química de oxigeno: Es un parámetro que mide la cantidad de sustancias susceptibles de ser oxidadas por medios químicos que hay disueltas o en suspensión en una muestra líquida. Aunque este método pretende medir principalmente la concentración de materia orgánica, sufre interferencias por la presencia de sustancias inorgánicas susceptibles de ser oxidadas.

Efluente: Agua que sale de un depósito o termina una etapa o el total de un proceso de tratamiento.

Fosa Séptica: Es un tanque de sedimentación de acción simple, en el que los lodos sedimentados están en contacto inmediato con las aguas negras que entran al tanque, mientras los sólidos orgánicos se descomponen por acción bacteriana anaerobia

Geomembrana: Es la lámina impermeable hecha a partir de diferentes resinas plásticas, su presentación es en rollos y viene en diferentes espesores, cada material sintético tiene cualidades físicas y químicas distintas que hacen la diferencia para cada geomembrana.

Grasa: En aguas negras, el término grasa incluye a las grasas propiamente dichas, ceras ácidos grasos libres, jabones de calcio y de magnesio, aceites minerales y otros materiales no grasosos.

Humedal Artificial: Denominado también biofiltro, filtro fitodepurador o pantano seco artificial, puede ser usado como el tratamiento secundario de las aguas residuales, instalándose de forma continua a un sistema de pretratamiento

Humedal Artificial superficial: Permite que el agua fluya sobre el terreno, expuesta a la atmósfera y al sol directo. El estanque es recubierto con una barrera impermeable, cubierta con una pequeña porción de piedras, grava o tierra para fijar las plantas y se planta vegetación sobre esta.

Humedal Artificial subsuperficial: El agua fluya a través del sustrato soportante, lo que permite que no esté expuesta a la atmósfera ni al sol directo. El estanque es recubierto con una barrera impermeable, rellenada con piedras y grava como soporte para fijar las plantas.

Junco: Planta de la familia de las juncáceas, con tallos de seis a ocho decímetros de largo, lisos, cilíndricos, flexibles, puntiagudos, duros, y de color verde oscuro por fuera y esponjosos y blancos en el interior; hojas radicales reducidas a una vainilla delgada, flores en cabezuelas verdosas cerca de la extremidad de los tallos, y fruto capsular con tres ventallas y muchas semillas en cada una de ellas. Crecen en parajes húmedos.

Lodos: Los sólidos depositados por las aguas negras, o desechos industriales, crudos o tratados, acumulados por sedimentación en tanques y que contienen más o menos agua para formar una masa semilíquida.

Napa freática: Es el acuífero más cercano a la superficie del suelo.

Oxígeno Disuelto: Es la cantidad de oxígeno que está disuelta en el agua y que es esencial para los riachuelos y lagos saludables. El nivel de oxígeno disuelto puede ser un indicador de cuán contaminada está el agua y cuán bien puede dar soporte esta agua a la vida vegetal y animal.

Patógeno: Que origina y desarrolla una enfermedad.

Rizoma: Tallo horizontal y subterráneo.

Sedimentación: El proceso de asentar y depositar la materia suspendida que arrastra el agua, las aguas negras u otros líquidos, por gravedad. Esto se logra usualmente

disminuyendo la velocidad del líquido por debajo del límite necesario para el transporte del material suspendido. También se llama asentamiento.

Sólidos Sedimentables: Sólidos suspendidos que se asientan en el agua, aguas negras, u otro líquido en reposo, en el periodo razonable. Tal periodo se considera, aunque arbitrariamente, igual a una hora.

Solidos suspendidos totales: Parámetro utilizado en la calificación de la calidad del agua y en el tratamiento de aguas residuales. Indica la cantidad de sólidos (medidos habitualmente en miligramos por litro - mg/l), presentes, en suspensión y que pueden ser separados por medios mecánicos

Tiempo de residencia hidraulico: El tiempo teóricorequerido para desalojar el contenido de un tanque o una unidad, a una velocidad o régimen de descarga determinado (volumen dividido por el gasto).

Totora: Planta perenne, común en esteros ypantanos, cuyo tallo erguido mide entre unoy tres metros, según las especies. Tiene usoen la construcción de techos y paredes para cobertizos y ranchos.

Trampas de Grasa: También denominada desgrasadora y se utiliza para separar la grasa flotante o espuma, previo a la descarga de una fosa séptica.

Tratamiento Primario: Proceso anaeróbico de la eliminación de sólidos.

Tratamiento Secundario: Tratamiento donde la descomposición de los sólidos restantes, es hecha por organismos aeróbicos.

Lista de abreviaturas:

AG	Aguas grises
AR	Aguas residuales
C/N	Relación carbono-nitrógeno
DBO5	Demanda bioquímica de oxígeno después de 5 días
DQO	Demanda química de oxígeno
FS	Flujo superficial (Free Water Surface, siglas FWS, en inglés)
FSS	Flujo subsuperficial (Subsurface Flow, SSF en ingles)
hab	habitante (= persona)
HA	Humedal artificial (en plural: HHAA)
HAFS	Humedal artificial de flujo superficial
HAFSS	Humedal artificial de flujo subsuperficial
HFH	Humedal de flujo horizontal (este es un tipo de humedal de FS)
HFV	Humedal de flujo vertical (este es un tipo de humedal de FS)
MO	Materia orgánica
NMP	Número más probable
NT	Nitrógeno total
NTK	Nitrógeno total de Kjeldahl, suma del nitrógeno orgánico y amoniacal
N/A	no aplicable
PE	Persona equivalente (también llamado p.e.)
PT	Fósforo total
PTAS	Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas
PrTr	Pretratamiento
SISS	Superintendencia de Servicios Sanitarios
SS	Sólidos sedimentables
SST	Sólidos suspendidos totales

ÍNDICE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS **2**

DEDICATORIA **3**

RESUMEN **4**

GLOSARIO **6**

ÍNDICE CONTENIDO **10**

ÍNDICE FIGURAS **13**

ÍNDICE TABLAS **14**

1. INTRODUCCIÓN **15**

2. ANTECEDENTES **16**

2.1 SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN CHILE. 16
2.2 MARCO NORMATIVO REFERIDO A LAS AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS 19
2.3 TECNOLOGÍAS EMERGENTES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. 21

3. OBJETIVOS **22**

3.1 OBJETIVO GENERAL 22
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 22

4. MARCO TEÓRICO DE HUMEDALES **23**

4.1 HUMEDALES NATURALES 23
4.1.1 HUMEDALES EN CHILE 25
4.2 HUMEDALES ARTIFICIALES 26
4.2.1 TIPOS DE HUMEDALES ARTIFICIALES 26
4.2.1.1 Humedales de Flujo Superficial o Libre 27
4.2.1.2 Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial 28
4.2.1.2.1 Humedales Subsuperfirciales de Flujo Horizontal. 29
4.2.1.2.2 Humedales Subsuperficiales de Flujo Vertical 30
4.3 COMPONENTES PRINCIPALES DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES 31
4.3.1 AGUA 31

4.3.2 SOPORTE....32
4.3.3 VEGETACIÓN....32
4.3.4 MICROORGANISMOS. 34
4.4 MECANISMOS DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES....35
4.4.1 FÍSICO 35
4.4.2 BIOLÓGICO....36
4.4.3 QUÍMICO 36
4.5 REMOCIÓN DE TIPOS DE CONTAMINANTES 37
4.5.1 REMOCIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS....37
4.5.2 REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA 37
4.5.3 REMOCIÓN DE NITRÓGENO....38
4.5.4 REMOCIÓN DE FÓSFORO....40
4.5.5 REMOCIÓN DE METALES PESADOS....41
4.5.6 REMOCIÓN DE PATOGENOS....41
4.5.7 OTROS PARÁMETROS RELEVANTES....41
4.5.7.1 Grasas y aceites....41
4.5.7.2 Salinidad....42
4.5.7.3 pH....43
4.6 VALORES DE LOS PARÁMETROS....43
5. DISEÑO DE HUMEDAL ARTIFICIAL....45
5.1 ELECCIÓN DEL SISTEMA A DISEÑAR....45
5.2 DISEÑO BIOLÓGICO 45
5.3 DISEÑO HIDRÁULICO....48
5.4 CRITERIOS DE DISEÑO....49
5.4.1 PROFUNDIDAD DEL HUMEDAL. 49
5.4.2 RELACIÓN LARGO ANCHO 50
5.4.3 PENDIENTE. 50
5.4.4 GRADIENTE HIDRAULICO....50
5.4.5 SUSTRATO 51
5.5 DIMENSIONAMIENTO HUMEDAL SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL....52
6. CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DEL HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL....53
6.1 CONSTRUCCIÓN....53
6.1.1 SISTEMA PRETRATAMIENTO 53
6.1.2 HUMEDAL ARTIFICIAL....54
6.1.2.1 Agua Residual. 54
6.1.2.2 Material Aislante. 54
6.1.2.3 Sistema de entrada y salida de aguas 55
6.1.2.4 Soporte. 58
6.1.2.5 Vegetación....59

6.1.3 SISTEMA ACOPIO Y RIEGO DE AGUA TRATADA 61
6.2 OPERACIÓN Y MANTENCIÓN 63

7. RESULTADOS Y DISCUSIONES 64

7.1 MUESTREOS DEL HUMEDAL ARTIFICIAL 64
7.1.1 PLANIFICACIÓN DE MUESTREO 64
7.1.2 MEDICIONES DE CALIDAD DEL AGUA 64
7.1.3 ANÁLISIS DE LABORATORIO 66
7.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS 67
7.2.1 ANÁLISIS CUALITATIVO 67
7.2.2 ANÁLISIS CUANTITATIVO 68
7.2.2.1 Salinidad 68
7.2.2.2 pH 69
7.2.2.3 Grasas y aceites 69
7.2.2.4 Solidos suspendidos totales 69
7.2.2.5 Demanda biológica de oxigeno 70
7.2.2.6 Demanda química de oxigeno 71
7.2.2.7 Nitrogeno Total Kjeldahl 72
7.2.2.8 Fósforos totales 72
7.2.2.9 Coliformes totales 73
7.2.3 EFICIENCIA DE REMOCIÓN 74

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 77

8.1 CONCLUSIONES 77
8.2 RECOMENDACIONES 78

9. BIBLIOGRAFÍA 80

10. ANEXOS 83

10.1 ANEXO A 83
10.2 ANEXO B 86
10.3 ANEXO C 88

ÍNDICE FIGURAS

FIGURA 1. ESQUEMA TIPO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO EN CHILE. 17
FIGURA 2. TECNOLOGÍAS UTILIZADAS EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES 2015. 19
FIGURA 3. CLASIFICACIÓN DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES 27
FIGURA 4. SISTEMA DE AGUA SUPERFICIAL LIBRE. 28
FIGURA 5. SISTEMA DE FLUJO BAJO LA SUPERFICIE 29
FIGURA 6. HUMEDAL SUBSUPERFICIAL DE FLUJO HORIZONTAL 30
FIGURA 7. HUMEDAL SUBSUPERFICIAL DE FLUJO VERTICAL 31
FIGURA 8. PLANTAS TÍPICAS UTILIZADAS EN HUMEDALES ARTIFICIALES. 34
FIGURA 9. DIAGRAMA DEL METABOLISMO DEL NITRÓGENO. 39
FIGURA 10. ESQUEMA SISTEMA DE PRETRATAMIENTO 53
FIGURA 11. IMPERMEABILIZACIÓN HUMEDAL ARTIFICIAL 54
FIGURA 12. INSTALACIÓN ENTRADA DESDE FOSA SÉPTICA. 55
FIGURA 13. INSTALACIÓN ENTRADA DE AGUAS CONTAMINADAS. 56
FIGURA 14. INSTALACIÓN SALIDA DE AGUAS TRATADAS. 57
FIGURA 15. INSTALACIÓN DE TUBERÍA DE SALIDA. 57
FIGURA 16. TIPOS DE MATERIAL SOPORTANTE. 58
FIGURA 17. INCORPORACIÓN MATERIAL SOPORTANTE. 59
FIGURA 18. PLANTACIÓN *SCIRPUS SPP.* 60
FIGURA 19. PLANTAS *SCIRPUS SPP Y CANNA INDICA.* 60
FIGURA 20. CONSTRUCCIÓN SISTEMA DE ALMACENAJE AGUA TRATADA 61
FIGURA 21. SISTEMA ALMACENAJE Y RIEGO. 62
FIGURA 22. SISTEMA RIEGO POR GOTEO 62
FIGURA 23. FRASCOS DE MUESTRAS. 65
FIGURA 24. ROTULADO DE MUESTRAS. 65
FIGURA 25. CONSERVACIÓN DE MUESTRAS 66
FIGURA 26. SISTEMA EN OPERACIÓN. 67
FIGURA 27. SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES. 70
FIGURA 28. DEMANDA BIOLÓGICA DE OXIGENO 71
FIGURA 29. DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO 71
FIGURA 30. NITRÓGENO TOTAL KJELDAHL. 72
FIGURA 31. REMOCIÓN DE FOSFORO. 73
FIGURA 32. COLIFORMES TOTALES 74
FIGURA 33. EFICIENCIA DE REMOCIÓN EN EL TIEMPO 75

ÍNDICE TABLAS

TABLA 1. CLASIFICACIÓN DE LA SALINIDAD DEL AGUA SEGÚN SU CONDUCTIVIDAD. 43
TABLA 2. CARACTERÍSTICAS AGUAS SERVIDAS 44
TABLA 3. PENETRACIÓN DE LAS RAÍCES DE LAS PLANTAS EMERGENTES 50
TABLA 4. PARÁMETROS MEDIO SOPORTANTE 51
TABLA 5. RESUMEN DIMENSIONAMIENTO HUMEDAL ARTIFICIAL 52
TABLA 6. FECHAS DE MUESTREO. 64
TABLA 7. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS. 66
TABLA 8. RESUMEN VALORES DE ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS. 68
TABLA 9. TABLA RESUMEN DE EFICIENCIAS. 75

1. INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas hemos visto como la zona central de Chile ha comenzado a desertificarse debido al avance de la zona norte hacia el sur, influyendo en que exista escases tanto de agua potable, como agua para los cultivos agrícolas de las localidades aledañas, viéndose afectados los pequeños locatarios y agropecuarios de la zona. Esto ha significado que, para las autoridades, así como también para la población, la temática de abastecimiento y utilización del agua sea una prioridad de vital importancia, lo que se refleja en la búsqueda de nuevas tecnologías y sistemas más eficientes que permitan hacer un buen uso del recurso hídrico.

Dentro de las problemáticas para hacer un buen uso del recurso hídrico, encontramos que en los actuales sistemas de tratamientos de aguas residuales urbanas, se observan las saturaciones de las plantas ya existentes, debido al aumento de la población durante las últimas décadas, junto con los elevados costos de inversión, operación y mantención que estos sistemas conllevan. Además, las localidades más pequeñas y aisladas aun no poseen sistemas de tratamiento de aguas residuales, utilizando generalmente las llamadas fosas sépticas o pozos absorbentes para los sectores rurales.

Por otra parte, vemos como la industria agrícola ha crecido enormemente durante los últimos 30 años, a causa de las nuevas tecnologías y la gran inversión por parte de privados. Esto se debe a que Chile es la contra estación de los países del hemisferio norte y que los últimos años los mercados internaciones son bastante prometedores para la agricultura en cuanto a la exportación de sus productos. La problemática que esto trae, es el aumento significativo en el uso del recurso hídrico por parte de esta industria llegando a ser, junto con la minería, el sector que mayormente utiliza el agua para su desarrollo. Como consecuencia el agua utilizada retorna a las fuentes hídricas como agua residual sin tratar en la mayoría de los casos, generando contaminación y disminuyendo la calidad de vida de las comunidades con sus consiguientes impactos, sociales y ambientales.

La problemática de abastecimiento de agua tanto en Chile como internacionalmente, pone a muchos en la búsqueda de soluciones para el consumo, como su posterior tratamiento o disposición.

2. ANTECEDENTES

2.1 Sistemas de tratamiento de aguas residuales en Chile.

Los sistemas de tratamiento de aguas servidas en Chile, están constituidos generalmente de los sistemas de lodos activados, que consisten de un pre-tratamiento, tratamiento primario, secundario y terciario en algunos casos. Según se muestra en la figura 1 (ASH, 2004).

El pretratamiento consiste en el desbaste de los sólidos u objeto de gran tamaño a través de rejillas, comúnmente se identifican como basura, toallas, papel higiénico, ramas, madera, etc. Luego viene el desarenado y desengrasado que son sistemas que funcionan por sedimentación evitando el paso de sólidos o grasas a las siguientes etapas. Los sólidos de gran tamaño, grasas y arena, una vez recolectadas son enviadas a un vertedero autorizado.

El tratamiento primario consiste en la decantación para eliminar pequeñas partículas que hayan superado el pretratamiento.
Posteriormente el tratamiento secundario consiste en la agitación y oxigenación del agua, a través de sistemas mecánicos de aireación, decantación y sedimentación, para activar los microorganismos encargado de eliminar la materia orgánica disuelta.

Finalmente, el tratamiento terciario, son los tratamientos físico-químicos destinados a desinfectar el efluente. Los tipos de tratamientos más usados son decantación y filtración, para luego desinfectarla con gas cloro dosificado. Una vez tratada el agua se devuelve a cauces de ríos, lagunas, esteros o canales. (ASH, 2004)
Los lodos generados en las etapas de decantación, son separados y reciben tratamiento especial (espesamiento, digestión anaeróbica, deshidratación) hasta que cumplan con la normativa que permite su traslado a vertederos autorizados o puedan ser incinerados. Existen otros tratamientos extras como estabilización o compostaje que permite la reutilización de este residuo como abono en la agricultura y otros usos.

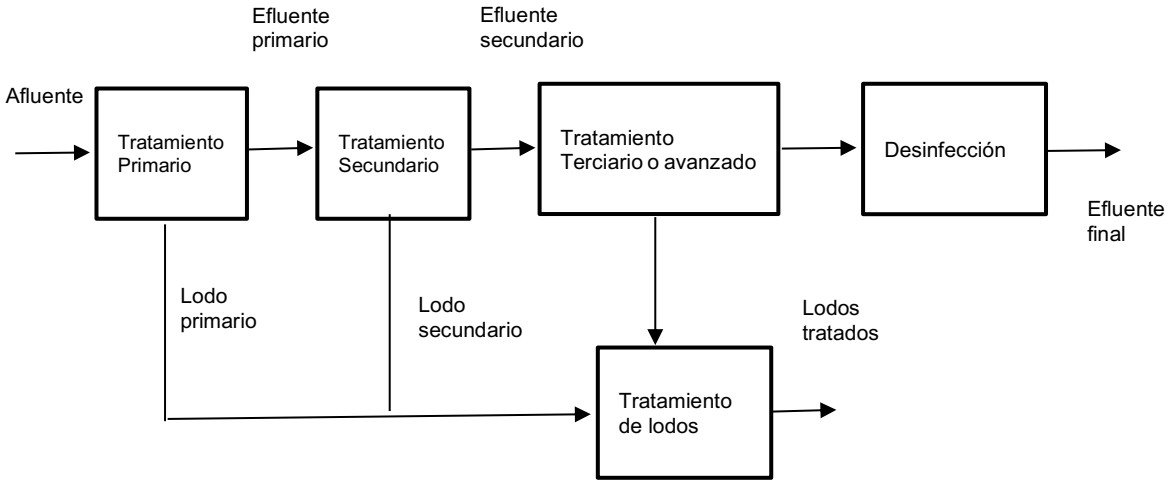

Figura 1. Esquema tipo de plantas de tratamiento en Chile.

Fuente: **(ASH, 2004)**

El tratamiento de las aguas servidas recolectadas es primordial, para que al momento de ser devueltas al medio ambiente no dañen la flora y la fauna. De los tratamientos explicados anteriormente, los tratamientos primarios con emisarios se utilizan para las aguas que se disponen en el mar. Los líquidos tratados se internan mar adentro a grandes profundidades, en la cual se diluyen naturalmente y con la salinidad del mar se completa el proceso de reciclaje de las aguas residuales. Por otro lado, las plantas de tratamientos biológicos (lagunas de estabilización o lodos activados) son para aguas que se disponen en cauces naturales como ríos y esteros, estas pueden ser utilizadas de manera segura para labores de riego (Esval, 2014).

Actualmente el tratamiento de las aguas servidas se he incrementado en todo el país y en los últimos años alcanza un nivel de cobertura cercano al 99.8% respecto de las aguas servidas recolectadas (por el sistema de alcantarillado) sólo de la población urbana nacional. En este contexto a la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS) le corresponde velar porque las Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas (PTAS) cumplan con un estándar de calidad que permita la disposición de las aguas servidas tratadas a los cuerpos receptores y se efectúe de acuerdo a la normativa vigente. Esta acción la SISS la realiza a través de la fiscalización sobre el autocontrol, la realización de controles directos e inspecciones en terreno. Se ha observado según las cifras entregada por SISS en 2015 el consumo promedio mensual por casa fue de 18,44 metros cúbicos (m^3), en tanto que el

consumo total de agua potable en los centros urbanos del país fue de 1.128 millones de m^3, superior en 1,57% respecto de 2014 (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2015)

En la Región Metropolitana siguen observándose los más altos consumos promedio mensuales por hogar del país, superior a los 21 m^3 al mes. En el otro extremo se ubican las regiones del Maule, Los Ríos y Los Lagos que no superan los 14 metros cúbicos mensuales promedio. La dotación promedio en el año 2015 fue de 137 litros de agua potable por habitante al día, oscilando entre 69,2 litros diarios en Melipilla Norte y sobre 457 litros diarios promedio en el sector atendido por Aguas Manquehue en la Región Metropolitana. La cobertura urbana de agua potable a nivel nacional es de 99,9%, en tanto que la de alcantarillado aumentó de 96,5% a 96,8% el último año, mientras que la cobertura de tratamiento de las aguas servidas recolectadas mediante sistemas de alcantarillado fue de 99,85% respecto a la población que cuenta con redes de alcantarillado que alcanza a los 16.309.527 habitantes, menor valor a la cobertura 2014 ya que en las localidades de Chañaral y El Salado las plantas de tratamiento de aguas servidas quedaron fuera de operación luego de los aluviones, situación que a diciembre de 2015 se mantenía. A diciembre del año 2015 en Chile existían 290 sistemas de tratamiento de aguas servidas en funcionamiento operados por las empresas sanitarias en las zonas urbanas (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2015)

La tecnología más usada actualmente en los sistemas de tratamiento de aguas servidas corresponde a la de Lodos Activados con un 60% del total de PTAS, aumentando en un punto porcentual respecto al año 2014 y alcanzando los 173 sistemas. En cuanto al número de sistemas en base a Emisarios Submarinos y Lagunas Aireadas, éstos se mantienen, siendo 33 y 56 sistemas respectivamente. La figura 2 se presentan las distintas tecnologías de tratamiento de aguas servidas, utilizadas actualmente en Chile.

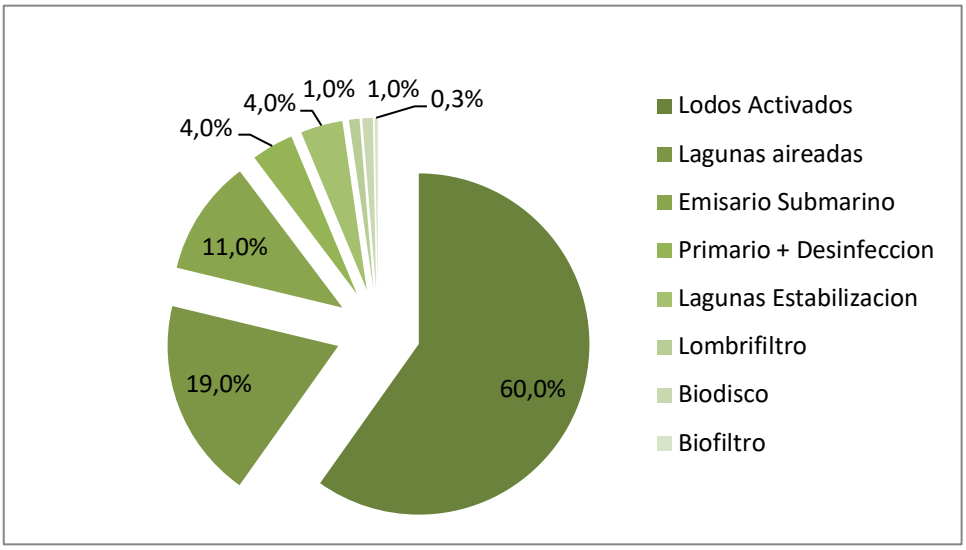

Figura 2. Tecnologías utilizadas en tratamiento de aguas residuales 2015.

Fuente: (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2015)

2.2 Marco Normativo referido a las Aguas Residuales Domesticas

Hoy en día en Chile, la legislación que existe respecto a la forma de disponer las aguas residuales hace una separación de dos grupos potencialmente contaminantes, que son: las aguas residuales industriales y las aguas residuales domésticas. Respecto a las aguas residuales domésticas, la legislación chilena establece normativas por separado de acuerdo a la manera de disposición de las aguas residuales provenientes de alcantarillado público y las provenientes de alcantarillado particular.

A continuación, se pretende dar una orientación de los distintos reglamentos y normas a los que están sujetos los sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas, en especial los que se refieren a sistemas individuales. Además, mencionar los distintos organismos que velan porque se cumplan dichas disposiciones.

- Ley sobre bases generales del medio ambiente ley 19.300. Esta ley hace referencia a todas las actividades que sean susceptibles de causar impacto ambiental. Se señalan las actividades que pueden producir específicamente contaminación de recursos hídricos y se establecen áreas de protección, además se indica que los respectivos organismos encargados de la protección de los distintos recursos naturales deben velar por el cumplimiento de las normas.

- Código sanitario decreto con fuerza de ley n° 725. Establece el cumplimiento de los reglamentos y normas que resguardan las condiciones sanitarias de todos los ambientes susceptibles de ser contaminados producto de las actividades humanas, de manera de proteger la salud e higiene ambiental de la población.

- Código de aguas. Decreto con Fuerza de Ley 1122. Vela por la protección de todos los recursos hídricos. Regula el aprovechamiento de aguas y prohíbe cualquier tipo de contaminación que pudiera afectar dicho aprovechamiento.

- Decreto Supremo MOP N°609 de 1998. Establece norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos industriales líquidos a sistemas de alcantarillado.

- Decreto Supremo MINSEGPRES N°90 de 2000. Establece la norma de emisión aguas marinas y continentales superficiales.

- Decreto Supremo MINSEGPRES N°46 de 2002. Establece la norma de emisión de residuos liquidos a aguas subterráneas.

- Decreto Supremo MOP N° 50 de 2003 Reglamento de Instalaciones Domiciliarias de Agua Potable y Alcantarillado (RIDDA). Aprueba el reglamento de instalaciones domiciliarias de agua potable y de alcantarillado.

- Norma Chilena 1333 de 1978. Norma chilena sobre requisitos de calidad del agua para diferentes usos. Fija criterio de calidad del agua de acuerdo a requerimientos científicos, referidos a aspectos físicos, químicos y biológicos, según el uso determinado. El objetivo de estos criterios es proteger y preservar la calidad de las aguas que se destinen para usos específicos, de la degradación producida por contaminación con residuos de cualquier tipo u origen.

- Decreto Supremo 236 de 2004. Reglamento General de Alcantarillados Particulares. Se refiere a la manera de disponer las aguas servidas caseras, en las ciudades, aldeas, pueblos, caseríos u otros lugares poblados en los que no exista una red de alcantarillado público y de todas las casas habitación u otros edificios públicos o particulares, urbanos o rurales, destinados a la habitación o ser ocupados para vivir

o permanecer, transitoria o permanentemente, que no pueden descargar sus aguas residuales a alguna red pública existente.

Actualmente Chile no dispone de legislación especifica para la regulación de sistemas de tratamiento no convencionales, tales como lombrifiltro y biofiltros, los cuales tienen que regularse de acuerdo a normativas generales relacionadas con las descargas a aguas superficiales o de infiltración.

2.3 Tecnologías emergentes para el tratamiento de aguas residuales.

A nivel internacional en países como Francia, Alemania, Dinamarca e Italia, se ha visto en auge la utilización de sistemas pasivos y naturales como una alternativa para el tratamiento de aguas residuales de bajo costo de inversión, operación y mantención.
Dentro de estas tecnologías encontramos los lombrifiltros y humedales artificiales que son sistemas que trabajan en conjunto con la naturaleza para tratar las aguas, ya sea con lombrices o bien con plantas emergentes, para llevar a cabo el sistema de depuración.
La creciente utilización de nuevas tecnologías permite diversificar alternativas para el tratamiento de aguas residuales en localidades pequeñas y aisladas, donde no existen sanitarias que puedan tratar las aguas contaminadas.

Tomando en cuenta las referencias anteriores, se busca poder dar a conocer de manera empírica a través del diseño y construcción de un humedal artificial a nivel domiciliario como una alternativa para la problemática de la contaminación del recurso hídrico y el tratamiento de aguas residuales en nuestro país, logrando en un futuro poder abarcar el tratamiento y reutilización de las aguas en diferentes industrias, a través de este sistema.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

El objetivo principal de este estudio, consistirá en determinar la capacidad de remoción de contaminantes de aguas residuales negras, mediante el tratamiento de humedales artificiales a nivel domiciliario en la localidad de Pomaire, Región Metropolitana, Chile.

3.2 Objetivos específicos

- Determinar el tamaño y tipo de humedal necesario para depurar las aguas residuales domiciliarias.
- Construir un prototipo de humedal artificial a nivel domiciliario.
- Analizar los parámetros de contaminantes al finalizar la depuración del agua residual domiciliaria, una vez estabilizado el sistema.
- Determinar la posibilidad de utilizar el agua tratada en los riegos agrícolas de la zona central de Chile.

4. MARCO TEÓRICO DE HUMEDALES

El termino humedal hace referencia a una extensión de tierra, la cual esta temporalmente o permanentemente inundada. Los humedales se han descrito como verdaderos riñones del medio natural, a causa de las funciones que pueden desempeñar en los ciclos hidrológicos y químicos, y como abastecedores biológicos, en razón de las extensas redes alimentarías y la rica diversidad biológica que poseen (Ramsar, 1971).

Los humedales serán clasificados en dos grandes grupos, *humedales naturales* y *humedales artificiales*. Los humedales naturales, como bien lo dice su nombre, son aquellas extensiones de tierra que permanecen inundada de forma natural, desarrollándose la flora y fauna característica, que posee las condiciones de adaptabilidad a dichos suelos. En cambio, los humedales artificiales son sistemas creados por el hombre, los cuales fueron diseñados a partir de las características de amortiguación de contaminantes orgánicos e inorgánicos propios que poseen los humedales en forma natural, comprendiendo una gran capacidad de depuración de las aguas a través de la sedimentación, absorción y metabolismo bacterial.

4.1 Humedales Naturales

Los humedales naturales comprenden una variedad de hábitat continental, costero y marino, los cuales comparten características en común. Son considerados como áreas que se inundan constante o recurrentemente, con niveles freáticos principalmente superficiales, y vegetación que se caracteriza por la adaptabilidad en suelo saturado, ya sea de aguas superficiales o subterráneas. Estos ecosistemas pueden llegar a alcanzar gran complejidad con mosaico de lámina de agua, vegetación sumergida, vegetación flotante, vegetación emergente, fauna asociada a la vegetación, fauna acuática, componentes bióticos y abióticos y las interacciones entre ellos. (Ramsar, 1971)

Existen varias definiciones de humedales naturales en la literatura. Cada cual, según sus enfoques, usos y en base a diferentes criterios de clasificación, tales como hidrológicos, bióticos, ecológicos, según su manejo, etc. A continuación, se enuncian algunas de las definiciones más utilizadas.

- Según la Convención Ramsar *"*son humedales *las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en*

marea baja no exceda de seis metros. Podrán comprender sus zonas ribereñas o costeras adyacentes, así como las islas o extensiones de agua marina de una profundidad superior a los seis metros en marea baja, cuando se encuentren dentro del humedal" (Ramsar, 1971).

- Según La EPA (Envimomental Proteccion Agency, 1994) "Humedal es, *un área que es regularmente saturada por agua superficial o subterránea, y que se caracteriza por la prevalencia de vegetación que está adaptada a la vida en condiciones de suelos saturados (Ej., pantanos, turberas, marismas y estuarios)"* (EPA, 1994).

- Cowardin *et al.,* 1979**:** *"Los humedales son tierras de transición entre sistemas acuáticos y terrestres donde la columna de agua esta generalmente en o cerca de la superficie o la tierra está cubierta por aguas superficiales. Los humedales deben tener uno o más de los tres atributos siguientes: (1) al menos periódicamente, la tierra sostiene predominantemente hidrófitas, (2) el substrato es predominantemente tierra hídrica no drenada, y (3) el substrato no es suelo, y es saturado de agua o cubierto por agua superficial en algún momento durante la época de crecimiento de cada año"* (Cowardin, L., 1979).

- Ministerio de Medio Ambiente, 2013. *"Los humedales son unidades de paisaje determinadas por un anegamiento permanente o estacional del suelo".*

Dentro de las funciones de los humedales naturales podemos mencionar las siguientes:

- Se considera como un soporte de la cadena de alimentación y del ciclo de los nutrientes. Esto incluye la producción primaria por parte de las plantas y sus diversos consumidores, ya sea por animales herbívoros o detritívoros, la descomposición, exportación de materiales al ambiente terrestre y asimilación de los mismos.
- Se le reconoce como un hábitat para la biodiversidad del lugar, incluyendo las especies nativas, en peligro, o bien que se encuentran en un estado sensible.
- Permite un cierto control de los sedimentos, protección de las zonas costeras, recarga del humedal y descarga de las aguas subterráneas.
- Se le conoce como un sistema de destoxificacion de sustancias de las aguas, tanto contaminantes naturales como de origen humano. (MMA, 2013)

4.1.1 Humedales en Chile

Chile cuenta con una vasta variedad en humedales desde Arica hasta Magallanes, sin embargo a raíz de una falta de legislación, mal manejo y poca información referida a su dinámica y su contribución a la biodiversidad, es que estos se han visto afectado considerablemente por los sectores agro-industriales, que vierten sus residuos a estas cuencas sin un tratamiento previo.

Es debido a esto que Chile actualmente cuenta con una Estrategia Nacional de Humedales, la cual responde a un compromiso internacional, al adherirse a la Convención relativa a los humedales de importancia internacional especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas, comúnmente referida como la convención Ramsar. Siendo esta, aprobada como Ley de la República en septiembre de 1980 y promulgada como tal, a través del Decreto Supremo Nº 771 de 1981, del Ministerio de Relaciones Exteriores. Chile tiene actualmente 13 sitios designados como Humedales de Importancia Internacional (sitios Ramsar), con una superficie de 361,761 hectáreas (Ramsar, 2017).

Según el último catastro de Humedales en Chile, "Diseño del Inventario Nacional de Humedales y el Seguimiento Ambiental", publicado el año 2011 por el Ministerio de Medio Ambiente, se registró un total de superficie país de 1.986.167 hectáreas de humedales, de los cuales 1.411.586,3 hectáreas pertenecen a la tipología "agua", 301.342,4 hectáreas a "vegetación" y finalmente "273.238,9 hectáreas a vegetación-agua". Además, dentro del análisis de los humedales, se detectó que solo el 0.5% de los humedales del país se encuentran bajo áreas de protección y que equivalen a 2.7% de las áreas protegidas. (MMA, 2011). Esta información es de suma importancia debido a que muestra la situación actual que tiene Chile con respecto a la conservación de los humedales.
Si bien el país está adherido a la Convension Ramsar desde 1981, y posee un Comité Nacional de Humedales desde el año 2005 junto con la aprobación de la Estrategia Nacional para la Conservación y Uso Racional de Humedales, cabe destacar que aún queda bastante por hacer dentro de los parámetros de conservación y usos de los humedales.

4.2 Humedales Artificiales

Los humedales artificiales nacen a partir de la observación de las características propias que poseen los humedales naturales, referido a la capacidad de poder depurar mediante los procesos físico, químico y biológico las aguas contaminadas.

Desde que se desarrollaron las redes de alcantarillado sobrevinieron lugares de vertido de las aguas residuales, en donde históricamente los humedales naturales fueron utilizados como sitios de descarga. Esta tendencia fue llevando a muchos humedales, tales como pantanos, a saturarse de nutrientes y posteriormente a degradarse ambientalmente. Los primeros experimentos destinados a probar la capacidad de depuración de sistemas de humedales fueron llevados a cabo por Seidel K. en 1952, en el instituto Max Plank de Alemania. A partir de entonces y durante las décadas de 1950 y 1960 Seidel K. trabajó junto con Kickuth R. y desarrollaron el tratamiento conocido como “Root Zone Method”, que corresponde a un humedal de flujo subsuperficial relleno de arcilla.

El primer estudio de un humedal construido de flujo subsuperficial a escala real se realizó en 1974 en Wolverton, Missisippi. En Europa fue en Othefresen (Alemania) en 1974. Este humedal, que fue diseñado siguiendo el modelo del Instituto Max Plank, sigue operativo al día de hoy y trata agua residual doméstica (Heers, M., 2006).

Cabe destacar que algunas de las primeras experiencias entre 1970 y 1980 fracasaron debido principalmente a que se utilizaba como material granular el propio suelo en el que se realizaba la obra y la colmatación en algunos casos aparecía en muy poco tiempo. Hasta finales de los años 80 no se comprendió que no se podía utilizar como substrato el propio suelo, a no ser que se garantizara una conductividad hidráulica adecuada y permanente. Una vez superado este problema, gracias a la utilización de gravas como substrato, se empezaron a construir gran número de humedales. En el año 1998 se estimaba millones de instalaciones repartidas por todo el mundo. Desde entonces han aparecido excelentes manuales científicos y técnicos, y capítulos de libros que han ido recopilando el conocimiento y el estado de esta tecnología (Kamau, C., 2009).

4.2.1 Tipos de Humedales Artificiales

Dentro de los tipos de humedales artificiales, encontramos dos categorías de clasificación: Sistemas de Flujo Superficial o Libre (FS) (Free Water Surface, siglas FWS, en inglés) y los Sistemas de Flujo Subsuperficial (Subsurface Flow, SSF), los cuales se dividen en

Horizontales y Verticales. En el denominado sistema de flujo superficial, el agua circula por sobre la superficie del substrato y, en el de flujo subsuperficial, el agua circula a nivel de la superficie del lecho o por debajo del substrato.
En la figura 3, se muestran la clasificación de los humedales artificiales.

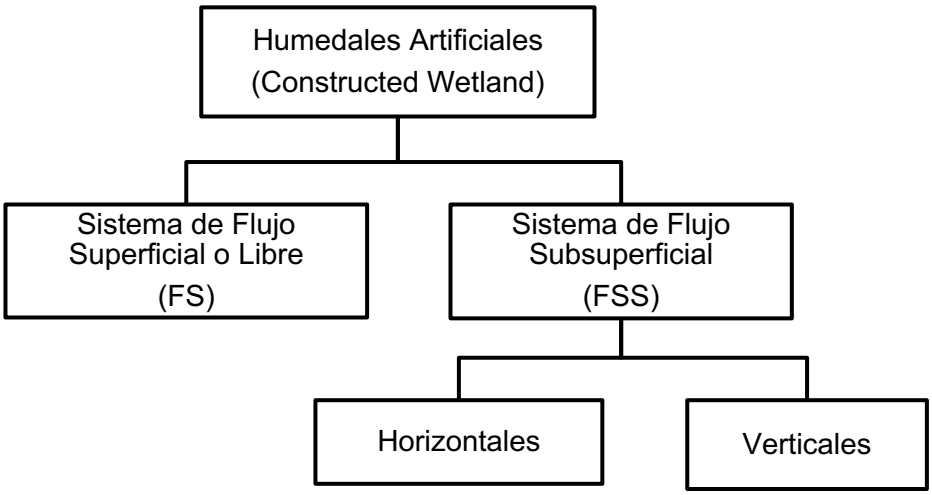

Figura 3. Clasificación de los Humedales Artificiales

Fuente: elaboración propia.

4.2.1.1 Humedales de Flujo Superficial o Libre

Estos sistemas consisten típicamente de estanques o canales, con alguna clase de barrera subterránea para prevenir la filtración, suelo u otro medio conveniente a fin de soportar la vegetación emergente, y agua en una profundidad relativamente baja que atraviesa la unidad. La baja profundidad del agua, la baja velocidad del flujo y la presencia de tallos de planta regulan el flujo del agua. Se aplica agua residual pretratada a estos sistemas y el tratamiento ocurre cuando el flujo de agua atraviesa lentamente el tallo y la raíz de la vegetación emergente (Llagas, W. & Guadalupe, E., 2006)

Los humedales con flujo libre son quizás los más antiguos desde el punto de vista conceptual. Generalmente, estos sistemas son diseñados con cargas superficiales bajas. La profundidad de las aguas en estos sistemas varía entre 5 cm y 90 cm, sin embargo, el valor más común se encuentra entre 30 cm y 40 cm.
La figura 4 muestra un esquema de un sistema humedal artificial de agua superficial libre.

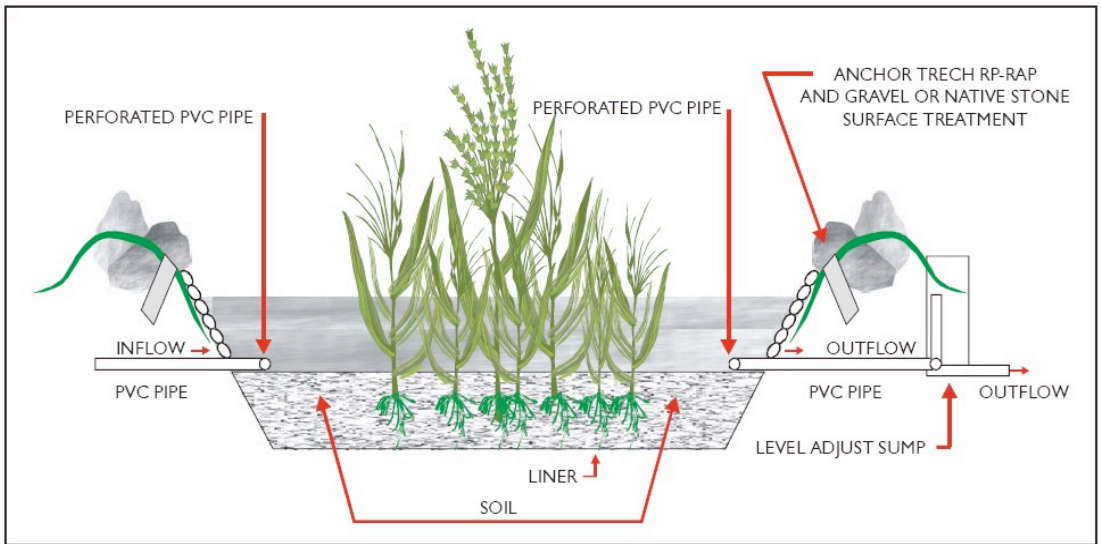

Figura 4. Sistema de agua superficial libre.

Fuente: Adaptada de Llagas, W. & Guadalupe, E. (2006).

4.2.1.2 Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial

Estos sistemas son similares a los filtros horizontales de las plantas de tratamiento convencionales. Consisten en un medio poroso en donde son soportadas las plantas que a través de sus sistemas radiculares realizan el proceso de depuración del agua.

Estos sistemas son diseñados con el propósito de obtener niveles de tratamiento secundarios, los cuales son llamados «la zona de raíces» o «filtros de piedras de junco y caña» (Llagas, W. & Guadalupe, E., 2006). Dentro de este tipo de sistema existes dos modalidades, uno de flujo horizontal y el otro vertical.

La figura 5 muestra un esquema de un sistema humedal artificial de flujo de agua bajo la superficie

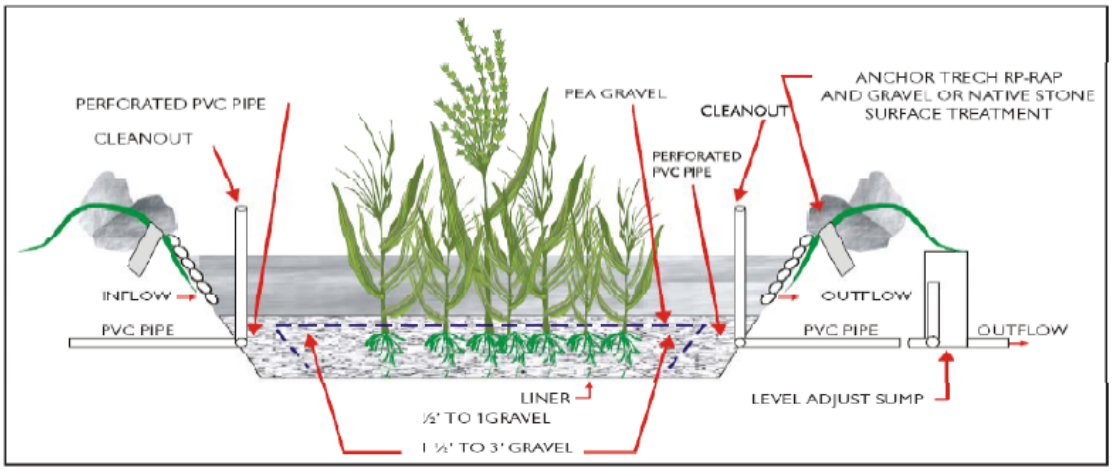

Figura 5. Sistema de flujo bajo la superficie

Fuente: Adaptada de Llagas, W. y Guadalupe, E. (2006).

4.2.1.2.1 Humedales Subsuperfirciales de Flujo Horizontal.

Son los sistemas más utilizados en Europa y tienen su origen en la investigación de Seidel, K. 1967 y de Kickuth, R. 1977. El diseño de estos sistemas por lo general consiste en una cama, ya sea de tierra o arena y grava, plantada con macrófitas acuáticas, en la mayoría de los casos son la caña común o carrizo (*Phragmites australis*). Toda la cama es recubierta por una membrana impermeable para evitar filtraciones en el suelo (Kolb, P., 1998). El agua ingresa en forma permanente (flujo continuo) y es aplicada en la parte superior de un extremo y recogida por un tubo de drenaje en la parte opuesta inferior por rebalse. El agua residual se trata a medida que fluye lateralmente a través del medio poroso (flujo pistón). La profundidad del lecho varía entre 0,45 m a 1 m y tiene una pendiente de entre 0,5 % a 1 %. El agua residual no ingresa directamente al medio granular principal (cuerpo), sino que existe una zona de amortiguación generalmente formada por grava de mayor tamaño. El sistema de recogida consiste en un tubo de drenaje cribado, rodeado con grava de igual tamaño que la utilizada al inicio. El diámetro de la grava de ingreso y salida oscila entre 50 mm a 100 mm. La zona de plantación está constituida por grava fina de un solo diámetro, de entre 3mm a 32mm. Es fundamental que el agua residual que ingresa al sistema se mantenga en un nivel inferior a la superficie (5-10 cm), lo cual se logra regulando el nivel del dispositivo de salida en función a este requerimiento, con lo que se evitan posibles problemas de olores y mosquitos (Figura 6).

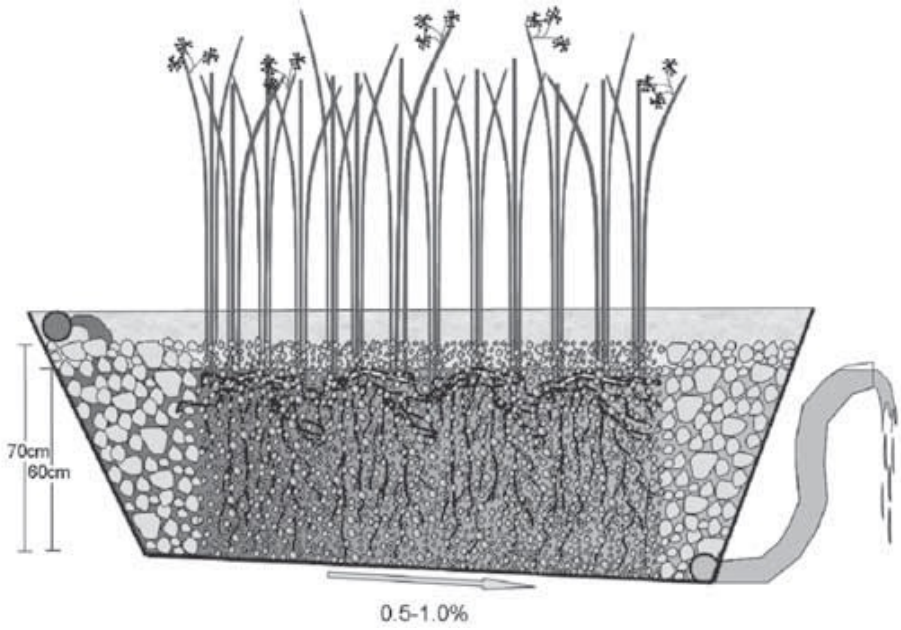

Figura 6. Humedal subsuperficial de flujo horizontal

Fuente: (Delgadillo, O., et al, 2010)

4.2.1.2.2 Humedales Subsuperficiales de Flujo Vertical

Los sistemas verticales con flujo subsuperficial son cargados intermitentemente. De esta forma, las condiciones de saturación con agua en la cama matriz son seguidas por períodos de instauración, estimulando el suministro de oxígeno. Hay muchas posibilidades de variar la distribución de intervalos, la composición de la cama matriz, etcétera, y los resultados que se han obtenido son promisorios (Kolb, P., 1998)

También conocidos como filtros intermitentes, este tipo de humedales reciben las aguas residuales de arriba hacia abajo, a través de un sistema de tuberías de aplicación de agua (ver figura 7). Las aguas infiltran verticalmente a través de un sustrato inerte (arenas, gravas) y se recogen en una red de drenaje situada en el fondo del humedal. La aplicación de agua se efectúa de forma intermitente, para preservar y estimular al máximo las condiciones aerobias. La vegetación emergente se planta también en este medio granular. Adicionalmente, para favorecer las condiciones aerobias del medio poroso, se suele colocar un sistema de aeración con chimeneas, que son tuberías cribadas con salidas al exterior. A diferencia del humedal subsuperficial de flujo horizontal, el sustrato está constituido por varias capas, encontrándose las más finas en la parte superior, aumentando el diámetro de la grava hacia abajo. Los sistemas verticales tienen una mayor capacidad de tratamiento

que los horizontales (requieren de menor superficie para tratar una determinada carga orgánica). Por otra parte, son más susceptibles a la colmatación.

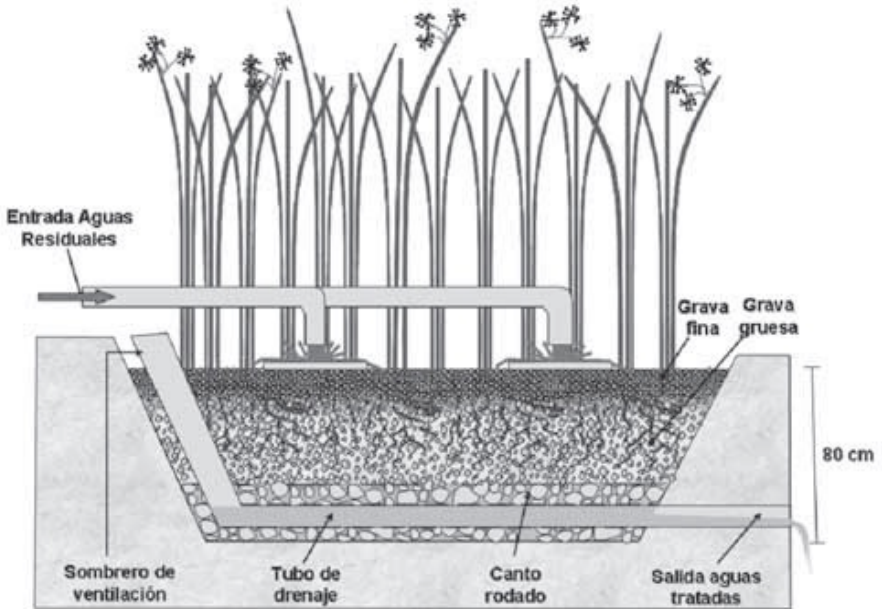

Figura 7. Humedal subsuperficial de flujo vertical

Fuente: (Delgadillo, O., et al, 2010)

4.3 Componentes principales de los Humedales Artificiales

Dentro de los principales componentes utilizados para la construcción de Humedales Artificiales, se encuentran los siguientes:

4.3.1 Agua

La hidrología es el factor de diseño más importante en un humedal artificial porque provee el sustento de la vida de las plantas, lo que puede ocasionar a menudo el éxito o fracaso del sistema. Algunas consideraciones importantes acerca de la hidrología de los humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales son:

- El área superficial del agua y su poca profundidad, hacen que el sistema actúe recíproca y fuertemente con la atmósfera a través de la lluvia y la evapotranspiración, por ende, son factores importantes a considerar a la hora del diseño de un Humedal.

- La densidad de la vegetación en un humedal afecta fuertemente su hidrología, primero obstruyendo los caminos de flujo siendo quebrado el movimiento del agua a través de la red de tallos, hojas, raíces y rizomas; y segundo, bloqueando la exposición al sol y al viento.

4.3.2 Soporte

Es el material utilizado como relleno en la construcción de un Humedal Artificial, el cual tiene como función servir de soporte a las plantas que van a ser utilizadas para la remoción de contaminantes, y además como medio en donde se llevan a cabo los procesos de filtración y sedimentación de las partículas contenidas en el agua. En los humedales, el sustrato está formado por arena, grava, roca, sedimentos y restos de vegetación que se acumulan en el humedal debido al crecimiento biológico.

La principal característica del medio es que debe tener la permeabilidad suficiente para permitir el paso del agua a través de él. Esto obliga a utilizar suelos de tipo granular, principalmente grava seleccionada con un diámetro del orden de los 16-25 mm aproximadamente y con pocos finos. El tamaño del medio granular afecta directamente al flujo hidráulico del humedal y por ende en el caudal de agua a tratar. Si el lecho granular está constituido por elevadas cantidades de arcilla y limo, se consigue una mayor capacidad de absorción y una mejor filtración, ya que la adsorción es alta y el diámetro de los huecos es pequeño. Pero también este medio presenta una elevada resistencia hidráulica y requiere velocidades de flujo muy bajas, limitando el caudal a tratar. Por el contrario, si el lecho granular está formado por gravas y arenas, disminuye la capacidad de adsorción y el poder filtrador del medio, pero aumenta la conductividad hidráulica. De forma indirecta, el medio granular contribuye a la eliminación de contaminantes porque sirve de soporte de crecimiento de las plantas y colonias de microorganismos que llevan a cabo la actividad biodegradadora (biopelículas), (Delgadillo, O., et al, 2010)

4.3.3 Vegetación

Las plantas macrófitas que crecen en humedales artificiales, son un componente esencial en el diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales, ya que, tienen grandes propiedades con relación a los procesos de remoción y aireación del sistema.

Uno de los efectos más importantes tiene que ver con los resultados de los mecanismos físicos que las plantas ocasionan: efecto de filtración, control de erosión, área superficial para el crecimiento bacterial, sedimentación de partículas en suspensión, disminución de la

evaporación del agua residual. Por otra parte, el metabolismo de las plantas (adsorción de elementos y liberación de oxigeno) afecta los procesos de tratamiento en diferentes formas dependiendo del diseño. Por ultimo las plantas tienen otras funciones como hábitat de fauna silvestre junto con brindar una estética que pocos sistemas de tratamiento de aguas residuales pueden tener (Paredes, D. & Kuschk, P., 2001). Un tipo especial de macrófitas son los helófitos, plantas capaces de arraigar en suelos anegados o encharcados, con una parte sumergida y otra área emergente (Lahora, A. , 2003).

Lo más importante de las plantas de humedales, es que las porciones sumergidas de las hojas y tallos se degradan y se convierten en restos de vegetación, que luego sirven como sustrato para el crecimiento de la película microbiana fija, la que es la responsable de gran parte del tratamiento. Las plantas utilizan durante su crecimiento cierta cantidad de nitrógeno y fósforo, y pueden en ciertos casos, consumir y concentrar en sus tallos y hojas ciertos metales pesados. La cantidad de nitrógeno y fósforo que puede ser removida directamente por las plantas emergentes es muy débil (5 al 10%) siempre que haya un recorte de plantas regular (Lara, J., 1999). Todas clases de plantas utilizadas en los humedales artificiales actúan sobre los contaminantes de similar manera. Todas las plantas pueden utilizar los nutrientes y carga orgánica en las aguas negras y grises hasta cierto punto. Sin embargo, relativamente pocas plantas prosperan en las aguas negras o grises que tiene altas niveles de nutrientes, que son típicos de los humedales construidos (Mitsch, W. & Gosselink, J., 2000).

Hay unas pocas plantas que son utilizados normalmente para humedales de biofiltracion de las aguas residuales, muchos de los cuales pueden ser encontrados en humedales naturales. Las plantas encontradas en humedales naturales cerca del área escogida para el humedal construido son muy beneficiosas, ya que están adaptadas al clima local. Si estas plantas no pueden adquirirse localmente, cualquier planta de humedal que crezca bien puede ser utilizada. Sin embargo, no todas presenta la misma eficiencia en remoción, por ende, cabe destacar que solo algunas son las más propicias para dicho proceso.

En la figura 8 se muestran las plantas comunes utilizadas en los humedales artificiales.

Las eneas (*Typha spp.*) son fuerte, fácil de propagar, y capaz de producir una biomasa anual grande. Típicamente quitan cantidades grandes del nitrato y del fosfato.	
Juncos (*Schoenoplectus spp., Scirpus spp.*) crecen en grupos y crecen bien en agua que tiene una profundidad de 5 cm a 3 m. Estas plantas agresivas logran una eliminación alta de contaminantes.	
Céspedes de caña (*Phragmites australis*) son plantas altas con raíces profundas, que permiten más oxígeno a alcanzar la zona de raíz que las dos plantas descritos previamente.	

Figura 8. Plantas típicas utilizadas en humedales artificiales.

4.3.4 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 predominarán los microorganismos anaerobios. Los principales procesos que llevan a cabo los microorganismos son la degradación de la materia orgánica, la eliminación de nutrientes y de elementos traza, asi como la desinfección de patógenos (Delgadillo, O., et al, 2010).

Los principales microorganismos presentes en la biopelícula de los humedales son: bacterias, levaduras, hongos y protozoarios. La biomasa microbiana consume gran parte del carbono y muchos nutrientes. La actividad microbiana tiene la función de transformar un gran número de sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas e insolubles y alterar las condiciones de potencial de reducción y oxidación del sustrato, afectando así, a la capacidad de proceso del humedal. Así mismo, gracias a la actividad biológica, muchas de las sustancias contaminantes se convierten en gases inocuos que son liberados a la atmósfera (Delgadillo, O., et al, 2010).

4.4 Mecanismos de Remoción de Contaminantes

4.4.1 Físico

Los humedales son capaces de proporcionar una alta eficiencia en la remoción de contaminantes asociado con material en suspensión, mediante los procesos físicos de sedimentación, filtración. El agua superficial se mueve muy lentamente a través de los humedales, debido la resistencia proporcionada por las raíces, las plantas flotantes y el medio soportante, para el caso de los humedales subsuperficiales, lo que permite tener un flujo laminar característico.

La sedimentación de los sólidos suspendidos se promueve por la baja velocidad del flujo y por el hecho de que el flujo es con frecuencia laminar. Las raíces de las plantas pueden servir como trampas de sedimentos, pero su rol primario es la remoción de sólidos suspendidos para limitar la resuspensión del material. La eficiencia de remoción de sólidos suspendidos es proporcional a la velocidad de partícula fija y la longitud del humedal. Para propósitos prácticos, la sedimentación es usualmente considerada como un proceso irreversible, resultando en acumulación de sólidos y contaminantes asociados sobre la superficie del suelo del humedal. Sin embargo, la resuspensión de sedimento puede resultar en la exportación de sólidos suspendidos y reducir algo más bajo la eficiencia de remoción. Algo de resuspensión podría ocurrir durante periodos de velocidad de flujo alta en el humedal. Más comúnmente la resuspensión es el resultado de la turbulencia de la dirección del viento, bioturbación (perturbación por animales y humanos) y desprendimiento de gas. El desprendimiento de gas resulta a partir de gases como el oxígeno, a partir de la fotosíntesis del agua, metano y dióxido de carbono, producido por los microorganismos en el sedimento durante la descomposición de la materia orgánica (Benefield, L. & Randall, C., 1980)

4.4.2 Biológico

La remoción biológica es quizá el camino más importante para la remoción de contaminantes en los humedales artificiales. Los contaminantes que son también formas de nutrientes esenciales, tales como nitrato, amonio y fosfato, son tomados fácilmente por las plantas. Además muchas especies de plantas son capaces de captar e incluso acumular significativamente metales tóxicos, como cadmio y plomo, entre otros. (Lizama, K.; Fletcher, T. & Sun, G., 2011)

La velocidad de remoción de contaminante por las plantas varía extensamente, dependiendo de la velocidad de crecimiento de la planta y de la concentración del contaminante en el tejido de planta. Las más utilizadas son la macrofitas que tienen un crecimiento relativamente acelerado en comparación con plantas leñosas. Las bacterias y otros microorganismos en el suelo también proveen, captan y almacenan nutrientes a corto plazo, y algunos otros contaminantes. Los microorganismos pueden proporcionar una cantidad medible de contaminante captado y almacenado en sus procesos metabólicos, que desempeñan el papel más significativo en la remoción de compuestos orgánicos.

Los descompuestos microbianos, sobre todo bacterias del suelo, utilizan el carbono (C) de la materia orgánica como fuente de energía, convirtiéndola a gases de bióxido de carbono (CO_2) o metano (CH_4). Esto proporciona un mecanismo biológico importante para la remoción de una amplia variedad de compuestos orgánicos, incluyendo ésos encontrados en aguas residuales municipales, aguas residuales de procesamiento de alimentos, plaguicidas y productos de petróleo. La eficiencia y la velocidad de degradación orgánica de C por los microorganismos es altamente variable para los diversos tipos de compuestos orgánicos. El metabolismo microbiano también produce la remoción de nitrógeno inorgánico, es decir, nitrato y amonio. Bacterias especializadas (*Pseudomonas sp.)* transforman metabólicamente el nitrato en gas nitrógeno (N_2), un proceso conocido como desnitrificación. El N_2 se pierde posteriormente a la atmósfera (Benefield, L. & Randall, C., 1980).

4.4.3 Químico

El proceso químico más importante de la remoción de suelos del humedal es la absorción, que da lugar a la retención a corto plazo o a la inmovilización a largo plazo de varias clases de contaminantes. La absorción es un término ampliamente definido para la transferencia

de los iones (moléculas con cargas positivas o negativas) a partir de la fase de solución (agua) a la fase sólida (soporte).

Muchos componentes de las aguas residuales y de escurrimiento existen como cationes. La capacidad de los suelos para la retención de cationes, expresada como capacidad de intercambio catiónico, aumenta generalmente con el aumento de contenido de la arcilla y de la materia orgánica. La absorción química representa una forma más fuerte y más permanente de vinculación que el intercambio catiónico. Un número de metales y de compuestos orgánicos se puede inmovilizar en el suelo vía la absorción química. La volatilización, que implica la difusión de un compuesto disuelto desde el agua a la atmósfera, es otro mecanismo potencial de la remoción del contaminante. Muchos tipos de compuestos orgánicos son volátiles, y se pierden fácilmente a la atmósfera desde los humedales y de otras aguas superficiales. Aunque la volatilización puede remover con eficacia ciertos contaminantes del agua, puede demostrar ser indeseable en algunos casos, debido al potencial para contaminar el aire con los mismos contaminantes. (Benefield, L. & Randall, C., 1980).

4.5 Remoción de tipos de Contaminantes

4.5.1 Remoción de sólidos suspendidos

Aunque la mayor parte de los sólidos suspendidos y sedimentables son removidos en el tratamiento previo, los humedales filtran y sedimentan los remanentes, complementando esta remoción. En efecto, las raíces de las macrófitas y el sustrato reducen la velocidad del agua, favoreciendo ambos procesos. El tratamiento previo es muy importante para evitar obstrucciones y la rápida colmatación del humedal.

Compuestos Orgánicos + O_2 → Microorganismos aeróbicos + CO_2+ H_20 + energía

(Ec. 1)

4.5.2 Remoción de materia orgánica

La remoción de materia orgánica tiene lugar principalmente mediante biodegradación aeróbica o anaeróbica. Una pequeña porción también es removida por procesos físicos como la sedimentación y filtración, cuando la materia orgánica es fijada a los sólidos suspendidos. La biodegradación es realizada por los microorganismos, los cuales están

adheridos a la planta, en particular a las raíces y a la superficie de los sedimentos (Kolb, P., 1998).

Todos los microorganismos involucrados en este proceso de tratamiento requieren una fuente de energía y carbono para la síntesis de nuevas células, como también otros nutrientes y elementos traza. Dos clases diferentes de biodegradación microbial, la aeróbica o la anaeróbica, tienen lugar en los humedales construidos, dependiendo de la presencia de oxígeno disuelto. En la degradación aeróbica, dos grupos de microorganismos participan en este proceso de degradación: aeróbicos quimioheterótrofos, oxidando compuestos orgánicos y liberando amonio; y aeróbicos quimioautótrofos, los cuales oxidan el nitrógeno amoniacal a nitrito y nitrato. El último proceso es llamado nitrificación. Sin embargo, debido a la alta tasa de metabolismo, los heterótrofos son principalmente responsables para la remoción del material orgánico; por lo tanto, la presencia de oxígeno disuelto es un factor limitante.

La degradación anaeróbica puede ser resumida como sigue:

Compuestos Orgánicos →alcohol, ácidos + nuevas células → CH_4, H_2S, NH_3, H_2, nuevas células

(Ec. 2)

Éste es un proceso realizado por heterótrofos anaeróbicos. Es menos eficiente comparado a la degradación aeróbica, pero predominará si el oxígeno no está disponible (Cooper, P. et al., 1996).

4.5.3 Remoción de nitrógeno

Al momento que ingresa agua residual al humedal artificial, la mayor parte del nitrógeno está presente como amonio o en forma de un compuesto inestable, que es fácilmente transformado a amonio. Los principales mecanismos de remoción de nitrógeno en humedales construidos son la nitrificación y la desnitrificación, que ocurren en diferentes zonas del sustrato. Todo el proceso puede ser dividido en tres pasos, iniciando con la amonificación, seguido por la nitrificación y desnitrificación.

La amonificación ocurre en las zonas aeróbicas, como también en zonas anaérobicas, por la mineralización del nitrogéno contenido en los orgánicos (ver figura 9).

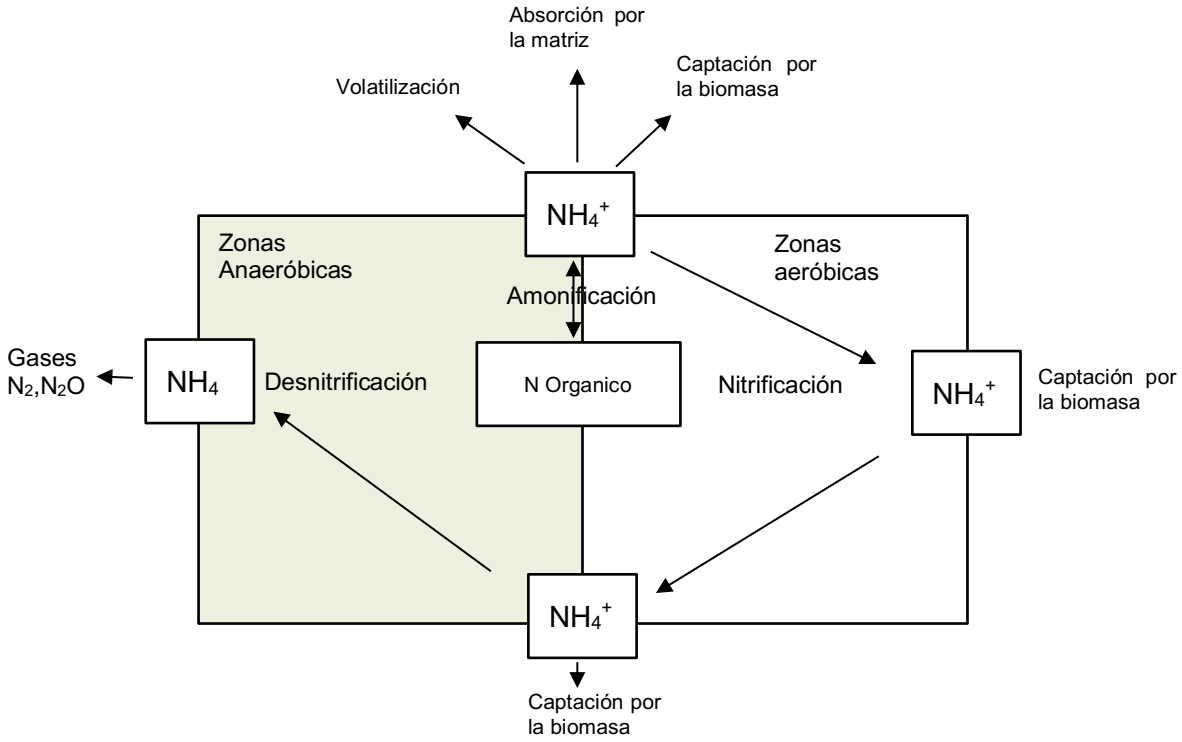

Figura 9. Diagrama del metabolismo del nitrógeno.

Fuente: (Cooper, P. et al., 1996)

La nitrificación requiere la presencia de oxígeno disuelto (condiciones aeróbicas), amonio o nitrito como fuente de energía y dióxido de carbono como fuente de carbono. La oxidación en sí ocurre en dos estadíos, cada uno involucra diferentes especies de bacterias nitrificantes quimioautótrofas.

El primer paso es la oxidación de iones amonio a nitrito (nitrosificación).

$$NH_4^+ + 3/2\ 0_2 \rightarrow N0_2 + 2H^+ + H_20$$

(Ec. 3)

En este paso, la liberación de iones de hidrógeno baja el pH, por lo que es necesario un medio fuertemente alcalino para mantener un pH en el rango de 7.5 a 8.6 (Cooper, P. et al., 1996). El género bacterial que es considerado para catalizar esta reacción es *Nitrosomas*, en cambio el género *Nitrobacter* es responsable para la transformación de nitrito a nitrato. (Lara, J., 1999)

$$N0_2^- + ½\ 0_2 \rightarrow N0_3^-$$

(Ec. 4)

Toda la reacción necesita un alto ingreso de oxígeno: alrededor de 4.5 kg por cada kg de amonio-nitrógeno (NH_4^+-N) oxidado. Las bacterias son sensibles a un amplio rango de inhibidores; así, altas concentraciones de nitrógeno amoniacal pasaran a ser inhibidores en el proceso.

La desnitrificación es el paso final en la remoción de nitrógeno. Ocurre bajo condiciones anóxicas, esto significa, que no hay oxígeno disuelto presente (o con una concentración < a 2% de saturación) pero donde el oxígeno está disponible en fuentes tales como el nitrato, nitrito o incluso sulfato.

Un amplio rango de bacterias anaeróbicas facultativas, siendo las más comunes *Pseudomonas sp., Achromobacter sp. y Aerobacter sp.*, realizan el proceso. Toda la reacción que incluye como primer paso la conversión de nitrato a nitrito, seguida por la producción de óxido nítrico y gas nitrógeno, puede ser resumida como sigue:

$$NO_3^- \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO \rightarrow N_20 \rightarrow N_2 + \uparrow \qquad \textbf{(Ec. 5)}$$

Los tres productos son gaseosos, pero mayormente el gas nitrógeno es perdido en la atmósfera debido a que los primeros dos productos son pasajeros en la mayoría de los casos. Similar al proceso de nitrificación, la denitrificación es también fuertemente dependiente de la temperatura y es necesario suficiente carbono como fuente de energía para que la bacteria realice la conversión. (Paredes, D. & Kuschk, P., 2001)

4.5.4 Remoción de fósforo

El fósforo está presente en las aguas residuales en tres distintas formas: como ortofosfato, polifosfato y fosfato orgánico. El último es un constituyente menor y como los polifosfatos, requieren una posterior descomposición a una forma de ortofosfato más asimilable. Cerca del 25% del fósforo total fijado está presente como ortofosfatos tales como: $P0_4^{3}$, $HP0_4^{2-}$, H_2PO_4 ,H_3PO_4, que están disponibles para el metabolismo biológico inmediato (Tanner, C.; Sukias, J. & Upsdell, M., 1999). Por lo tanto, en términos de utilización, en la planta de tratamiento lo que importa es la concentración de fosfato orgánico antes que la concentración de fósforo total (Brix, H.; Arias, C. & Bubba M., 2001). La remoción de ortofosfato ocurre principalmente como una consecuencia de la adsorción, complejización y reacciones de precipitación con Al, Fe, Ca y materiales arcillosos en la matriz del sustrato. El consumo de fósforo por la planta puede ser considerado como insignificante comparado

con los efectos de adsorción, valores de alrededor del 3% de la carga anual han sido reportados. Dependiendo del valor de pH dentro del sustrato, el fósforo está presente en la forma de sal soluble o minerales insolubles, lo cual significa que el fósforo puede ser transferido dentro de un humedal construido. Debido al contenido de óxidos metálicos en el sustrato, la fijación de fósforo como fosfatos por medio de la adsorción varía (Kolb, P., 1998).

4.5.5 Remoción de metales pesados

Los metales trazas tienen una alta afinidad para la adsorción y complejización con material orgánico y se acumulan en la matriz de un humedal artificial. Los metales pueden encontrarse en formas solubles o como partículas asociadas, siendo las primeros las formas más biodisponibles. Desafortunadamente, la resolubilización de metales desde los humedales artificiales es una causa de preocupación (Cooper, P. et al., 1996).

4.5.6 Remoción de Patogenos

Los organismos importantes, desde el punto de vista de la salud pública son las bacterias patógenas y los virus. Todos los patógenos son capaces de sobrevivir al menos un corto tiempo en agua natural, y más aún, en agua con temperaturas más frías y con presencia de polución orgánica, como es en el caso de las aguas residuales.

La remoción de estos microorganismos está basada en una combinación de factores físicos, químicos y biológicos. Los factores físicos incluyen la filtración, sedimentación, agregación y acción de la radiación ultravioleta. Los mecanismos biológicos incluyen, como se mencionó antes, predación y ataque por bacterias. Finalmente, los factores químicos son la oxidación, adsorción y la exposición a toxinas fijadas por otros microorganismos y exudadas por las raíces de las plantas.

(Jillson, S.; Dahab, M.; Woldt, W. & Surampalli, R., 2001) Reportaron remoción de bacterias coliformes fecales totales y *enterobacterias* en varios humedales subsuperficiales, siendo la eficiencia de remoción entre 98% a 99% para estos indicadores bacterianos.

4.5.7 Otros parámetros relevantes

4.5.7.1 Grasas y aceites

La procedencia de los aceites y grasas en las aguas residuales domésticas tienen su origen principal en los restos de alimentos, manchas de origen graso en las prendas de vestir,

aguas del aseo personal y, en menor medida, de los restos biológicos humanos. La eliminación de grasas y sólidos sedimentables son de vital importancia en el tratamiento primario, ya que de no hacerlo causan problemas de transferencia de oxígeno, taponamiento de tuberías y adhesión en las paredes de la infraestructura del sistema de tratamiento secundario (Chipasa, K. & Medrzycka, K., 2006).

Las grasas generan problemas derivados de su poder tensoactivo que impide la captación del oxígeno, y también por generar una película envolvente en los flóculos biológicos que impiden su respiración, los aligera y los hace flotar, con lo que se dificulta la decantación secundaria. Es de especial importancia el análisis de grasas y aceites, sobre todo por la fracción suspendida que llevan asociada. Alto contenido en este parámetro ocasiona problemas importantes en el sistema de tratamiento biológico (inhibición de la actividad biológica), y en la transferencia de oxígeno; también produce natas y espumas flotantes, malos olores, e incluso la acidificación del agua.

Los humedales construidos de flujo subsuperficial son muy susceptibles a la colmatación del medio granular si el agua posee un contenido elevado en grasas o aceites. La proliferación de raíces y rizomas puede provocar una maraña que junto con el aporte de grasas, aceites y materiales finos inertes favorece la colmatación del medio granular de estos humedales y dificulta el flujo hídrico (Kadlec, R. & Wallace, S., 2009).

4.5.7.2 Salinidad

Uno de los mayores peligros en la agricultura de regadío es la acumulación de sales solubles en la zona de las raíces de los cultivos, presentándose así un riesgo de salinidad. Cuanto mayor es la salinidad del suelo en la zona radicular, las plantas consumen más energía buscando el agua necesaria para ajustar la concentración de sales en el interior del tejido vegetal (ajuste osmótico). Se produce así una disminución en el crecimiento de la planta (Metcalf & Eddy, 2003).

Para destinar el agua tratada al riego de cultivos se debe tener en cuenta la salinidad. La salinidad de un agua de riego se determina midiendo su conductividad, y es el parámetro de mayor importancia a la hora de determinar su idoneidad para el riego (Metcalf & Eddy, 2003). Los parámetros relacionados con la salinidad son la conductividad eléctrica, sólidos totales, concentración de sodio, calcio, magnesio, carbonatos, bicarbonatos, cloruros y sulfatos.

En la estimación del riesgo de salinización del agua, se hace uso de la clasificación propuesta por la FAO (Ayers, R. & Westcot, D., 1985), presentada en la tabla 1.

Grado de salinidad	CE (µS/cm)
No salina	< 700
Salinidad Ligera	700-3.000
Salinidad Media	3.000-6.000
Salinidad Alta	6.000-14.000
Salinidad muy Alta	>14.000

Tabla 1. Clasificación de la salinidad del agua según su conductividad.

Fuente: **(Olías, M.; Cerón, J. & Fernández, I., 2005)**

4.5.7.3 pH.

La calidad del agua y el pH están íntimamente relacionados. El pH es un factor muy importante, ya que determinados procesos químicos solamente pueden ocurrir para un valor determinado de este parámetro. Por ejemplo, una bajada sustancial en el pH puede impedir los procesos de nitrificación, desnitrificaión y degradación orgánica anaerobia. Las bacterias metanogénicas operan a un pH comprendido entre 6,5 y 7,5, por lo tanto, alejándose de este rango en humedales subusperficiales, se evitaría la formación de compuestos olorosos (Vymazal, J., 1999).

El pH del agua es también un factor influyente en el agua de riego, afectando a la nutrición de la planta, de esta manera un agua con pH comprendido entre 6,5 y 8,5 (Ayers, R. & Westcot, D., 1985) se considera apta para su uso en riego, y su importancia radica en que afecta a la solubilidad y fijación de los metales y a la alcalinidad de los suelos.

4.6 Valores de los parámetros

En la presente tabla 2, se muestran los parámetros y valores característicos de las aguas residuales, según los tipos de concentración que posean.

Parametros	Unidad	Debil	Media	Fuerte
Solidos Totales	mg/l	350	720	1200
Solidos Disueltos	mg/l	250	500	850
Fijo	mg/l	145	300	525
Volatiles	mg/l	105	200	325
Solidos Suspendidos	mg/l	100	220	350
Fijos	mg/l	20	55	75
Volatiles	mg/l	80	165	275
Solidos Sedimentables	ml/l	5	10	20
DBO_5	mg/l	110	220	400
DQO	mg/l	250	500	1000
Carbono Organico Total	mg/l	80	160	290
Nitrogeno Total	mg/l	20	40	85
Organico	mg/l	8	15	35
Amoniacal	mg/l	12	25	50
Nitritos ($N\text{-}NO_2$)	mg/l	--	--	--
Nitratos ($N\text{-}NO_3$)	mg/l	--	--	--
Fosforo Total	mg/l	4	8	15
Organico	mg/l	1	3	5
Inorganico	mg/l	3	5	10
Cloruros	mg/l	30	50	100
Sulfatos	mg/l	20	30	50
Alcalinidad	mg/l	50	100	200
Aceites y Grasas	mg/l	50	100	150
Comp. Org. Volatiles	µg/l	<100	100-400	>400
Coliformes Fecales	NMP/100ml	10^5-10^7	10^7-10^8	10^7-10^9

Tabla 2. Características aguas servidas

Fuente: (Metcalf & Eddy, 1990)

5. DISEÑO DE HUMEDAL ARTIFICIAL

El diseño de los humedales artificiales a lo largo de la historia ha tenido diferentes modelaciones que determinan los parámetros necesarios para su diseño. Esto se ha debido a que, a diferencia de otros sistemas de tratamientos, los humedales poseen una serie de interacciones de los microorganismos con la degradación de la materia, trabajando en simbiosis con las plantas; y también considerando el hecho de que en él, ocurren diferentes procesos tanto físico, químicos y biológicos. Muchos de estos sistemas han sido diseñados a través de la modelación empírica de los diferentes parámetros, permitiendo la elaboración de determinadas ecuaciones y criterios de diseño.

5.1 Elección del sistema a diseñar

Dentro de los sistemas estudiados (ver capitulo 4), tenemos que de acuerdo a las características de tratamiento de las aguas residuales domesticas, donde existen emisión de olores y tenemos la probabilidad de aparición de vectores, el sistema que mejor aborda este tipo de condiciones es el Humedal Artificial Subsuperficial, debido a que el agua contaminada fluye debajo del material de soporte, por lo tanto, existe disminución significativa de olores y también permite que no haya contacto directo entre la atmosfera y el agua, evitando la eclosión de mosquitos e insectos.

Ahora bien, entre un sistema vertical y uno horizontal, tenemos que para un menor costo y tiempo de operación, dada las características de un sistema de tratamiento domiciliario, es conveniente la elección de un sistema horizontal, ya que el sistema vertical es mas eficiente en menor área, sin embargo mayor costo de operación debido a su sistema batch de llenado.

Para el caso de estudio se selecciona el humedal artificial de flujo horizontal donde el dimensionamiento se realiza en dos etapas: en la primera se determina la superficie necesaria de tratamiento (dimensionamiento biológico), y en la segunda se establecen las dimensiones geométricas del sistema (dimensionamiento hidráulico).

5.2 Diseño Biológico

En los humedales arificiales la cinetica de remocion determina la velocidad en que los contaminantes son removidos del medio. Las velocidades varian según el tipo de contaminante que se quiere reducir o el mas siginificativo a la hora del diseño y construcción.

En la mayoría de los casos, la ecuación de velocidad puede expresarse como el producto de una constante por las concentraciones elevadas a una cierta potencia.

$$v = K * A^{\alpha} * B^{\beta} \qquad (Ec. 6)$$

La velocidad de la reacción es importante calcularla ya que esta indica la velocidad con la que ocurren las reacciones químicas del proceso para la transformación de un compuesto en otro, a partir de la constante de velocidad es posible realizar un diseño adecuado del sistema de tratamiento efectivo.

Los humedales artificiales pueden ser considerados como reactores biológicos de biomasa adherida y su funcionamiento para la remoción de la DBO, SST y el nitrógeno puede ser estimado de acuerdo con una cinética de primer orden para un reactor de flujo pistón. Las relaciones básicas para los reactores de flujo pistón son las siguientes de acuerdo con la modelación de (Reed, S.; Crites, R. & Middlebrooks, E., 1995)

Reacción de primer orden

$$\frac{dC}{dt} = -K_t * C \qquad (Ec. 7)$$

Quedando

$$\frac{C_e}{C_o} = \exp(-K_t * t) \qquad (Ec. 8)$$

Donde:

C_e: Concentración del contaminante efluente. (mg/L)

C_o: Concentración del contaminante afluente. (mg/L)

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

t: Tiempo de retención hidráulica. (d)

Siendo la constante de velocidad de reacción de primer orden según datos empíricos (Reed, S.; Crites, R. & Middlebrooks, E., 1995)

$$K_t = K_{20} * (1{,}06)^{(T-20)} \qquad (Ec. 9)$$

$$K_{20} = 0{,}678 * d^{-1} \qquad (Ec. 10)$$

El tiempo de retención hidráulica en los humedales puede ser calculado usando la siguiente ecuación:

$$t = \frac{L * W * h * \eta}{Q} \qquad (Ec. 11)$$

Donde:

L: Longitud del estanque (m).

W: Ancho del estanque (m).

h: Profundidad del agua en el estanque (m).

η: Porosidad, o espacio utilizado por el agua para fluir a través del humedal. En los humedales con flujo libre (FL) la vegetación y las plantas secas ocupan un espacio, mientras que en los humedales con flujo subsuperficial (FSS) el medio, las raíces y otros sólidos hacen lo mismo. La porosidad es un porcentaje y se expresa en forma decimal.

Q: Flujo promedio a través del humedal (m^3/d).

Para determinar el flujo promedio se aplica la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{Q_a + Q_e}{2} \qquad (Ec. 12)$$

Donde:

Qa: Flujo afluente.

Qe: Flujo efluente.

Para hacer un diseño preliminar usualmente se asume que *Qa* y *Qe* son iguales.

Combinando las ecuaciones (8), (9) y (11) se puede determinar el área superficial del humedal.

$$A_s = \frac{Q * \ln\left(\frac{C_o}{C_e}\right)}{K_t * h * \eta} \qquad (Ec. 13)$$

Donde:

As: Área superficial del humedal (m^2).

El valor de K_t usado tanto en la ecuación (8) como en la (12) depende del tipo de contaminante removido y de la temperatura.

5.3 Diseño Hidráulico

El diseño hidráulico de un humedal es crítico para obtener buenos rendimientos en la eficiencia de depuración. El modelo de diseño que se utiliza es el determinado por (Reed, S.; Crites, R. & Middlebrooks, E., 1995), el cual asume un flujo en condiciones uniformes y de tipo pistón. Para llegar a poder intentar acercarse al modelo ideal (flujo pistón) es muy importante realizar un cuidadoso diseño hidráulico y los métodos constructivos apropiados. El flujo del agua en el interior del humedal debe romper las resistencias creadas por la vegetación, capa de sedimentos, raíces y sólidos acumulados en los humedales. La energía para romper esta resistencia está dada por la pérdida de carga entre el ingreso y salida del humedal, para dar esta energía se le asigna al fondo del humedal una pendiente con una salida de altura variable. Finalmente, el dimensionamiento hidráulico se utiliza para determinar las dimensiones del sistema (anchura y longitud) una vez conocida su superficie a través del dimensionamiento biológico. El dimensionamiento hidráulico se realiza aplicando la Ley de Darcy, que describe el régimen del flujo en un medio poroso, mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{med,d} = K_s * A_{sp} * s \qquad (Ec. 14)$$

Siendo,

Q el caudal, en m^3/d.

K_s la conductividad hidráulica del medio en una unidad de sección perpendicular a la dirección del flujo, en m^3/m^2*d.

A_{sp} es la sección del humedal perpendicular a la dirección del flujo, en m^2.

s es el gradiente hidráulico o pendiente (dh/dL), en m/m.

Como caudal, se recomienda tomar el máximo diario para asegurarse de que el sistema absorberá bien las puntas de caudal, es decir, los caudales máximo diarios. No se deben utilizar caudales puntas horarios ya que originan sistemas excesivamente anchos y poco largos.

La conductividad hidráulica varía en función de la cantidad y del tamaño de los huecos del medio granular utilizado. En la tabla 3 se muestran órdenes de magnitud estimados de la conductividad hidráulica (Ks) para algunos materiales granulares limpios que podrían utilizarse como substrato en estos sistemas.

Los valores de la pendiente (s) que se suelen utilizar varían en el rango de 0,005 a 0,02. Es conveniente que la pendiente no sea superior a 0,02 m/m para evitar que los costes de excavación sean elevados. No obstante, esto se debe evaluar en cada proyecto en particular, ya que dependiendo de la longitud del sistema quizá una pendiente algo mayor no aumenta excesivamente estos costes.

Las dimensiones del humedal se determinan entonces

$$A_{sp} = \frac{Q_{med,d}}{K_s * s} \qquad (Ec. 15)$$

Siendo,

$Q_{med,d}$ el caudal medio diario, en m^3/d.

Calculada el área de la sección transversal, y una vez fijada la profundidad (h), se determina el ancho del humedal:

$$W = \frac{A_{sp}}{h} \qquad (Ec. 16)$$

Siendo,

W el ancho, en m.

h la profundidad, en m.

Conocido el ancho y teniendo en cuenta la superficie determinada con el dimensionamiento biológico se determina la longitud del sistema:

$$L = \frac{A_s}{W} \qquad (Ec. 17)$$

Siendo,

L la longitud, en m.

5.4 Criterios de Diseño

5.4.1 Profundidad del humedal.

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

Las profundidades típicas del humedal de flujo subsuperficial varían de 0,4 m a 1 m (valor usual 0,7 m) y se determina en conjunto con la penetración de las raíces de las plantas a utilizar.

Plantas emergentes	Penetración de las raíces en el medio
Scirpus Spp	76
Phragmites Australis	>60
Typha Latifoidea	30

Tabla 3. Penetración de las raíces de las plantas emergentes

5.4.2 Relación Largo Ancho

La relación largo/ancho (L/W) debe estar sobre 2/1 para condicionar un flujo tipo pistón. Su valor depende de la cantidad de materia orgánica a eliminar, y de las características y propiedades de los contaminantes que se desean remover. Además, este parámetro está directamente relacionado a la pendiente a utilizar en el fondo del lecho del humedal, lo que condicionará la velocidad del flujo y si éste podrá romper las fuerzas de fricción del medio granular (Steiner, G. & Watson, J., 1993).

5.4.3 Pendiente.

En la mayoría de casos estudiados la pendiente más utilizada es del 1%. Resultados de estudios consideran que puede utilizarse el 10% de la profundidad del lecho en su entrada (h_0), a razón de la longitud del humedal (L) (Kadlec, R. & Knight, R., 1996).

$$S < 0{,}1\frac{h_o}{L} \qquad (Ec.18)$$

5.4.4 Gradiente Hidraulico

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

$$G = \frac{Q}{L * W} * \frac{L^2}{K_s * {h_o}^2} < 0{,}2 \qquad (Ec.19)$$

5.4.5 Sustrato

Es el medio donde crecen las plantas, los microorganismos y se realizan los principales procesos de depuración. Para el diseño se recomienda utilizar grava con menos de 30 mm (3/4") de diámetro que es el que funciona mejor (Arias, O., 2004). Si se utiliza grava con diámetros muy grandes de substrato, origina que se incremente la velocidad del paso del agua, resultando en un flujo turbulento y que no se cumpla la ley de Darcy para el diseño. Caso contrario ocurre con grava de tamaño demasiado pequeño, esta reduce la velocidad del paso de agua originando zonas con presencia de agua en la superficie y flujos preferenciales, pero tienen la ventaja de proporcionar una mayor área superficial para la actividad microbiana y la adsorción. En algunos casos se utiliza ciertos tipos de suelo (arcillas) para adsorber metales pesados, fosfatos, etcétera. El inconveniente es la gran reducción de la velocidad de paso del agua.

Antes del inicio del diseño se recomienda realizar pruebas de conductividad y porosidad del substrato escogido (grava), esto para definir exactamente el tipo de material a emplearse. Asimismo, se recomienda multiplicar el valor de la conductividad por 0,33 o bien por 0,1 (10%) para evitar problemas de atascamiento por acumulación de lodos, raíces y otros. Con relación a la uniformidad del material este debe tener un coeficiente de uniformidad entre 1 y 6, definido como D_{10}-D_{60} (Terzaghi, K. & Ralph, P., 1973.).
En la tabla 4 se muestra las características principales de los substratos usados en los humedales.

Tipo de Material	**Tamaño Efectivo D_{10} (mm)**	**Conductividad Hidraulica, K_s ($m^3/m^2/d$)**	**Porosidad, n %**
Arena Gruesa	2	100-1000	28-32
Arena Gravosa	8	500-5000	30-35
Grava Fina	16	1000-10000	35-38
Grava media	32	10000-50000	36-40
Roca Gruesa	128	50000-250000	38-45

Tabla 4. Parámetros medio soportante

Fuente: (EPA, 1994)

5.5 Dimensionamiento Humedal Subsuperficial Horizontal

De acuerdo a los valores y criterios de diseños utilizados para el dimensionamiento de Humedal Artificial Subsuperficial Horizontal domiciliario a construir, se detalla a continuación una tabla resumen de los valores calculados en anexo A, “memoria de cálculo”.

Variables	Simbología	Unidad	Valor
Diseño Biológico			
Caudal medio diario	Q	m^3/d	0,80
DBO total afluente	C_o	mg/l	350,00
DBO total afluente	C_e	mg/l	35,00
Profundidad útil del humedal	h	m	0,70
Pendiente del estanque	s	%	0,10
Medio soporte			Grava
Tamaño de grano	mm		25,00
Conductividad hidráulica	K_s	m^3/m^2*d	1000,00
Porosidad	η		0,35
Constante de Velocidad	K_{20}	1/d	0,68
Constante de velocidad	K_t	1/d	0,51
Área superficial	A_s	m^2	14,84
Diseño Hidráulico			
Área sección transversal	A_{sp}	m^2	0,08
Ancho	W	m	0,8
Largo	L	m	18,60
Recalculando, valores finales			
Área superficial del humedal	A_s	m^2	14,84
Ancho del humedal	W	m	2,40
Largo	L	m	6,20
Tiempo de residencia hidráulico	t	días	5,00

Tabla 5. Resumen dimensionamiento humedal artificial

6. CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DEL HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL

6.1 Construcción

El humedal se construyó en la localidad de Pomaire, perteneciente a la comuna de Melipilla, Región Metropolitana, Chile. El prototipo se desarrolló en una parcela de 2000 m^2 con árboles frutales y nativos de la zona con la existencia de una casa de 60 m^2 en la que habita una familia de 4 personas. El sistema construido contempla tres subunidades que conforman el sistema de tratamiento. La primera parte lo compone un sistema de pretratamiento, luego el humedal artificial y finalmente un acumulador de agua tratada para ser dispuesto a sistema de riego por goteo.

A continuación, se presentan los componentes seleccionados para el sistema de tratamiento de aguas domiciliarios contemplados en este proyecto.

6.1.1 Sistema Pretratamiento

El sistema de pretratamiento cuenta con un desgrasador a la salida del lavaplatos, lo que permite que las plantas no se obstruyan en sus capilaridades con aceites y grasas provenientes de la comida de la casa. Luego, las aguas residuales recolectadas desde la casa van a parar a una fosa séptica, que sirve de estanque acumulador y homogenizador del sistema, permitiendo que los sólidos de gran tamaño decanten en su primera etapa.

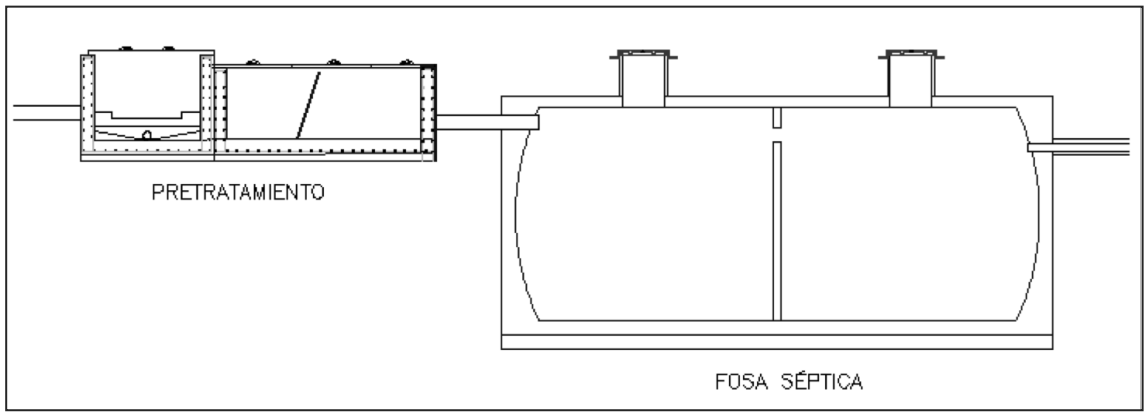

Figura 10. Esquema sistema de pretratamiento

Fuente: (García, J. & Corzo, A., 2008)

6.1.2 Humedal Artificial

6.1.2.1 Agua Residual.

El agua utilizada es el agua residual domiciliaria de la casa, utilizando la totalidad de las aguas provenientes de la fosa séptica, que para este caso corresponde a aguas negras (ver capitulo 4), sin considerar la grasas y aceites que son retenidas en la cámara desgrasadora previa a la fosa séptica.

6.1.2.2 Material Aislante.

Se utiliza una geomembrana de PVC flexible de espesor 0,2 mm, como material impermeable entre las capas de suelo natural y las paredes de los humedales. Este material se seleccionó debido a la vida útil de la membrana y su flexibilidad, lo que permitirá que este humedal funcione al menos unos 40 años sin tener filtraciones o ruptura del material aislante provocado principalmente por raíces de árboles o plantas aledañas.

Figura 11. Impermeabilización humedal artificial

Fuente: Elaboración propia

6.1.2.3 Sistema de entrada y salida de aguas

El sistema de entrada consiste en la distribución homogénea del caudal de salida de la fosa séptica, por ende, se utiliza tubos de PVC sanitario de 110 cm de diámetro perforados en la parte baja del tubo y a lo largo de todo este, con la finalidad de poder abarcar el ancho completo del humedal una vez ingresada el agua, tal cual se muestra en la siguiente imagen.

Figura 12. Instalación entrada desde fosa séptica

Fuente: Elaboración propia

Figura 13. Instalación entrada de aguas contaminadas.

Fuente: Elaboración propia.

El sistema de salida cuenta con PVC de 32 mm de diámetro, con un sistema de captación a lo ancho del humedal, saliendo en tres diferentes rebalses. En caso de obstrucción de una parte, el agua tratada puede salir por las dos partes restantes.

EL tubo al igual que en la entrada es, en este caso, perforado de manera rectangular para tener una menor posibilidad de obstrucción.

Figura 14. Instalación salida de aguas tratadas.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 15. Instalación de tubería de salida.

Fuente: Elaboración propia.

6.1.2.4 Soporte.

En la entrada y salida del sistema se utiliza bolones (piedras redondas) de 150 mm de diámetro aproximadamente, para permitir así una mejor distribución de las aguas residuales, impidiendo que estas se saturen o se obstruya el paso. Se utiliza grava media tipo huevo (grava redonda) de 25 mm de diametro aproximadamente, proveniente de rio, para el relleno general del humedal. Respecto al valor de las propiedades hidrogeológicas para este material, se asume un valor para la porosidad (n) de 0,35 y de la conductividad hidráulica (K_s) de 1.000 m^3/m^2*d, según se muestra en la tabla 4.

Figura 16. Tipos de material soportante.

Fuente: Elaboración propia.

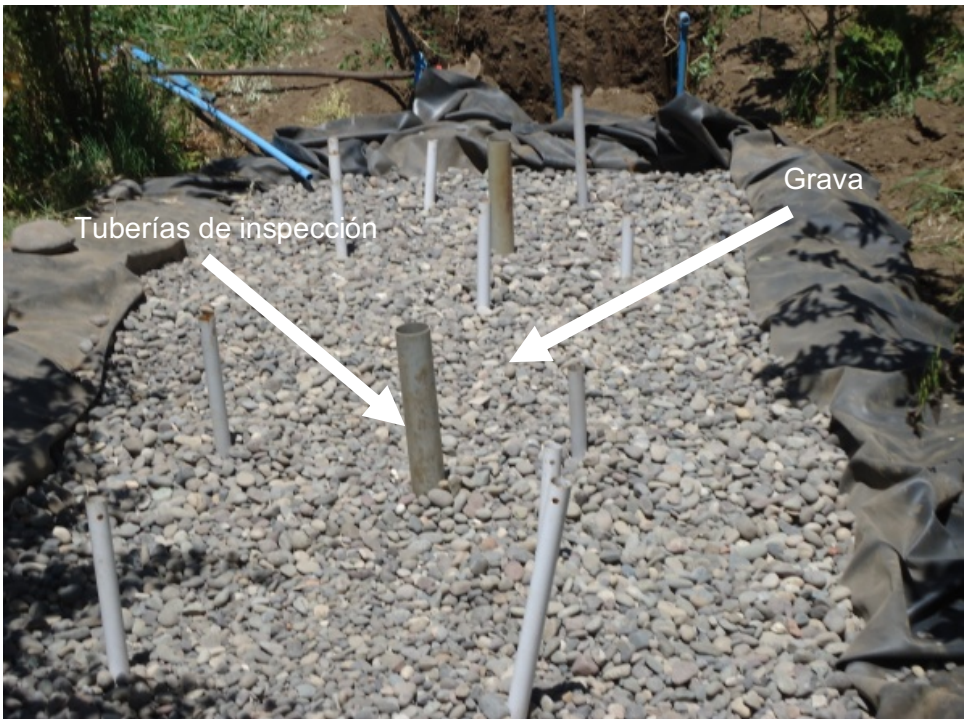

Figura 17. Incorporación material soportante.

Fuente: Elaboración propia.

6.1.2.5 Vegetación.

Se utilizaron *Scirpus spp*., las cuales fueron extraídas de una zanja a un costado de la carretera, con un promedio en longitud de las raíces de 20 cm. Se extrajeron 17 plantas, las cuales fueron plantadas equidistantes unas de otras. Para estos sistemas se deben plantar entre 3 a 6 unidades/m^2.

Además, se agregaron 6 plantas *Canna Indica* de color rojo, para ver su capacidad de adaptación al medio y su posible proliferación, dándole tanto la posibilidad de depuración de las aguas como una característica estética del humedal.

.

Figura 18. Plantación *Scirpus spp.*
Fuente: Elaboración propia.

Figura 19. Plantas *Scirpus spp y Canna Indica.*
Fuente: Elaboración propia

6.1.3 Sistema acopio y riego de agua tratada

Al final del humedal artificial de flujo subsuperficial, se recolectan las aguas a través de rebalse del sistema, captándolo en un recipiente de 1000 litros de volumen, el cual sirve de almacenador de agua tratada hasta que se llene y sea vaciado por el sistema de riego. El riego utiliza una bomba Pedrollo de 0,5 Hp, junto a un sistema de interruptor de nivel Bestflow, el cual es accionado una vez que el estanque se encuentra cercano a su llenado, encendiendo la bomba que succiona el agua y la envía a los diferentes arboles conectados a través de la tubería de plansa de ½ pulgada con sus respectivos goteros.

Figura 20. Construcción sistema de almacenaje agua tratada.
Fuente: Elaboración propia

Figura 21. Sistema almacenaje y riego.
Fuente: Elaboración propia

Figura 22. Sistema riego por goteo.
Fuente: Elaboración propia.

6.2 Operación y mantención

Aunque los humedales artificiales son "tecnologías sencillas", el sistema requiere de un mantenimiento adecuado por parte de una persona capacitada con los conocimientos básicos.

Las unidades de pretratamiento requieren de mantenimientos que dependen del tipo de tecnología, pero que a modo general, tiene relación con el retiro cada cierto tiempo de las grasas acumuladas en los desgrasadores y la revisión de la fosa séptica cada 2 a 3 años, donde los lodos sedimentables del sistema tienen que ser retirados.
A modo general en los humedales artificiales las tareas operativas necesarias para mantener el lecho filtrante, incluyen el control periódico de:

- Bombas
- Las estructuras de entrada para revisar obstrucciones y nivel de agua
- Las estructuras de salida para revisar el nivel de agua
- La relación de carga hidráulica y cargas contaminantes, es decir, concentraciones de los afluentes y efluentes de DBO_5 y solidos sedimentables, así como el caudal del afluente.
- Enfermedades en la vegetación de los humedales, insectos, etc. (quitar las malas hierbas y plantas depredadores hasta que la vegetación de los humedales está plenamente establecida).

Si se ignora el mantenimiento tarde o temprano ocurrirán las siguientes consecuencias:

- Distribución irregular del flujo
- Sobrecargas locales y con olor
- Deterioro de la eficiencia de tratamiento.

Por otro lado, es muy importante revisar el lecho filtrante para evitar la obstrucción.

Las plantas idealmente deben ser podadas en otoño una vez que su ciclo vegetativo ha terminado. Esto permitirá que no haya acumulación de materia orgánica en el humedal y que conlleve a un posible suministro de fuente de carbono para la desnitrificación, si la eliminación de nitrógeno es importante. Los beneficios de podar las plantas de los humedales artificiales, permite que los nutrientes que han sido tomado por las plantas sean removidos del sistema y que el material vegetal pueda ser utilizado como cultivo de forraje o abono según sean los casos del tipo de contaminantes a tratar.

7. RESULTADOS Y DISCUSIONES

7.1 Muestreos del Humedal Artificial

Para la realización del muestreo y posterior análisis de datos del humedal artificial de flujo subsuperficial ubicado en el poblado de Pomaire; se llevaron a cabo las actividades de planificación de muestreos, medición de la calidad del agua domiciliaria, monitoreos, análisis de laboratorio, análisis de datos, y finalmente estimación de la eficiencia de remoción de contaminantes en el sistema de tratamiento. Cada una de las actividades se detalla a continuación.

7.1.1 Planificación de Muestreo

Las mediciones y tomas de muestras se planificaron en tres etapas. La primera muestra, se tomaron los análisis del agua previo al humedal artificial, con el fin de tener valores iniciales de la contaminación del agua residual, día 0. La segunda, se tomaron los análisis de agua posterior al tratamiento del humedal artificial, pero en tempranas etapas de iniciadas las operaciones, a los 86 días. Finalmente, la última muestra, se tomaron los análisis de agua una vez estabilizado el sistema, donde fuera un tiempo prudente en que las plantas y el sistema estuviesen en condiciones de equilibrio, que para el caso, fue a los 1036 días de iniciada la operación.

Muestreo	Tiempo [días]	Fecha
Muestreo Nº1	0	22/05/2014
Muestreo Nº2	86	28/08/2014
Muestreo Nº3	1036	23/06/2017

Tabla 6. Fechas de muestreo.

7.1.2 Mediciones de calidad del agua

Las mediciones se llevaron a tempranas horas de la mañana, con la finalidad de que la temperatura no afectara a las tomas de muestras. Luego fueron entregadas al laboratorio Viamed y Mrlab el mismo día, al cabo de algunas horas. Las muestras fueron recolectadas del agua residual inmediatamente y envasadas a los frascos correspondientes, según indicaciones de los laboratorios, donde se señaló la fecha, hora, datos de aforo y lugar de toma de muestra, valores que pudieran influir en las determinaciones analíticas. El mismo

día, las muestras debidamente etiquetadas, fueron empacadas en un cooler acondicionado para su posterior recepción y análisis en el laboratorio. Finalizada la toma de muestras, se realizó el registro en la cadena de custodia para cada muestra, y se utilizó hielo-gel dentro del cooler para conservar la temperatura adecuada para la preservación de las muestras.

Figura 23. Frascos de muestras.

Figura 24. Rotulado de muestras.

Figura 25. Conservación de muestras.

7.1.3 Análisis de laboratorio

De acuerdo a las características del sistema de tratamiento se analizaron los siguientes parámetros para determinar la eficiencia en la remoción de los principales contaminantes de las aguas residuales domiciliarias.

- pH y conductividad.
- Sólidos (SS, SST), Aceites y grasas, DBO_5, DQO, nitrógeno total kjeldahl, fósforo total y coliformes totales.

Los análisis de laboratorio se efectuaron bajo las siguientes metodologías.

Parámetros	**Unidades**	**Método**
pH	U pH	NCh 2313/1.Of1995
Conductividad	µS/cm	S.M. 2110B
Solidos suspendidos totales	mg/l	NCh2313/3.Of1997
Solidos sedimentables	mg/l	NCh2313/4.Of1995
DBO_5	mg/l-O_2	NCh2313/5.Of2005
DQO	mg/l-O_2	NCh 2313/24.Of1997
Nitrógeno total kjeldahl	mg/l-NH_4	NCh 2313/28.Of2009
Fósforo total	mg/l-PO_4	NCh2313/15.Of2009
Grasas y aceites	mg/l	NCh2313/6.Of2015
Coliformes totales	NMP/100 ml	NCh 1620/1.Of84

Tabla 7. Metodología de análisis de las muestras.

7.2 Análisis de resultados.

7.2.1 Análisis cualitativo

Durante los muestreos se identificaron las condiciones de operación y mantenimiento, a fin de hallar posibles cambios importantes que pudieran ser adversos al correcto funcionamiento del sistema de tratamiento. Se realizó una valoración visual del estado del humedal de manera cualitativa. Se verificó la aparición de especies vegetales invasoras, así como la presencia de olores y mosquitos. La valoración de las plántulas se basó en la revisión de aspectos como densidad, color y tamaño.

Figura 26. Sistema en operación.

Los resultados encontrados de las condiciones de operación y mantenimiento fueron que, durante el proceso de operación, el sistema fue podado una sola vez, quedando al segundo año sin efectuar dicha tarea. Las plantas *Scirpuss spp* se encontraban en perfectas condiciones, creciendo cada vez más y cubriendo la totalidad del sistema de humedal artificial, teniendo una altura promedio de 2 metros. Las plantas ornamentales *Canna Indica,* fueron absorbidas y no proliferaron a causa de que las plantas *Scirpus spp* aumentaron su cobertura y utilizaron la totalidad del espacio.

El sistema de riego funciono perfectamente, hasta que durante un tiempo dejo de ser automático, pasando a ser accionado de manera manual, a causa de una avería del sistema de control automático de nivel del estanque de acumulación.

Se presentaron especies vegetales invasoras de tipo enredadera, que durante un tiempo ingresaron al sistema, y luego fueron retiradas como parte del mantenimiento.

No se observaron olores en el humedal artificial, pero si un leve olor en el estanque de acumulación.

El humedal artificial no mostró colmatación del medio granular en toda su extensión, considerando a modo visual un correcto funcionamiento del sistema. Este parámetro es de suma importancia para determinar un correcto funcionamiento de las plantas, siendo una de las principales causas de observación cuando el sistema no esta funcionando.

7.2.2 Análisis cuantitativo

Los parámetros analizados en laboratorio se presentan en la tabla 8, entregando los valores referidos a las muestras 1, 2 y 3 del humedal artificial subsuperficial estudiado.

Parámetros	**Unidades**	**Muestra Nº 1**	**Muestra Nº 2**	**Muestra Nº 3**
pH	U pH	7,6	7,9	7,2
Conductividad	µS/cm	1040,0	2100,0	1267,0
Solidos suspendidos totales	mg/l	193,2	12,7	12,0
Solidos sedimentables	mg/l	<5,0	<5,0	< 2,0
DBO_5	mg/l-O_2	322,1	21,4	152,6
DQO	mg/l-O_2	767,9	54,5	174,4
Nitrógeno Kjeldahl	mg/l-NH_4	77,9	76,1	55,2
Fósforo total	mg/l-PO_4	34,5	29,8	3,9
Grasas y aceites	mg/l	77,6	<5,0	14,2
Coliformes totales	NMP/100 ml	14,0 E5	1,7 E5	2,6 E5

Tabla 8. Resumen valores de análisis de las muestras.

Fuentes: elaboración propia.

7.2.2.1 Salinidad

Atendiendo a la clasificación de salinidad del agua en la tabla 1, se encontró que el agua residual doméstica de entrada al sistema presentó una salinidad ligera con un valor de 1040 µS/cm, y el agua tratada posterior al humedal de flujo subsuperficial una vez estabilizado el sistema, obtuvo una salinidad ligera levemente mayor a la entrada con un valor de 1267 µS/cm.

7.2.2.2 pH

Los valores de pH para las aguas de salida del sistema de humedales presentaron un riesgo nulo en la restricción de su uso para riego, ya que el pH medio de 7,2 se encuentra dentro del rango establecido como normal para la nutrición de las plantas.

7.2.2.3 Grasas y aceites

El contenido de aceites y grasas en el efluente del humedal de flujo subsuperficial no superó el valor de 14,2 mg/L, siendo éste, un valor bastante bajo en relación a la entrada. La capacidad de eliminación de aceites y grasas por los humedales de flujo subsuperficial es limitada, ya que su asimilación por parte de las plantas es escasa. Una posible vía de eliminación es la fermentación de los ácidos grasos para producir acetatos, CO_2 y H_2 que tiene lugar durante la descomposición anaerobia de la DBO_5. Se consiguieron reducciones elevadas superiores al 88 % respecto de la entrada a los 1036 dias de funcionamiento del sistema.

7.2.2.4 Solidos suspendidos totales

La figura 27 representa los valores de los sólidos suspendidos totales encontrados al inicio antes de que ingrese al sistema, la salida al cabo de iniciada la operación a los 86 días y una vez estabilizado el sistema al cabo de 1036 días operando. Como se puede apreciar en los valores encontrados en las muestras, el sistema reduce en un 94% los sólidos suspendidos totales respecto de la entrada al sistema, una vez estabilizado. Rangos de eficiencia que permiten el cumplimiento de la normativa chilena para el uso en sistemas de regadío.

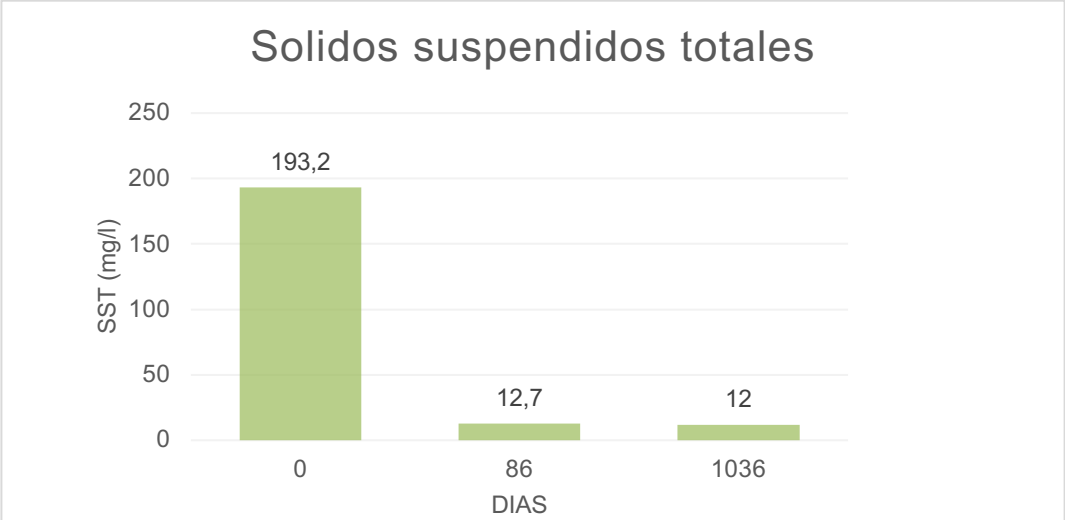

Figura 27. Solidos suspendidos totales.

Fuente: Elaboración propia

7.2.2.5 Demanda biológica de oxigeno

La figura 28, representa la evolución en el tiempo de la DBO_5 encontrada durante el periodo de estudio. Las aguas de entrada al sistema presentaron valores típicos de un agua residual urbana media-fuerte puesto que el valor fue de 322,1 mg/l. El humedal superficial presentó un contenido de DBO_5 posterior al sistema una vez estabilizado a los 1036 dias de 152,6 mg/l, lo que entrega una eficiencia de remoción respecto de la entrada, del orden del 53%. La norma Chilena Nch1333, no comprende valores de DBO_5 para uso de riego, sin embargo, de acuerdo al cuadro resumen (anexo C), el valor de la salida del sistema cumpliría con parámetros internacionales de concentración de mgO_2/l para el uso en riego (U. de Chile, 2005), sin embargo no cumpliría para la normativa chilena para descargas o infiltración del Decreto Supremo 90 y Decreto Supremo 46.

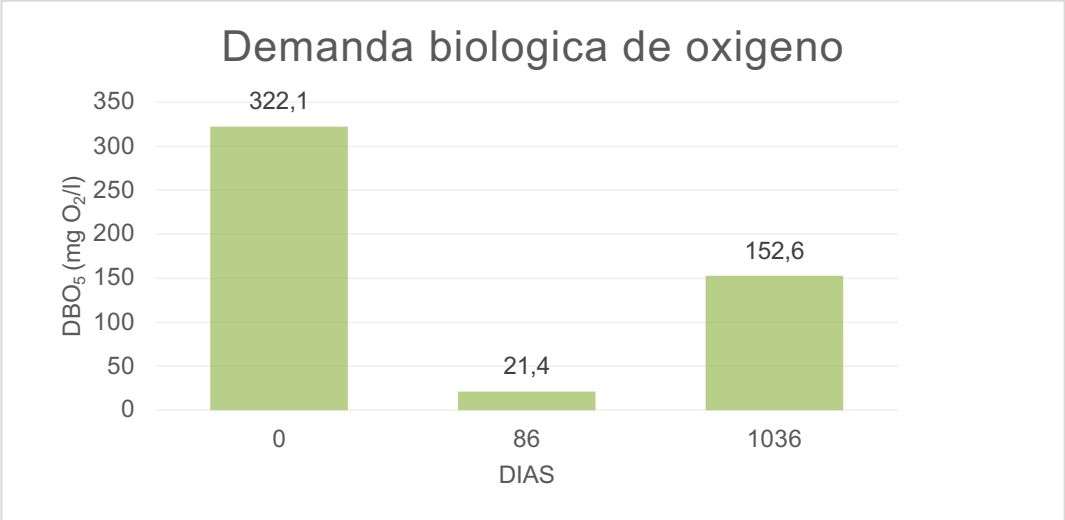

Figura 28. Demanda biológica de oxigeno

Fuente: elaboración propia

7.2.2.6 Demanda química de oxigeno

En la figura 29, representa las concentraciones de DQO durante el proceso de evaluación del humedal. Los valores determinan una considerable disminución de la carga orgánica presente en la primera medición a los 86 días, y luego se muestra un aumento cuando el sistema se encuentra estabilizado. Los valores de salida consideran una reducción del contaminante de 77%, sin embargo, no son suficientemente bajos como para descargar las aguas tratadas a las aguas superficiales.

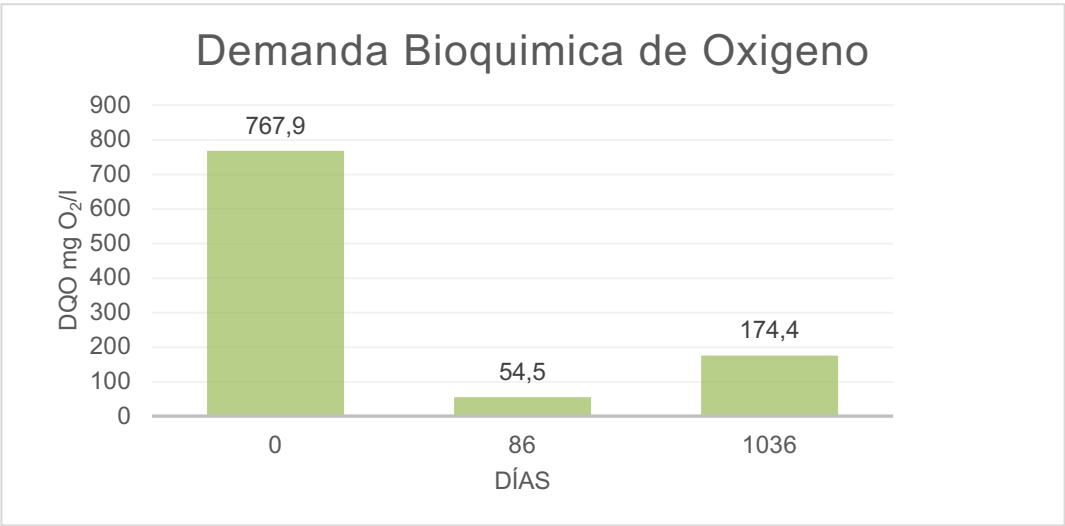

Figura 29. Demanda química de oxigeno

Fuente: elaboración propia

7.2.2.7 Nitrogeno Total Kjeldahl

En la figura 30 se presentan las reducciones de Nitrogeno total kjeldahl, parámetro analizado como indicador de los nitrógenos presentes en las aguas residuales.

El porcentaje de reducción en el efluente del humedal artificial para el nitrógeno fue del 29 % respecto a la entrada a los 1036 días. Los rendimientos de eliminación para el nitrógeno se mantuvieron bajos, lo que puede deberse, a que los tiempos de residencia hidráulico del sistema son pequeños para que ocurran los procesos de nitrificación y desnitrificación necesarios como mecanismos de remoción del contaminante. Este parámetro no cumple la normativa para el uso en riego. (U. de Chile, 2005)

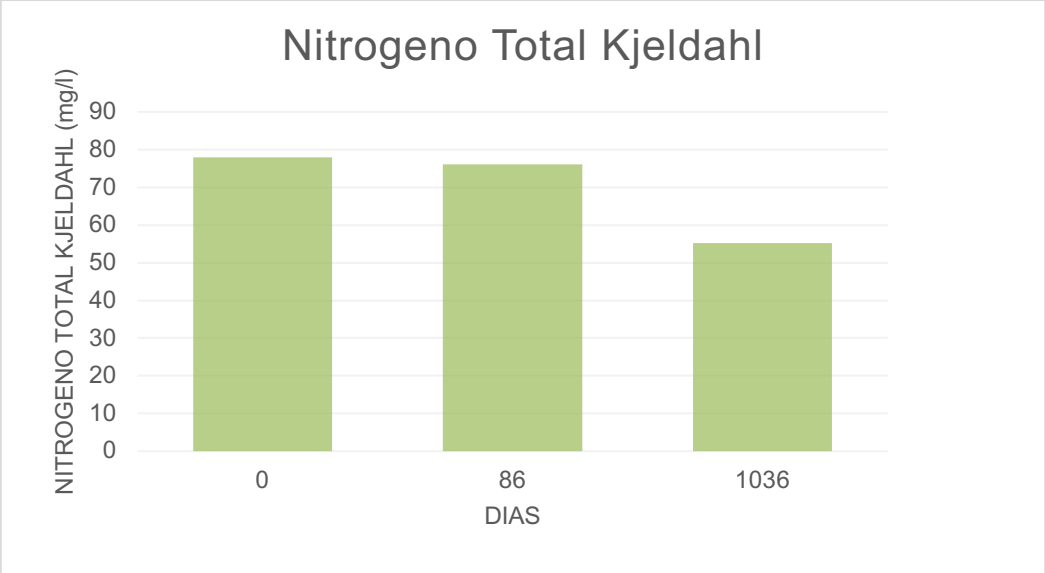

Figura 30. Nitrógeno total kjeldahl.

Fuente: elaboración propia.

7.2.2.8 Fósforos totales

En la figura 31, se presentan las reducciones de fósforo total, parámetro analizado como indicador importante que se encuentra presentes en las aguas residuales.

El humedal de flujo subsuperficial horizontal presentó un incremento en la capacidad de eliminación de fósforo total desde el inicio de su funcionamiento hasta la estabilización del sistema. Los altos valores de eliminación de fosforo superiores al 89%, considerando los contenidos en el agua de entrada y salida del humedal, pudieron tener relación con los mecanismos de eliminación de fósforo comentados anteriormente capítulo 4. Los valores de eficiencia permiten el cumplimiento de la normativa chilena para el uso en sistemas de regadío.

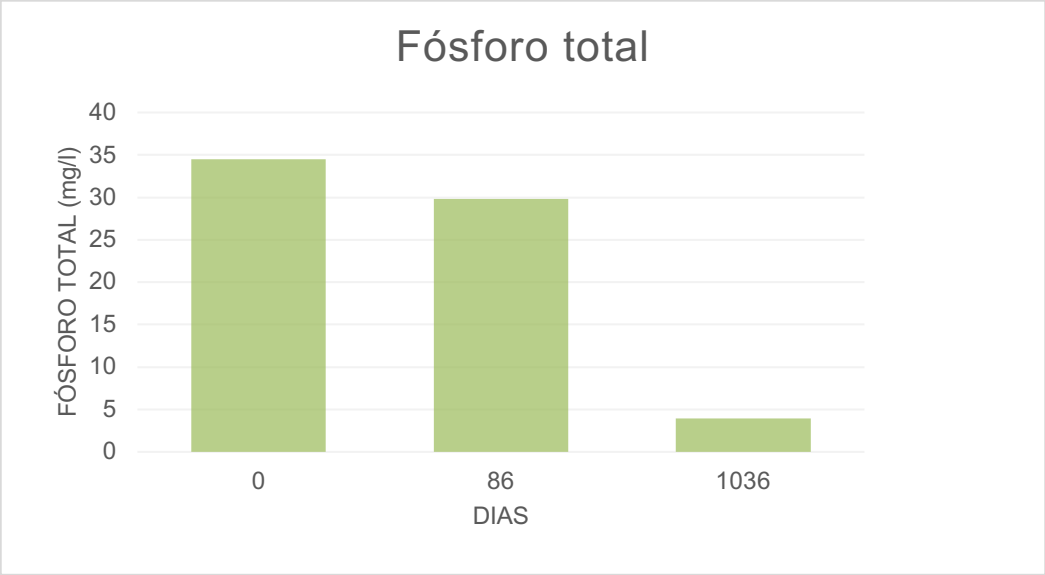

Figura 31. Remoción de fosforo.

Fuente: Elaboración propia.

7.2.2.9 Coliformes totales

Para este estudio se analizaron lo coliformes totales como análisis global de este parámetro. Sin embargo, la normativa Chilena utiliza el parámetro de coliformes fecales como limitante para el uso del agua para riego. Respecto de ello, podemos mencionar que la comunidad económica europea, utiliza normativa para el uso de aguas tratadas en el riego, valores del orden de menos de 10.000 coliformes totales por 100 ml y menos de 2000 coliformes fecales por 100 ml. (León, G., 1995).

De acuerdo a los valores de salida del humedal artificial, este sistema no estaría cumpliendo la normativa para uso del agua en riego agrícola. Pese a ello queda como análisis más detallado, el muestreo de los coliformes fecales, para determinar con certeza y cuantificar el subdimensionamiento que tuvo este sistema.

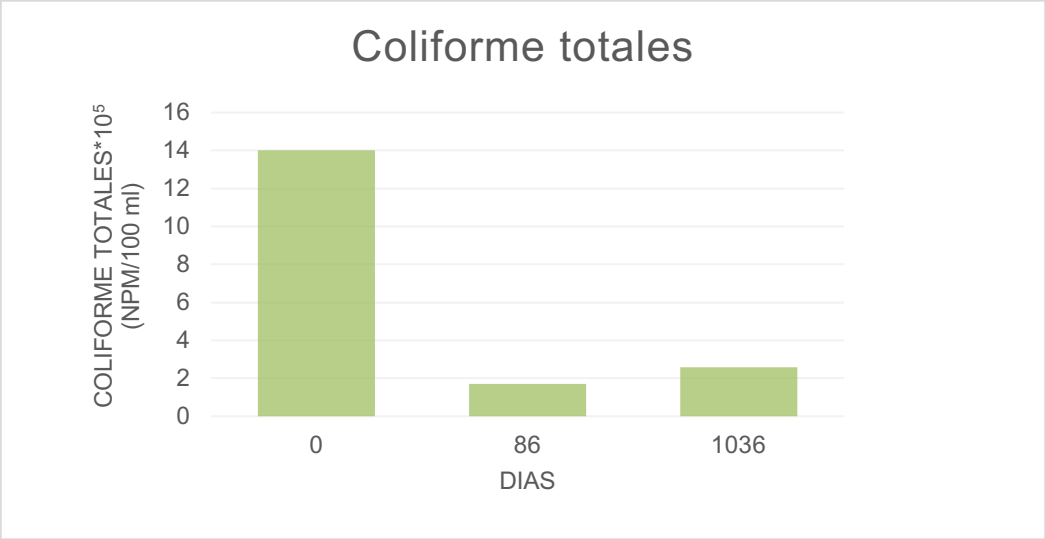

Figura 32. Coliformes totales

Fuente: Elaboración propia

7.2.3 Eficiencia de remoción

Con el fin de establecer el comportamiento de los parámetros de calidad del agua analizados en la salida del proceso de tratamiento, con respecto a las concentraciones de ellos en la entrada del mismo, se estima la eficiencia de remoción para algunas de las unidades del sistema. La eficiencia de remoción se determinó mediante la ecuación 20, al cabo de 86 dias de funcionamiento del sistema y luego a los 1036 dias, una vez estabilizado el sistema.

$$\%\, remoción = \frac{C_0 - C_e}{C_0} * 100. \qquad \textbf{(Ec. 20)}$$

Donde:

C_0 = la media del valor del parámetro de entrada.
C_e = la media del valor del parámetro de salida.

Parámetros	Unidad	Eficiencias de remoción (%) 86 dias	Eficiencias de remoción (%) 1036 dias
Solidos suspendidos totales	mg/l	93	94
DBO_5	mg/l-O_2	93	53
DQO	mg/l-O_2	93	77
Nitrógeno Kjeldahl	mg/l-NH_4	2	29
Fósforo total	mg/l-PO_4	13	89
Grasas y aceites	mg/l	94	82
Coliformes totales	NMP/100 ml	88	81

Tabla 9. Tabla resumen de eficiencias.
Fuente: Elaboración propia

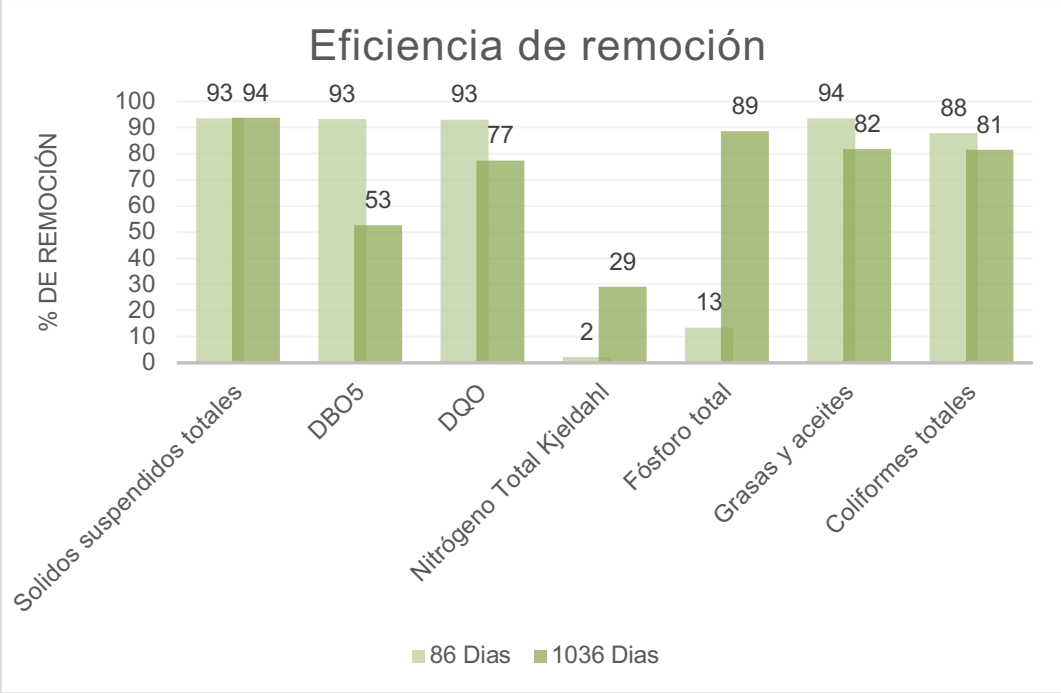

Figura 33. Eficiencia de remoción en el tiempo

Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar en la figura 33, respecto de la remoción de contaminantes estudiados de tipo orgánico, se obtuvieron mejores resultados en la remoción de los parámetros, DQO, solidos suspendidos totales, fósforos, grasas y aceites, y coliformes

totales, teniendo un orden de 77%- 94% de remoción a los 1036 dias. Por otro lado, la DBO_5 y el nitrógeno obtuvieron valores más bajos de remoción, del orden de 53% y 29% respectivamente.

La eficiencia de remoción de la DBO_5 y nitrógeno fueron bastante baja con respecto a los valores esperados según el diseño. Esto puede deberse a factores ocurridos durante las operaciones del sistema, a razón de que, durante el transcurso del segundo año no se cortó el material vegetal, por lo que el aporte que pudo reingresar al sistema, a través de la descomposición del material vegetal muerto, puede haber afectado los valores medidos.

Otro factor que pudo haber ocasionado la baja remoción de estos contaminantes, puede haber sido la detención automática durante un tiempo del sistema de riego por goteo, lo que puede haber afectado las mediciones tomadas.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 Conclusiones

A través del presente estudio, se logró evaluar la remoción de contaminantes de las aguas residuales, por medio de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal, sembrados con *Scirpus spp* para la planta de tratamiento de aguas residuales de una vivienda domiciliaria, en la localidad de Pomaire.

Se logró comprender el funcionamiento de los humedales artificiales, en particular el sistema de flujo subsuperficial horizontal, sus características, modelos de diseño, construcción, operación y mantención.

Del trabajo realizado se puede concluir que, en cuestión de remoción de contaminantes de tipo orgánico, se obtuvieron mejores resultados en la remoción de los parámetros, DQO, solidos suspendidos totales, solidos sedimentables, fósforos, grasas y aceites, y coliformes totales con un orden de los 77-94 % de remoción. Los parámetros de DBO y nitrógeno obtuvieron valores más bajos de remoción del orden de 53 y 29% respectivamente.

Los parámetros de colifornes totales y nitrógeno, no cumplieron la normativa para la utilización de las aguas tratadas en riego. Factores a determinar, como parámetros importantes y posiblemente limitantes en el diseño de este tipo de sistemas.

El humedal artificial empleado en el estudio experimental, demostró que puede ser una alternativa ideal para ser empleados como tratamiento de aguas residuales en localidades pequeñas y domiciliarias, utilizando el agua en sistemas de riego, siempre y cuando disminuyan los coliformes fecales y el nitrógeno total, condición que puede mejorar, si al sistema se le aumenta el tiempo de retención hidráulico, y también si se llevan a cabo las mantenciones periódicas.

Los humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial mejoran las cualidades organolépticas de las aguas residuales, ya que, pese a las características del agua, los sistemas en estudio no tenían ningún olor desagradable o color característico del afluente una vez estabilizado. Tampoco se desarrollaron olores fuertes en las instalaciones de los sistemas ni proliferación de roedores o zancudos.

Los humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal son una buena alternativa para el tratamiento de aguas residuales domésticas e incluso industriales, ya que no tienen mayores requerimientos, ni personal calificado para su mantenimiento, y los costos de operación e implementación son bajos.

La utilización de diferentes tipos de plantas en un mismo sistema, no es factible si no se hacen las mantenciones correspondientes, debido a que una de las especies se comporta como dominante sobre la otra, por ende, es poco probable que sobrevivan las demás. Sin embargo, entendemos que en los ecosistemas naturales conviven varias especies de plantas, lo que invita a que habría que estudiar mas detalladamente el comportamiento en sistemas artificiales.

8.2 Recomendaciones

Tomando en cuenta los resultados obtenidos en el desarrollo de este trabajo, se hacen las siguientes recomendaciones para que en futuras investigaciones no tengan este tipo de dificultades.

- Si los humedales artificiales van a ser utilizados para la remoción prioritaria de nitrógeno o coliformes totales, a la hora del diseño, se debe tener en cuenta tiempos de retención más amplios, que permitan que los mecanismos de remoción de contaminante operen mas tiempo.

- Es importante realizar un estudio de trazadores o tintas que se ingresan al inicio del sistema, para comprobar los tiempos de retención teóricos del diseño del humedal y así poder realizar los correctivos necesarios que pueden influir en la eficiencia de los sistemas.

- Se recomienda hacer cosechas cuando se observe que el humedal este en un estado de crecimiento avanzado, para optimizar la absorción de nutrientes por parte de las plantas.

- A la hora de realizar los análisis de laboratorio es muy importante la preservación adecuada de las muestras, así como la correcta aplicación de los métodos de ensayo.

- En un próximo estudio sobre humedales es muy conveniente dedicar un tiempo ideal para asegurar el funcionamiento correcto de los caudales y la hermeticidad de los lechos.

- Hacer análisis específicos de los coliformes fecales, para determinar con certeza el valor de salida, y cotejándolo con la normativa chilena de aguas para riego.

- Continuar el estudio de la evaluación de este tipo de humedales con diferentes concentraciones de materia orgánica y nitrógeno, y factores de seguridad más grandes, para permitir una correcta depuración de los contaminantes.

9. BIBLIOGRAFÍA

ASH. (2004). *Tratamiento Aguas Servidas: Situación en Chile*. Obtenido de http://www.sigweb.cl/biblioteca/TratamientoAguasServidas.pdf

Esval. (2014). Obtenido de http://portal.esval.cl/educacion/el-agua/aguas-servidas/

EPA. (1994). *https://www.epa.gov/*.

Ramsar. (1971). *http://www.ramsar.org/*.

MMA. (2013). Ministerio del Medio Ambiente.

Ramsar. (2017). Obtenido de http://www.ramsar.org/es/humedal/chile.

MMA. (2011). *Diseño del Inventario Nacional de Humedales y el Seguimiento Ambiental.*

Lahora, A. . (2003). *Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales. En, Paracuellos, M (Ed): Ecología, manejo y conservación de los humedales. Instituto de Estudios Almerienses.*

Cooper, P. et al. (1996). *Reed beds and constructed wetlands for wastewater treatment, WRc, Swindon.*

Seidel K. (1967). *Über die Selbstreinigung natürlicher Gewässer. Naturwissenschaften 63, 286–291.*

U. de Chile. (2005). *Criterios de calidad de aguas o efluentes tratados para uso en riego.* División de recursos hídricos y medio ambiente. Departamento de ingeniería civil.

Lara, J. (1999). *Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. Trabajo final de maestría. Universidad Politécnica de Cataluña.* Barcelona, España.

Delgadillo, O., et al. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA).* Cochabamba – Bolivia.

Superintendencia de Servicios Sanitarios. (2015). *Informe de Gestion del Sector Sanitario.*

Cowardin, L. (1979). The Classification of Wetlands and Deepwater Habitats of the United States. En C. e. al.

Heers, M. (2006). *Constructed wetlands under different geographic conditions: Evaluation of the suitability and criteria for the choice of plants including productive species. Masters thesis, Hamburg University of Applied Sciences, Germany Faculty of Life Sciences.* Germany.

Kamau, C. (2009). *Kamau, C. (2009) Constructed wetlands: potential for their use in treatment of grey water in Kenya, MSc thesis, Christian-Albrechts University, Kiel, Germany.*

Llagas, W. & Guadalupe, E. (2006). *Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. Revista del Instituto de Investigaciones FIGMM.*

Kolb, P. (1998). *Design of a constructed wetland (pilot plant) for the reclamation of the river Besós.*

Paredes, D. & Kuschk, P. (2001). *Tipo de humedales y mecanismos de remoción. Seminario humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales.* Armenia, Manizales, Pereira.

Mitsch, W. & Gosselink, J. (2000). *Wetland, 3ª edicion.* New York.

Benefield, L. & Randall, C. (1980). *Biological process desing for wastewater treatment. Pretice Hall,Inc. Englewood Cliffs, N.J.*

Lizama, K.; Fletcher, T. & Sun, G. (2011). *Enhancing flow cosntructed of arsenic, baron and heavy metal in subsurface flow constructed wetlands using different supporting media.*

Tanner, C.; Sukias, J. & Upsdell, M. (1999). *Substratum phosphorus accumulation during maturation of gravel-bed constructed wetland.*

Brix, H.; Arias, C. & Bubba M. (2001). *Media selection for sustainable phosphorus removal in subsurface flow constructed wetlands.*

Jillson, S.; Dahab, M.; Woldt, W. & Surampalli, R. (2001). *Pathogen and pathogen indicator removal characteristics in treatment wetlands systems.*

Chipasa, K. & Medrzycka, K. (2006). *Behavior of lipids in biological wastewater treatment processes.*

Kadlec, R. & Wallace, S. (2009). *Treatment wetlands. 2nd Edition.* Florida, USA.: CRC Press, Boca Raton.

Ayers, R. & Westcot, D. (1985). *Water quality for agriculture. FAO, Irrigation and Drainage Paper 29.* Roma, Italia.

Metcalf & Eddy. (2003). *Wastewater Engineering. Treatment and Reuse. Fourth edición.*

Olías, M.; Cerón, J. & Fernández, I. (2005). *Sobre la utilización de la clasificación de las aguas de riego del U.S. Laboratory Salinity (USLS).*

Vymazal, J. (1999). *Nitrogen removal in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow-can we determine the key process? In: Vymazal, J. (Ed.), Nutrient Cycling and Retention in Natural and Constructed Wetlands.* The Netherlands.

Reed, S.; Crites, R. & Middlebrooks, E. (1995). *Natural Systems for Waste Management and Treatment.*

Steiner, G. & Watson, J. (1993). *General design, construction and operation guidelines: Constructed wetlands wastewater treatment systems for small users including individual residences.* Chattanooga, TN, United States.

Kadlec, R. & Knight, R. (1996). *Treatment Wetlands.*

Terzaghi, K. & Ralph, P. (1973.). *Mecánica de suelos en la Ingeniería Practica. .* Segunda Edición .

García, J. & Corzo, A. (2008). *Depuración con Humedales Construidos.*

León, G. (1995). *Parámetros de calidad para el uso de aguas residuales. Guías de calidad de efluentes para la protección de la salud.*

Ortega et al. (2010). *Manual para la implementación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones.*

Metcalf & Eddy. (1990). *Report of Metcalf & Eddy Companies, Inc. on the January 6, 1990 Upset of the East Honolulu Wastewater Treatment Plant.*

10. ANEXOS

10.1 Anexo A

Memoria de Cálculo

Para calcular el Área superficial del humedal artificial, se determina lo siguiente:

Caudal medio diario se calcula con una dotación por habitante de consumo diario de agua de 200 l/d, quedando para la casa de 4 personas, un caudal medio diario de Q=0,8 m^3/d.

$$Q = caudal\ diario\ Persona * Nº\ de\ Personas$$

$$Q = 200\frac{l}{d * PE} * 4\ PE = 800\frac{l}{d} = 0{,}8\ \frac{m^3}{d}$$

La carga orgánica a tratar se estima según tabla 2 “Características Aguas Servidas Domésticas” de los valores típicos de las aguas negras de Chile. Se considera un valor de aguas entre medias y fuerte.

$$C_o = 350\ \frac{mg}{l}\ de\ DBO_5$$

Asumiendo una eficiencia de remoción del orden del 90% de la DBO_5, la carga orgánica de salida se estima en C_e=35 mg/l.

$$C_e = C_o * (1 - \%remoción) = 350\frac{mg}{l}DBO_5 * (1 - 0{,}9)$$

$$C_e = 35\frac{mg}{l}DBO_5$$

La profundidad del humedal se establece en h=0,7 m de acuerdo a la profundidad de raíces que posee el *Scirpus spp*.
El cálculo de la constante de velocidad K_t se calcula mediante las ecuaciones 9 y 10.

$$K_t = K_{20} * (1{,}06)^{(T-20)} \qquad (Ec.9)$$

Donde la contaste de velocidad $K_{20} = 0{,}678 * d^{-1}$ y la temperatura del agua T= 15(°C).

$$K_t = 0{,}507\ d^{-1}$$

El medio soporte es gravilla fina, determinando valores de conductividad hidráulica K_s=1000 m^3/m^2*d, porosidad η=0,35 y la pendiente se fija en S=0,01.

Finalmente se puede determinar el área superficial a través del dimensionamiento biológico para la remoción de la DBO.

$$A_s = \frac{Q * \ln\left(\frac{C_o}{C_e}\right)}{K_t * h * \eta} \qquad (Ec. 13)$$

$$A_s = 14{,}84\ m^2$$

Luego se calcula el tiempo de residencia hidráulico del sistema.

$$t = \frac{L * W * h * \eta}{Q} \qquad (Ec. 11)$$

$$t = 5\ dias$$

Luego se procede al dimensionamiento hidráulico del sistema para determinar el área transversal mínima necesaria para que ocurra el flujo pistón y el sistema no se obstruya.
Se determina la sección transversal del humedal aplicando la ecuación 15, con un valor de conductividad hidráulica de K_s = 1000 m^3/m^2*d y una pendiente del lecho de 0,01 m/m.

Dado que con el tiempo la conductividad irá disminuyendo a causa del crecimiento de la biopelícula “biofilm” y retención de partículas, se recomienda usar un factor de seguridad 7 (Ortega et al, 2010)

$$A_{sp} = \frac{Q_{med,d}}{K_s * s} \qquad (Ec. 15)$$

$$A_{sp} = 0{,}08\ m^2$$

Calculada el área de la sección transversal, y una vez fijada la profundidad (h=0,7), se determina el ancho del humedal:

$$W = \frac{A_{sp}}{h} \qquad (Ec. 16)$$

$$W = 0{,}8\ m$$

Conocido el ancho y teniendo en cuenta la superficie determinada con el dimensionamiento biológico se calcula la longitud del sistema:

$$L = \frac{A_s}{W} \qquad (Ec. 17)$$

$$L = 18{,}6\ m$$

Por último se debe verificar que la relación largo:ancho sea como mínimo 1:1. En caso de que no se cumpla esta condición, es decir, que el largo sea mayor que el ancho (que es lo que suele suceder en la mayoría de los casos), se debe dividir la superficie total en diferentes celdas que funcionarán en paralelo, que sí cumplan este criterio. Se procede a dividir el largo en 3 secciones, quedando 3 humedales en paralelo unidos, con una relación de largo:ancho levemente mayor que 2:1.

Por lo tanto, finalmente nos queda un humedal artificial subsuperficial de 14,84 m^2 de área superficial y con dimensiones de L = 6,2 m y W = 2,4 m, y un tiempo de residencia de t= 5 días.

10.2 Anexo B

Resultados de análisis de muestreos.

MRLAB
Laboratorio Manuel Ruiz y Cía. Ltda.

INFORME DE ENSAYO

Nº INFORME MR-LAB:	Y05-39		
CLIENTE:	Leonardo Parrao López		
FECHA DE INGRESO:	15-05-2014	HORA:	13:51
TIPO DE MUESTRA:	AGUAS RESIDUALES		
N° DE MUESTRAS:	2	MUESTREO POR:	Cliente ☑ Laboratorio ☐
FECHA DE MUESTREO:	15-05-2014		
HORA DE MUESTREO:	Ver Observaciones		
PRESERVANTES:	Natural		
LUGAR DE MUESTREO:	Ver Observaciones		

RESULTADOS:

Parametros	Unidad de Expresión	MUESTRAS Nº1	MUESTRAS Nº2	FECHA ANALISIS	HORA ANALISIS	METODO ANALISIS
pH*	u pH	7,61	7,92	15-05-14	14:00	NCh 2313/1 Of 95
Coliformes Totales	NMP/100ml	1400000	170000	15-05-14	15:40	NCh 2313/22 Of 95
DBO5	mgO_2/L	322,1	21,4	15-05-14	18:10	NCh 2313/5 Of 05
DQO	mg/L	757,9	56,5	15-05-14	15:37	NCh 2313/3 Of 95
Nitrógeno Kjeldahl	mg/L	77,9	76,1	27-05-14	10:00	MFQ-AR-12
Fosforo Total	mg/L	34,48	29,84	22-05-14	10:30	NCh 2313/15 Of 97
Sólidos Sedimentables	mg/L	<5	<5	15-05-14	15:00	NCh 2313/4 Of 95
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	159,2	12,7	15-05-14	14:50	NCh 2313/3 Of 95
Aceites y Grasas	mg/L	77,6	<5	20-05-14	16:20	MFQ-AR-05
Conductividad	(µS/cm)	1040	2100	15-05-14	15:00	SM 2510 B

Observaciones:

SM: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 21ST Edition 2005
MFQ-AR-12 : Método validado basado en NCh 2313/29, Of 95
MFQ-AR-05 : Método validado basado en NCh 2313/6, Of 97
*pH tomado en laboratorio
Análisis Coliformes Totales Subcontratado a Lab.Químico Sanitario Carlos Latorre S.A. - Inf. Nº 0914-1773
Análisis de DBO5 DQO Subcontratado a Lab.Químico Sanitario Carlos Latorre S.A. - Inf. Nº 0P56-1210-1211
Valores informados menor a (<), corresponden a valores menores al límite de detección y/o cuantificación del laboratorio según corresponda.
Muestra Nº1 Fosa (Hora Muestreo 10:42-10:53)
Muestra Nº2 Estanque Acumulador (Hora Muestreo 10:34-10:33)

Mª Gabriela Ruiz Riquelme
Ejecutivo Técnico

V.Manuel Ruiz Monje, Ph.D.
Gerente General

Santiago, 28 de Mayo del 2014

Señor
Leonardo Parrao López
San Martín s/n - Pomaire

ESTE INFORME NO DEBE SER REPRODUCIDO PARCIALMENTE SIN LA AUTORIZACIÓN ESCRITA DE MR-LAB

Laboratorio Acreditado por el Sistema Nacional de Acreditación del INN, como Laboratorio de Ensayo según NCh-ISO 17025.Of2005, Certificados LE 191 y LE 192 - Vigencia hasta el 28/11/2016

Laboratorio Manuel Ruiz y Compañía Limitada, Santa Elena Nº 1209, Santiago / Fono: 2554 3545, Fax: 2555 7758
E-mail: info@mrlab.cl / Web: www.mrlab.cl

VIAMED
TECHNICAL LABORATORY SpA

RGG-VTL N° 5/1
Edición 002, Abril 2016

INFORME DE ENSAYO N° 13.256 - 17

Empresa Solicitante	Humedal Chile	N° de muestras analizadas	1	
Dirección	Millahi I1 Puerto Varas	Entidad muestreadora	Muestreado por el Cliente	
Atención a	Leonardo Parrao	Fecha y hora inicio muestreo	23-06-2017	08:00 Hrs.
Dirección Muestreo	Muestredo por el cliente	Fecha y hora Termino muestreo	23-06-2017	08:20 Hrs.
Número de Solicitud	23-06-2017	Fecha y hora recepción	23-06-2017	12:57 Hrs.
Tipo de muestra	Ril	Fecha de emisión de informe	07-07-2017	

Análisis	UNIDADES	RIL	Fecha/Hora Inicio Análisis	Fecha/Hora Termino Análisis	Metodología
Coliformes Totales	NMP/100 mL	2,6E5	23-06-2017 13:10	29-06-2017 9:22	NCh 1620/1.Of84
Aceite y Grasas *	mg/L	14.2	28-06-2017 10:00	05-07-2017 18:21	NCh2313/6.Of2015
Conductividad *	µS/cm	1267	23-06-2017 14:00	05-07-2017 18:22	S.M. 2110B
DBO5	mg/L	152.65	23-06-2017 18:45	05-07-2017 18:22	NCh2313/5.Of2005
DQO	mg/L	174.4	23-06-2017 18:30	05-07-2017 18:22	NCh 2313/24.Of1997
Fósforo Total	mg/L	3.94	05-07-2017 12:00	05-07-2017 18:22	NCh2313/15.Of2009
Nitrógeno Kjeldahl	mg/L	55.24	30-06-2017 11:00	05-07-2017 18:22	NCh 2313/28.Of2009
pH *	Un. de pH	7.24	23-06-2017 19:00	05-07-2017 18:22	NCh 2313/1.Of1995
Sólidos Sedimentables *	mL/L 1h	< 2	23-06-2017 15:00	05-07-2017 18:22	NCh2313/4.Of1995
Sólidos Susp. Totales	mg/L	12	23-06-2017 17:00	05-07-2017 18:22	NCh2313/3.Of1997

* = Análisis Acreditado
+ = Análisis Subcontratado

Jefe de Área Aguas

Este informe representa el resultado de las muestras recibidas y no puede ser reproducido parcial o totalmente sin la autorización previa de VIAMED TECHNICAL LABORATORY SpA.
Laboratorio acreditado INN según NCh-ISO 17025.Of 2005, LE-401, LE-841, LE-1110, LE-1111; LE-1144; LE-1301; LE-1302; LE-1303; LE1304./ Laboratorio autorizado SAG, según Res. 0632, Res. 1501, Res. 2870, Res. 2887. / Autorización Sernapesca, según convenio INN-Sernapesca/ Reconocimiento ISP de acuerdo al D.S. 707/99.

10.3 Anexo C

Cuadros comparativos de normativa nacional e internacional de calidad de aguas para uso de riego. (U. de Chile, 2005)

Cuadro Comparativo y Proposición de Criterios
Parámetros Globales de Calidad de Aguas de Riego

Constituyentes	Guia Australiana y Neozelandesa		SOUTH AFRICAN WATER QUALITY GUIDELINES	BRITISH COLUMBIA WATER QUALITY GUIDELINES	CANADIAN ENVIRONMENTAL WATER QUALITY	US ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY		FAO	NCh 1333 of 78	Guia CONAMA N.C.A. Aguas Continentales	Proposición U. de Chile 2006	Comentarios	OBS.
	Largo Plazo (100 años)	Corto Plazo (20 Años)				Largo Plazo (100 años)	Corto Plazo (20 Años)			Clase 3			
pH	-	-	6,5 - 8,4	4,5 - 9,0	-	6		6,5 -- 8	-	6,5 -- 8,5	6 -- 8,5	Recomendado para producción intensiva de horticultura	
											4,5 -- 9	Todo tipo de Cultivos	
Turbiedad [NTU]	-	-	-	50	-	-	-	-	-	-	DTU = 10	Cuando la turbiedad base es < 50 NTU.	
											DTU = 20% TU_0	Cuando la turbiedad base es > 50 NTU	
Sólidos Disueltos Totales [mg/l SDT]	-	-	-	3500	-	500 – 2000		450 -- 2000	-	1500	450	Sin restricción de uso.	6
											450 -- 2000	Restricción débil a moderada.	
											>2000	Restricción moderada a severa.	
Sólidos Suspendidos Totales [mg/l SST]	-	-	50	20	-	-	-	50 -- 100	-	80	<50	Para todo tipo de cultivos y sin problemas de obstrucción de equipos de riego.	7
											50 -- 100	Problemas a moderados en obstrucción de equipos de riego.	
											>100	Problemas graves de obstrucción de equipos de riego.	

Cuadro Comparativo y Proposición de Criterios Inorgánicos no Metálicos en Aguas de Riego

Constituyentes	Guia Australiana y Neozelandesa		SOUTH AFRICAN WATER QUALITY GUIDELINES	BRITISH COLUMBIA WATER QUALITY GUIDELINES	CANADIAN ENVIRONMENTAL WATER QUALITY	US ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY		FAO	NCh 1333 of 78	Guia CONAMA N.C.A. Aguas Continentales	Proposiolón U. de Chile 2006	Comentarios	OBS.
	Largo Plazo (100 años)	Corto Plazo (20 Años)				Largo Plazo (100 años)	Corto Plazo (20 Años)			Clase 3			
Boro [mg/l B]	0.5	*	0,5	0,5	0,5 -- 6,0	0.75	2	0,7 -- 3	0.75	0.75	0.5	Utilizar para cualquier cultivo	3
											0,5 – 1,0	Cultivos muy sensibles	
											1,0 --2,0	Cultivos sensibles	
											2,0 – 4,0	Moderadamente Sensibles	
											4,0 – 6,0	Moderadamente Tolerantes	
											6,0 – 15,0	Muy Tolerantes	
Cloruros [mg/l Cl]	-	-	100	100	100 -- 700	-	-	-	200	200	100	Límite recomendado para cultivos sensibles.	4
											350	Recomendado para cultivos tolerantes.	
											700	Recomendado para cultivos muy tolerantes y riego por cortos periodos de tiempo.	
Sulfatos [mg/l SO_4^{-2}]	-	-	-	--	-	-	-	-	250	1000	500	Se recomienda un valor de 500 mg/l para asegurar la posibilidad de riego irrestricto.	5
											1000 – 1500	Requiere Prácticas de manejo Cuidadosas	
											2000 – 2500	Cultivos tolerantes en suelos permeables con métodos de manejo cuidadosos.	

Cuadro Comparativo y Proposición de Criterios

Orgánicos en Aguas de Riego

Constituyentes	Guia Australiana y Neozelandesa		SOUTH AFRICAN WATER QUALITY GUIDELINES	BRITISH COLUMBIA WATER QUALITY GUIDELINES	CANADIAN ENVIRONMENTAL WATER QUALITY	US ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY		FAO	NCh 1333 of 78	Guia CONAMA N.C.A. Aguas Continentales	Propocisión U. de Chile 2005	Comentarios	OBS
	Largo Plazo (100 años)	Corto Plazo (20 Años)				Largo Plazo (100 años)	Corto Plazo (20 Años)			Clase 3			
Aceites y Grasas [mg/l A y G]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	5 -- 10	Florida (USA) y Taiwán proponen un valor de 5 mg/l para riego. Este valor puede ser mayor si se utilizan prácticas de manejo de suelos especiales, con un máximo de 10 mg/l.	
DBO_5 [mgO_2/l DBO_5]	600*		-	-	-	30 -- 1120		-	-	20	20	Se recomienda para cultivos de consumo crudo.	
											200	Se recomienda para riego con restricción (Turquia y Argentina proponen un valor de 200 mg/l. China propone entre 80 y 150 mg/l)	
											600	Riego con generación de olores.	
Detergentes [mg/l]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.5	0.5	Sólo Florida(USA) propone un valor de 0,5 mg/l	
Indice de Fenol [mg/l Fenoles]	-	-	-	-	0.002	-	-	-	-	0.01	0.01	Brasil propone 0,001 mg/l Florida(USA) 4,6 mg/l Irán 1 mg/l Canadá 3,9 mg/l	

* Criterio establecido por el "Act Enviromet amd Health Wastewater Reuse Guidelines" de Australia

Cuadro Comparativo y Proposición de Criterios

Nutrientes en Aguas de Riego

Constituyentes	Guia Australiana y Neozelandesa		SOUTH AFRICAN WATER QUALITY GUIDELINES	BRITISH COLUMBIA WATER QUALITY GUIDELINES	CANADIAN ENVIRONMENTAL WATER QUALITY	US ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY		FAO	NCh 1333 of 78	Guia CONAMA N.C.A. Aguas Continentales	Proposición U. de Chile 2006	Comentarios	OBS.
	Largo Plazo (100 años)	Corto Plazo (20 Años)				Largo Plazo (100 años)	Corto Plazo (20 Años)			Clase 3			
Fósforo Total [mg/l P]	0.05	0,8 – 12	-	-	-	-	-	-	-	***	0.05	Se recomienda para riego sin ninguna restricción. El límite está dado para evitar producción de algas en los equipos de riego.	
											12	Para riego por cortos periodos de tiempo.	
Nitrógeno Total [mg/l N]	5	25 – 125	5*	100/10**	-	-	-	5 – 30	-	***	25	Se recomienda para todo tipo de cultivos.	
											125	Con restricciones al tipo de suelos y periodos de irrigación. Para periodos breves, el límite podría ser mayor.	

* Como Nitrógeno Kjeldhal

**Se refiere a concentraciones de Nitrato y Nitrito respectivamente, medidos como N

*** Guía CONAMA incluye solo nitrito para aguas continentales superficiales y N y P, en forma específica, para cuerpos lacustres.