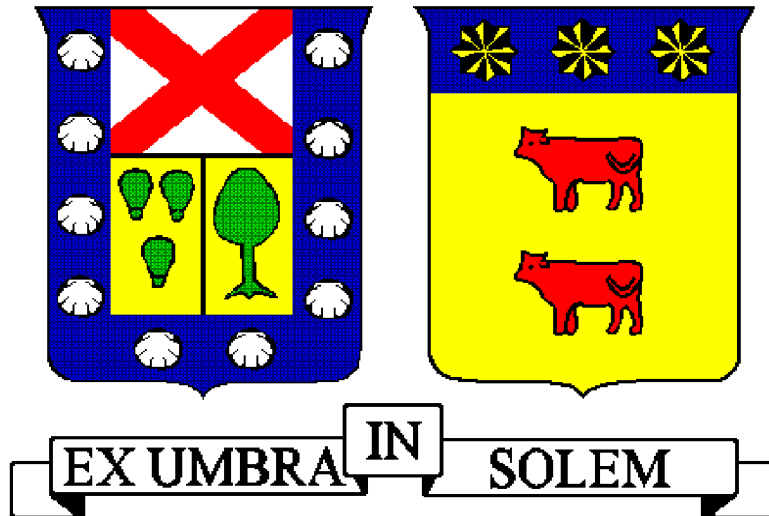


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARIA  
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES  
VALPARAÍSO – CHILE



DISEÑO Y ANÁLISIS COMPARATIVO DE SISTEMAS DE REUTILIZACIÓN DE AGUAS  
GRISES APLICADO A UNA VIVIENDA UNIFAMILIAR EN LA REGIÓN DE  
VALPARAÍSO.

NICOLÁS ALFONSO MUÑOZ SANHUEZA

Memoria para optar al Título de  
Constructor Civil

Profesor Guía  
Daniel Radrigan Valencia

Profesor Correferente  
Álvaro Ossandón

Febrero de 2023

## **Agradecimientos**

Agradezco a mi familia por su constante apoyo y comprensión. Su apoyo ha sido fundamental para terminar este proceso.

A los profesores Daniel Radrigán y Álvaro Ossandón por guiarme y por su ayuda con las diversas dudas que surgieron durante el desarrollo del trabajo.

Al profesor Ismael Vera, agradezco su buena voluntad por ayudarme con sus conocimientos en el diseño de humedales construidos.

A mis primos, compañeros y amigos que de una u otra manera me apoyaron en distintos temas y me han motivado para poder terminar este trabajo de la mejor forma.

Finalmente agradezco a la Sofi por ser un apoyo constante, especialmente en los momentos difíciles. Su forma de enfrentar la vida me ha motivado para avanzar de manera constante y ordenada y así poder lograr el objetivo.

## **Resumen**

Con la publicación de la ley 21.075 es posible reutilizar aguas grises en Chile, aunque aún se está a la espera del reglamento que permita la real implementación de la ley. El uso de sistemas de tratamiento de aguas grises podría reducir en un 30% el consumo de agua potable en los hogares lo cual es un beneficio para la sustentabilidad, además de traer beneficios económicos para las familias.

El objetivo de este estudio es determinar la factibilidad técnica, legal y económica de dos sistemas de tratamiento de aguas grises aplicados en viviendas unifamiliares de la región de Valparaíso para el reuso del recurso hídrico tanto en el estanque de artefactos sanitarios como en riego y compararlos. En primer lugar, se presenta el contexto mundial respecto a las sequías, las cuales para el año 2050 se estima que afecten a más del 75% de la población mundial, luego se presenta la situación de Chile, que pasa por una de sus sequías más largas de la historia afectando la zona norte y centro del país.

Posteriormente, se presenta el escenario actual en el tratamiento de aguas grises en el mundo, sus contaminantes, los mecanismos de remoción de contaminantes, las características de los tratamientos, sus eficiencias de remoción, las características de los efluentes y los factores que inciden en estos, las leyes y normas que regulan el agua en Chile, la calidad mínima que cumpla con los estándares para el uso de destino y el volumen de agua gris a tratar.

Los sistemas considerados para la comparación son un humedal construido de flujo subsuperficial horizontal y uno de flujo vertical, ya que estos presentan costos de construcción y operación/mantenimiento relativamente bajos en comparación al resto de sistemas de tratamiento además, de otras características que hacen más competitivos estos sistemas frente a otros para el uso objetivo.

Al terminar el estudio se concluyó que las opciones de Humedal Construido de Flujo Subsuperficial Vertical (HFSSV) y un sistema compuesto por un Humedal Construido de Flujo Subsuperficial Horizontal (HFSSH) seguido por un HFSSV, emplazado en El Tabo, Isla Negra, El Quisco, Algarrobo o Punta Tralca (Grupo 6 de los grupos tarifarios de la empresa de agua ESVAL) son factibles económicamente. Sin embargo, si se considera un caudal de diseño mayor, estos sistemas se vuelven factibles económicamente en el resto de las localidades de la región.

## **Abstract**

With the publication of law 21.075 it is possible to reuse graywater in Chile, although the regulation that allows the real implementation of the law is still awaited. The use of graywater treatment systems could reduce water consumption in households by 30%, which is a benefit for sustainability and economic benefits for families. The objective of this study is to determine the technical, legal and economic feasibility of two graywater treatment systems applied in single-family homes in the Valparaíso region for the reuse of water resources both in the sanitary tank and in irrigation, and to compare them. First, the world context is presented with respect to droughts, which by the year 2050 are estimated to affect more than 75% of the world population, then the situation in Chile is presented, which is going through one of its longest droughts in history, affecting the northern and central areas of the country. Subsequently, the current scenario of graywater treatment in the world, its pollutants, the mechanisms of pollutant removal, the treatments, their removal efficiencies, the characteristics of the effluents and the factors that affect them, the laws and norms that regulate water in Chile, the minimum quality that meets the standards for the destination use and the volume of graywater to be treated are presented. The systems considered are a horizontal subsurface flow constructed wetland and a vertical flow constructed wetland, since they have relatively low construction and operation/maintenance costs compared to other treatment systems, in addition to other characteristics that make these systems more competitive with others for the target use. At the end of the study it was concluded that the options of Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland (VSWF) and a system composed of a Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetland (HFSSH) followed by a HFSSV, located in El Tabo, Isla Negra, El Quisco, Algarrobo or Punta Tralca (Group 6 of the tariff groups of the water company ESVAL) are economically feasible. However, if a higher design flow is considered, these systems become economically feasible in the rest of the localities of the region.

## **Glosario**

A&G: abreviatura de "Aceites y Grasas"

Adsorción: proceso mediante el cual partículas o sustancias se adhieren a la superficie de un material, como el carbón activado, para su eliminación del agua.

Afluyente: agua que fluye hacia una planta de tratamiento desde fuentes naturales o sistemas de alcantarillado.

Agua potable: agua tratada y purificada para ser segura para el consumo humano.

Aguas grises (AG): aguas residuales generadas en hogares o edificios que provienen de usos no sanitarios, como lavamanos y duchas.

Aguas negras: aguas residuales que contienen desechos humanos y materia orgánica.

Aguas residuales: agua utilizada en actividades humanas que contiene contaminantes y debe ser tratada antes de ser liberada al medio ambiente. Las aguas residuales incluyen aguas grises y aguas negras

Amonio: compuesto nitrogenado presente en aguas residuales que puede ser tóxico y requerir eliminación.

Anóxico: sin oxígeno.

Bacterias: microorganismos presentes en el tratamiento biológico de aguas residuales que ayudan a descomponer la materia orgánica.

Bacterias fermentativas facultativas: bacterias que pueden crecer tanto en ambientes anaeróbicos como aeróbicos y descomponen materia orgánica.

Bacterias heterótrofas aeróbicas: bacterias que necesitan oxígeno para descomponer la materia orgánica.

Bacterias metanogénicas: bacterias anaeróbicas que producen metano durante la descomposición de materia orgánica.

Bacterias patógenas: bacterias que pueden causar enfermedades en humanos y animales.

Bacterias sulfato-reductoras: bacterias que reducen sulfatos

Biodegradables: sustancias que pueden ser descompuestas por microorganismos en el tratamiento biológico.

Biofiltro: sistema de tratamiento biológico que utiliza microorganismos adheridos a un medio filtrante para eliminar contaminantes.

Biomasa microbiana: conjunto de microorganismos presentes en sistemas de tratamiento.

Biomasa radicular: raíces de plantas acuáticas que ayudan en la eliminación de contaminantes.

Biopelículas: capas de microorganismos adheridos en superficies o medios sumergidos.

Biorreactor de membrana (BRM): sistema de tratamiento que combina procesos biológicos con filtración a través de membranas.

Ca [mg/L]: concentración de calcio en el agua.

Campylobacter: género de bacterias patógenas que pueden estar presentes en aguas contaminadas.

Caracterización de aguas grises: análisis de las propiedades y contaminantes presentes en aguas grises.

Carbón activado: material utilizado en la adsorción de contaminantes en el agua.

Cl [mg/L]: concentración de cloro en el agua.

Clasificación Köppen-Geiger: sistema para categorizar climas basado en datos climáticos.

Coagulación: proceso que neutraliza los sólidos suspendidos cargados en el agua.

Coliformes: grupo de bacterias utilizadas como indicadores de contaminación fecal.

Coliformes Fecales (CF): subgrupo de coliformes que indican contaminación fecal. Se mide en [CFU].

Colmatación: acumulación de materiales en un filtro o medio poroso que reduce su eficiencia.

Conductividad hidráulica (Ks): capacidad de un medio para transmitir agua a través de él.

Contactador Biológico Rotatorio (CBR): sistema de tratamiento biológico que utiliza discos rotatorios para la adhesión de microorganismos.

DBO5 (Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días): medida de la cantidad de oxígeno requerida por microorganismos para descomponer la materia orgánica.

Desnitrificación: proceso biológico que convierte los nitratos en nitrógeno gaseoso.

Digestión aerobia: descomposición de materia orgánica en presencia de oxígeno.

DGA: Dirección General de Aguas. Entidad gubernamental encargada de la gestión del agua en Chile.

DQO (Demanda Química de Oxígeno): medida de la cantidad total de compuestos orgánicos oxidables en el agua.

Dureza del agua: concentración de minerales como calcio y magnesio en el agua.

EC [ $\mu\text{S}/\text{m}$ ]: conductividad eléctrica del agua, una medida de su capacidad para conducir la corriente eléctrica. Da una idea del contenido de sales en el agua.

Ecosistema: sistema formado por organismos vivos y su entorno físico.

Efluente: agua tratada que es liberada al medio ambiente.

Escherichia coli (E. coli): bacteria indicadora de contaminación fecal que puede causar enfermedades. Se mide en [CFU].

ESVAL S.A.: empresa de Servicios Sanitarios de Valparaíso.

Floculación: formación de flóculos o partículas agregadas en el agua para facilitar su sedimentación.

Flujo horizontal subsuperficial (FHSS): movimiento del agua a través de un medio poroso en dirección horizontal bajo la superficie.

Flujo superficial (FS): desplazamiento del agua sobre la superficie del suelo o un medio poroso en dirección horizontal.

Flujo vertical subsuperficial (FVSS): movimiento del agua a través de un medio poroso en dirección vertical bajo la superficie.

Fosfatos: compuestos de fósforo presentes en el agua, a menudo responsables de la eutrofización.

Fosforo total [mg/L]: concentración total de fósforo en el agua.

Fragmentación abiótica: rotura de partículas de sedimento debido a procesos no biológicos.

Hábitat: entorno donde vive un organismo.

Helófitos: plantas acuáticas que crecen en ambientes húmedos.

Hidrólisis: descomposición química de sustancias mediante reacción con agua.

Humedal construido (HC): sistema de tratamiento natural que utiliza plantas y microorganismos para purificar el agua.

Intercambio iónico: proceso que involucra el intercambio de iones entre un medio acuoso y un material sólido.

IPC: índice de precios al consumidor. Indicador económico que mide mes a mes la variación conjunta de los precios de una canasta de bienes y servicios representativa de los hogares del país

Lagunas aireadas: sistemas de tratamiento con lagunas donde el agua se airea para promover la actividad bacteriana.

Lagunas de estabilización: sistemas de tratamiento de aguas residuales que utilizan procesos naturales en lagunas.

Lodos: sedimentos y materia orgánica acumulados en el tratamiento de aguas.

Lodos activados: proceso biológico para tratamiento de aguas que utiliza microorganismos suspendidos en el agua para eliminar contaminantes.

Macrófitas: plantas acuáticas.

Metabolismo microbiano: procesos químicos y biológicos en microorganismos.

Mg [mg/L]: concentración de magnesio en el agua.

Microorganismos: organismos pequeños, como bacterias y protozoarios.

Moringa Oleifera: planta utilizada en el tratamiento del agua debido a sus propiedades coagulantes.

Na [mg/L]: concentración de sodio en el agua.

Nitrificación: proceso biológico que convierte el amonio en nitrato.

NTK: nitrógeno total kjeldahl. Medida del nitrógeno presente en una muestra de agua.

Nutrientes: compuestos esenciales para el crecimiento de los organismos, como nitrógeno y fósforo.

Oxidación de la materia orgánica: proceso que implica la conversión de compuestos orgánicos en productos más simples mediante la adición de oxígeno.

Oxidación foto catalítica: proceso de oxidación que utiliza la luz y un catalizador.

Oxidación química: proceso de oxidación para el tratamiento de aguas que implica la reacción de sustancias químicas con oxígeno.

Oxigenación: introducción de oxígeno en el agua para mejorar procesos biológicos aeróbicos.

Patógenos: microorganismos que pueden causar enfermedades.

Permeabilidad: capacidad de un material para permitir el flujo de agua.

Perenne: que dura o permanece durante todo el año o a lo largo de un período prolongado.

Porosidad: proporción de espacios vacíos en un material.

Precipitación química: proceso donde sustancias en el agua forman sólidos insolubles.

Protozoarios: microorganismos unicelulares, a menudo utilizados como indicadores de contaminación.

Radionucleidos: elementos radiactivos presentes en el agua.

Reactor Biológico Secuencial (RBS): sistema de tratamiento biológico en serie.

Reactor de Flujo Ascendente con Manto de Lodos (RAFA): sistema de tratamiento biológico con lechos de lodos.

Rizoma: tallo subterráneo de las plantas con varias yemas que crecen de forma horizontal emitiendo raíces y brotes herbáceos de sus nudos.

Sales disueltas: compuestos iónicos en el agua.

Salinidad: concentración total de sales disueltas en el agua.

Salmonella: bacteria patógena que puede causar enfermedades transmitidas por alimentos y agua.

Saturación e insaturación: condiciones en las cuales el agua retiene o no retiene más contaminantes.

SDT [mg/L]: sólidos disueltos totales presentes en el agua.

Sedimentación: proceso donde las partículas en suspensión se asientan en el fondo.

Sequía: periodo de escasez de agua.

Sistemas de tratamiento de aguas: procesos y tecnologías utilizadas para purificar el agua.

SST (Sólidos Suspendidos Totales) [mg/L]: concentración de partículas sólidas suspendidas en el agua.

SISS: Superintendencia de Servicios Sanitarios. Entidad gubernamental encargada de la regulación de servicios sanitarios en algunos países.

Surfactantes: compuestos que reducen la tensión superficial del agua.

Tensioactivos: sustancias que reducen la tensión superficial del agua y pueden actuar como surfactantes.

TRH: tiempo de retención hidráulico. Tiempo que el agua permanece en un sistema de tratamiento.

Tratamiento aeróbico: proceso de tratamiento que requiere oxígeno.

Tratamiento anaeróbico: proceso de tratamiento que ocurre en ausencia de oxígeno.

Turbiedad [NTU]: medida de la cantidad de partículas suspendidas que afectan la claridad del agua.

Virus: microorganismos patógenos más pequeños que las bacterias.

Virus entéricos: virus transmitidos principalmente por el agua contaminada y que afectan el sistema gastrointestinal.

XOCs (Compuestos Orgánicos Xenobióticos): compuestos orgánicos sintéticos que pueden ser difíciles de degradar en el ambiente.

## Índice de contenidos

	Pág.
<b>1. Introducción.....</b>	<b>17</b>
<b>2. Objetivos.....</b>	<b>19</b>
2.1 Objetivos generales.....	19
2.2 Objetivos específicos.....	19
<b>3. Marco teórico.....</b>	<b>20</b>
3.1 Situación del agua en el mundo.....	20
3.2 Situación en Chile.....	21
3.3 Generalidades sobre aguas grises.....	25
3.3.1 Componentes Físicos.....	25
3.3.2 Componentes Químicos.....	26
3.3.3 Características Biológicas.....	28
3.3.4 Resumen de caracterizaciones de aguas grises.....	29
3.3.5 Caracterización del afluente.....	32
3.3.6 Temperatura.....	33
3.3.7 Consideraciones Ambientales y de Salud Pública.....	33
3.4 Tecnologías para tratamiento de aguas grises.....	34
3.4.1 Pretratamiento.....	35
3.4.2 Tratamiento primario.....	36
3.4.3 Tratamiento secundario.....	36
3.4.4 Tratamiento terciario.....	37
3.4.5 Desinfección.....	38
3.4.6 Resumen Tecnologías para Tratamiento.....	38
3.5 Percepciones del reúso de aguas grises.....	39
3.6 Elección de Sistemas de Tratamiento.....	40
3.7 Humedales construidos (HC).....	41
3.8 Marco legal y normativo.....	42
3.8.1 Leyes.....	43
3.8.2 Normas.....	45
3.9 Análisis económico.....	45
<b>4. Humedales Construidos.....</b>	<b>48</b>
4.1 Tipos de humedales construidos:.....	48
4.1.2 Humedal construido de flujo subsuperficial horizontal (HCFSSH).....	50
4.1.3 Humedal construido de flujo subsuperficial vertical (HCFSSV).....	51
4.2 Mecanismos de remoción de contaminantes.....	51
4.2.1 Eliminación de sólidos suspendidos.....	52

4.2.2 Eliminación de materia orgánica.....	52
4.2.3 Eliminación de patógenos.....	53
4.2.4 Resumen de mecanismos de remoción de contaminantes.....	53
4.3 Componentes de los humedales construidos:.....	56
4.3.1 Sustrato o medio granular.....	56
4.3.2 Vegetación.....	57
4.3.3 Microorganismos.....	62
4.4 Generalidades de diseño de Humedales construidos.....	63
4.5 Consideraciones sobre aspectos constructivos, operación y mantenimiento.....	64
4.5.1 Construcción de Humedal Construido.....	65
4.5.2 Operación y mantenimiento.....	70
4.6 Ecuaciones de diseño de humedal de flujo subsuperficial.....	73
4.6.1 Diseño de Humedales de Flujo Subsuperficial Horizontal (HFSSH).....	73
4.6.2 Diseño de Humedales de Flujo Subsuperficial Vertical (HFSSV).....	76
4.7 Verificaciones.....	78
4.7.1 HSSFH.....	78
4.7.2 HSSFV.....	79
<b>5. Estimación de condiciones iniciales.....</b>	<b>80</b>
5.1 Estimación de la caracterización de las aguas grises en Chile.....	80
5.2 Estimación del caudal a considerar.....	84
5.2 Resumen de las condiciones iniciales.....	85
<b>6. Diseño de Humedales Construidos.....</b>	<b>86</b>
6.1 Caso 1: HSSFH.....	86
6.2 Caso 2: HSSFV.....	88
6.3 Caso 3: HSSFH + HSSFV.....	89
<b>7. Costos de construcción y mantención de los Humedales Construidos.....</b>	<b>92</b>
<b>8. Resultados Económicos.....</b>	<b>96</b>
<b>9. Conclusiones.....</b>	<b>105</b>
<b>10. Bibliografía.....</b>	<b>108</b>
<b>Anexo A: Esquemas de Sistemas de Tratamiento de Aguas Grises.....</b>	<b>119</b>
<b>Anexo B: Presupuestos detallados de Humedales Construidos.....</b>	<b>128</b>

## Índice de Tablas

	Pág.
Recopilación de caudales diarios de AG según origen en países similares a Chile.....	26
Resumen Caracterización de Aguas Grises en la literatura.....	30
Caracterización de aguas grises en Chile y países similares.....	31
Características de aguas grises según origen.....	32
Contaminantes y sus efectos potenciales.....	35
Características de los principales niveles de tratamiento.....	39
Eficiencias de remoción de contaminantes de sistemas de tratamiento de aguas grises.....	40
Comparación entre sistemas de tratamiento de aguas servidas.....	42
Límites máximos permisibles para uso urbano del proyecto de reglamento sobre condiciones sanitarias básicas para la reutilización de aguas grises.....	46
Procesos principales en la reducción de contaminantes en HCFS, HCFSSH y HCFSSV.....	56
Especies de macrófitas emergentes más utilizadas en humedales construidos.....	59
Profundidad de penetración de raíces en macrófitas.....	63
Parámetros típicos de diseño para HC para tratamiento de aguas residuales domésticas.....	65
Parámetros de diseño de humedales construidos de flujo subsuperficial.....	75
Valores de C* para Humedales.....	76
Estimación de concentraciones de contaminantes según proporciones en Grecia e India.....	81
Estimaciones de concentración de mezcla en Chile en 3 formas distintas.....	83
Parámetros físicos, químicos y microbiológicos iniciales del afluente a tratar.....	84
Estimación de caudales por artefacto en vivienda de 5 personas en la región de Valparaíso.....	85
Resumen de condiciones iniciales del afluente.....	86
Concentraciones de contaminantes en el efluente del pretratamiento.....	87
Presupuesto Caso 1: HSSFH.....	94
Presupuesto Caso 2: HSSFV.....	95
Presupuesto Caso 2: HSSFH + HSSFV.....	96
VAN de los diferentes tipos de HC diseñados sin considerar financiamiento.....	97
VAN de los diferentes tipos de HC diseñados considerando financiamiento.....	98
Resumen del modelo económico del HSSFH + HSSFV con financiamiento.....	99
Resumen del modelo económico del HSSFH + HSSFV sin financiamiento.....	100
Resumen del modelo económico del HSSFV sin financiamiento.....	101
Resumen del modelo económico del HSSFV con financiamiento.....	102
VAN de los diferentes tipos de HC diseñados, considerando un caudal de aguas grises un 30% mayor, sin financiamiento.....	105
VAN de los diferentes tipos de HC diseñados, considerando un caudal de aguas grises un 30% mayor, con financiamiento.....	105

## Índice de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas en Chile 2022.....	22
Figura 2. Planta de Tratamiento de Aguas Servidas en la región de Valparaíso 2022.....	22
Figura 3. Composición de Aguas Servidas según origen.....	24
Figura 4. Composición de Aguas Grises según Origen.....	24
Figura 5. Tipos de humedales según plantas predominantes.....	49
Figura 6. Tipos de humedales según tipo de flujo.....	49
Figura 7. Esquema de distintos tipos de Humedales construidos.....	50
Figura 8. Interrelaciones de una macrófita en un humedal construido.....	54
Figura 9. Espadaña (Thypa).....	59
Figura 10. Juncos (Scirpus spp.).....	60
Figura 11. Carrizo (Phragmites).....	61
Figura 12. VAN Acumulado del modelo económico del HSSFH + HSSFV con financiamiento..	98
Figura 13. VAN Acumulado del modelo económico del HSSFH + HSSFV sin financiamiento...	99
Figura 14. VAN Acumulado del modelo económico del HSSFV sin financiamiento.....	100
Figura 15. VAN Acumulado del modelo económico del HSSFV con financiamiento.....	101
Figura 16. Resultados económicos por zona para cada tipo de proyecto considerando financiamiento.....	102
Figura 17. Resultados económicos por zona para cada tipo de proyecto sin considerar financiamiento.....	103

## **1. Introducción**

Las sequías se encuentran entre las mayores amenazas para el desarrollo sostenible, especialmente en los países en desarrollo. Las previsiones estiman que para 2050 las sequías afectarán a más del 75% de la población mundial (Naciones Unidas, 2022).

Chile central ha experimentado una secuencia ininterrumpida de años secos desde 2010 con déficits de lluvia promedio de 20-40%. La llamada Mega Sequía es el evento de sequía más largo registrado con pocos análogos en los últimos milenios (Garreaud et al., 2019).

A la fecha esta sequía continúa y actualmente la zona centro norte y centro sur del país se encuentra con déficits de precipitaciones de entre un 60% y un 80% comparado con el promedio histórico; una acumulación de nieve que registra déficits superiores al 85%; con los principales embalses con solo un 34% de su capacidad, y con una proyección para el caudal de ríos cercana a los mínimos históricos (Fundación COPEC-UC, 2021).

Para enfrentar esta problemática, el gobierno de Chile crea la estrategia hídrica, la cual nace de la Mesa Nacional del Agua convocada el 9 de octubre de 2019 y se basa en 3 pilares: resguardar el abastecimiento de agua, priorizando siempre el consumo humano, asegurar la calidad del agua y proteger los ecosistemas y la modernización del marco legal e institucional.

El 2021 esto se plasmó en un Plan de Emergencia Contra la Sequía que busca aumentar la disponibilidad de agua y mejorar la eficiencia en su uso, con el objetivo de asegurar el abastecimiento para el consumo humano y la producción de alimentos (Gobierno de Chile, 2022).

El agua gris se presenta como una atractiva oportunidad para aumentar la disponibilidad hídrica. Esta es un tipo de agua residual que excluye las aguas negras, se puede tratar y reutilizar en riego y descarga de inodoros (Díaz et al., 2021).

La reciente Ley 21.075 (Ministerio de Obras Públicas, 2018) que regula la recolección, reutilización y disposición de aguas grises, define las aguas grises como aguas servidas

domésticas residuales provenientes de las tinas de baño, duchas, lavaderos, lavatorios y otros, excluyendo las aguas negras. Dentro de los destinos que se podrá dar a las aguas grises tratadas destaca para usos urbanos el riego de jardines y descarga de aparatos sanitarios.

Para lograr la eficiente utilización de este recurso, es fundamental analizar los métodos actuales empleados en el tratamiento de aguas residuales. Por lo que se hace imprescindible identificar entre estos, aquellos que tengan costos moderados, sean de operación y mantenimiento sencillos, y se adecuen a la realidad de la mayoría de las familias en la V región. En este sentido, se consideran especialmente viables para el proceso de tratamiento, los sistemas de humedales construidos. Este sistema destaca por sus costos de funcionamiento y construcción en el rango medio-bajo, además de ser fácilmente manejables y mantenibles (Pizarro, 2011).

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivos generales**

El objetivo general de este estudio, es realizar un análisis comparativo entre 3 opciones de tratamiento de aguas grises para la reutilización en recarga de inodoros y riego de jardines aplicados a viviendas unifamiliares de 5 personas en la región de Valparaíso a modo de fomentar una mejora en la eficiencia del uso del agua potable en el país.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Estimar la caracterización del afluente a tratar.
- Evaluar la calidad requerida del efluente en Chile para cumplir con los estándares del Proyecto de Reglamento sobre condiciones sanitarias básicas para la reutilización de aguas grises para uso urbano.
- Seleccionar componentes para proponer un sistema de tratamiento, que sea de bajo costo de mantención y operación, y tenga comprobada eficiencia de remoción de contaminantes.
- Realizar una evaluación técnico económica de los sistemas de tratamiento propuestos.
- Realizar un análisis comparativo entre las soluciones propuestas.

### **3. Marco teórico**

#### **3.1 Situación del agua en el mundo**

Del total de recursos hídricos de la Tierra, alrededor del 97% está en los océanos, mientras que el 3% restante corresponde a agua dulce; sin embargo, de este 3%, los lagos y ríos corresponden a un 0,26% del total de la hidrósfera, los cuales son la fuente principal para el consumo humano (Gleick, 1993).

Los efectos del cambio climático, acelerados por la actividad humana desde el siglo XIX, especialmente a través de la revolución industrial, tienen un impacto inicial en el ciclo del agua, con posibles consecuencias significativas y desiguales en todo el mundo (World Bank, 2016). El Banco Mundial (2016) afirma lo siguiente:

“Los riesgos climáticos relacionados con el agua golpean los sistemas alimentarios, energéticos, urbanos y ambientales. Las poblaciones crecientes y las ciudades en expansión harán que la demanda de agua aumente exponencialmente, mientras que el suministro se vuelve cada vez más escaso. Si los modelos climáticos resultan correctos, la escasez de agua proliferará en regiones donde actualmente no existe y empeorará en gran medida en regiones donde el agua ya es escasa. El cambio climático aumentará las perturbaciones relacionadas con el agua además de las ya exigentes tendencias en el uso del agua. La disponibilidad reducida de agua dulce y la competencia de otros usos, como la energía y la agricultura, podrían reducir la disponibilidad de agua en las ciudades hasta en dos tercios para 2050, en comparación con los niveles de 2015.” (World Bank, 2016)

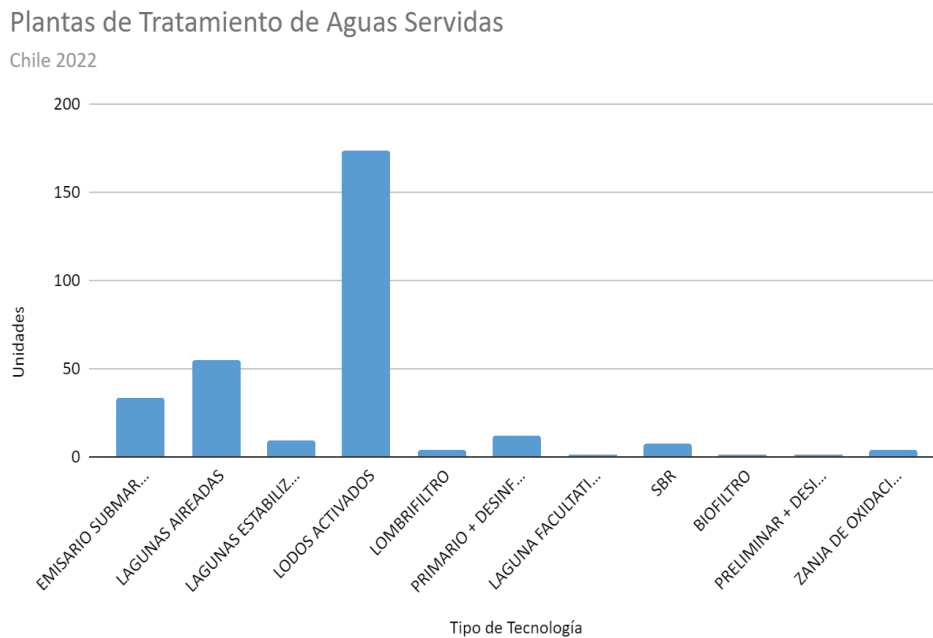
Las sequías se encuentran entre las mayores amenazas para el desarrollo sostenible, especialmente en los países en desarrollo. El número y la duración de las sequías han aumentado un 29% desde 2000 y hay más de 2300 millones de personas que sufren problemas de escasez de agua (Naciones Unidas, 2022).

### **3.2 Situación en Chile**

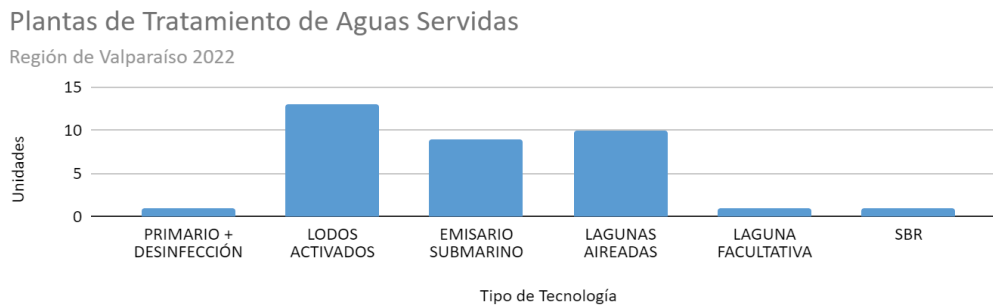
La zona centro norte de Chile está viviendo una sequía que ya lleva 13 años y se va extendiendo de norte a sur, lo que indica una disminución en las precipitaciones en gran parte del territorio nacional (Garreaud et al., 2019). Este fenómeno se manifestó primero en las regiones de Coquimbo, Valparaíso y Metropolitana pero en el último año se extendió incluso más al sur.

De acuerdo a la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS), organismo regulador del servicio de agua potable en Chile, el índice de cobertura de servicios sanitarios en sectores urbanos alcanzan 99,94% en agua potable y 97,4% en alcantarillado, mientras que para la población con alcantarillado el tratamiento de aguas servidas llega al 99,98% (SISS, 2022) . El Decreto con Fuerza de Ley 382 es quien regula la explotación de servicios públicos destinados a producir y distribuir agua potable y a recolectar y disponer aguas servidas, mediante concesiones que se otorgan solo para zonas urbanas o urbanizables. En la región de Valparaíso ESVAL S.A. es la principal empresa que se encarga de los servicios de agua potable.

De acuerdo a la SISS, en el 2022 hay un total de 301 Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas en el sector urbano en Chile, de las cuales la tecnología más utilizada es la de Lodos activados con un 57,8%, seguida de lagunas aireadas con un 18,3% y en tercer lugar los Emisarios submarinos con un 11% (ver Figura 1). Mientras que específicamente en la región de Valparaíso siguen siendo las mismas 3 tecnologías las más utilizadas, en primer lugar Lodos activados con un 37,1% con 13 plantas, luego Lagunas aireadas con un 28,6% con 10 plantas y en tercer lugar Emisarios submarinos con un 25,7% con 9 plantas mostrando un aumento significativo en el uso de esta tecnología en comparación al resto de Chile (ver Figura 2).



**Figura 1.** *Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas en Chile 2022, extraído de <https://www.siss.gob.cl/586/w3-propertyvalue-6408.html>, SISS, 2022.*



**Figura 2.** *Planta de Tratamiento de Aguas Servidas en la región de Valparaíso 2022, extraído de <https://www.siss.gob.cl/586/w3-propertyvalue-6408.html>, SISS, 2022.*

Según la clasificación Köppen-Geiger, la zona central del país, en su mayoría cuenta con clima templado con lluvias de invierno. Países con clima templado, se encuentran en el mediterráneo, al norte de Portugal, España, Grecia y Turquía, y al noroeste de Estados Unidos

(California a Washington) (Díaz et al., 2021, p. 5). Además Valparaíso está dentro de las zonas declaradas como zona de escasez hídrica vigentes (Dirección General de Aguas, 2022).

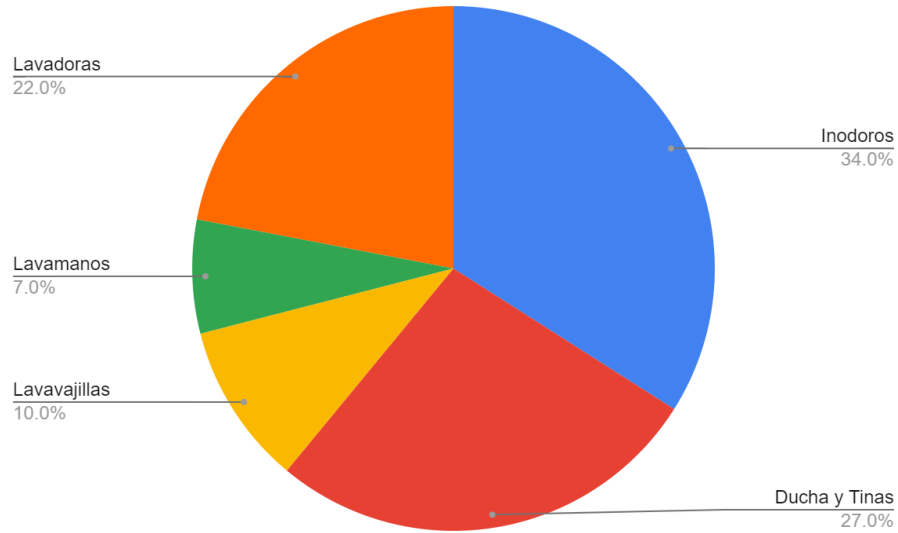
Las aguas grises se definen según la ley 21.075 como aguas servidas domésticas residuales que excluyen las aguas negras, las cuales se definen a su vez como aguas residuales que contienen excretas.

El volumen diario generado de agua gris oscila entre 90 a 120 litros por persona, que representa entre un 50 a 70% del agua eliminada de un hogar y 70 a 90% del volumen de agua potable utilizada (Díaz et al., 2021).

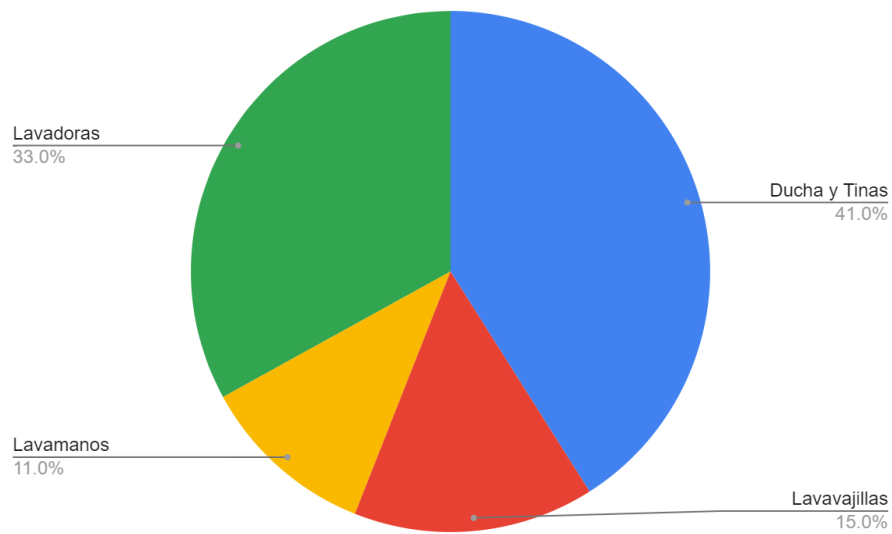
En la región de Valparaíso, la dotación de agua potable es de 158,5 litros por habitante al día según el informe de gestión del sector sanitario (SISS, 2022).

En el diseño, se contempla que el 80% del volumen de agua potable empleado se convertirá en aguas residuales, mientras que el 20% restante se retendrá para diversos usos internos en el hogar.

Para calcular los caudales de aguas residuales por artefacto se consideran los porcentajes indicados en las Figuras 3 y 4.



**Figura 3.** *Composición de Aguas Servidas según origen, elaborado en base a datos de Franco, 2007 de Chile.*



**Figura 4.** *Composición de Aguas Grises según Origen, elaborado en base a datos de Franco, 2007 de Chile.*

En la tabla 1, se puede observar un comparativo del caudal diario de Aguas Grises (AG) en países similares a Chile y la región de Valparaíso.

**Tabla 1**

*Recopilación de caudales diarios de AG según origen en países similares a Chile y estimación en Valparaíso según artefacto y caudal estimado para una persona en la región de Valparaíso, adaptado de Díaz et al., 2021.*

Fuente	Noutsopoulos et al, 2017		Fundación Ecología y Desarrollo Barcelona, 2005, citado por Díaz et al., 2021		Proporciones según Franco, 2007. Consumo total según ESVAL S.A.	
País	Grecia		España		Chile, región de Valparaíso	
Artefacto	[l/hab/día]	%	[l/hab/día]	%	[l/hab/día]	%
Lavaplatos	29,7	30%	47	29%	12,68	15%
Lavavajillas	0,6	1%				
Lavamanos	11,3	11%			8,88	11%
Ducha	37,5	38%	66	41%	34,24	41%
Lavadero			47	29%		
Lavadora	19,2	20%			27,9	33%
Total A.G. [l/hab/día]	98,3	100%	160	100%	83,69	100%

### 3.3 Generalidades sobre aguas grises

Se puede caracterizar las aguas grises física, química y microbiológicamente. Según Oteng-Peprah et al. (2018):

#### 3.3.1 Componentes Físicos

Estos componentes están asociados con la apariencia física del agua gris e incluye temperatura, turbiedad, conductividad eléctrica y sólidos suspendidos, entre otros. En Chile la temperatura tiene un rango promedio entre 10°C a 18°C (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, 2022). La concentración de sólidos suspendidos totales en aguas grises puede oscilar entre 190 y 537 mg/L como se ha informado (Edwin et al., 2013; Oteng-Peprah et al., 2018). Las aguas grises con gran parte del agua proveniente de la cocina y la lavandería tienen valores

relativamente altos de sólidos suspendidos totales (SST), y esto puede deberse al lavado de ropa, zapatos, verduras, frutas, tubérculos y muchos otros que pueden contener arena, arcilla y otros materiales que podrían aumentar los SST. Los rangos registrados para la conductividad eléctrica en aguas grises están entre 14 y 3000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Ciabatti et al., 2009; Prathapar et al., 2005). Las fuentes de agua subterránea y áreas con escasez de agua se asocian principalmente a una alta conductividad eléctrica debido a los materiales disueltos. Los materiales de cañerías malos o viejos también contribuyen al aumento de la conductividad eléctrica debido a la filtración en las fuentes de aguas grises. El rango de turbidez registrado para las aguas grises está entre 19 y 444 NTU, y depende principalmente de las actividades del uso del agua. Se espera que las aguas grises, cuyas principales fuentes se originan en la cocina y la lavandería sean más turbias debido a una mayor presencia de partículas en suspensión (Oteng-Peprah et al., 2018).

### **3.3.2 Componentes Químicos**

Para identificar los diferentes componentes químicos en las aguas grises, es importante comprender las fuentes de los contaminantes. Los componentes químicos significativos en las aguas grises provienen de los productos químicos utilizados para limpiar, cocinar y bañarse. El pH de las aguas grises depende en gran medida del pH y la alcalinidad del suministro de agua y normalmente se encuentra dentro del rango de 5 a 9 (Oteng-Peprah et al., 2018). Las aguas grises, con la mayoría de sus fuentes originadas en la ropa, generalmente exhibirán un pH alto (desde 7,5 hasta 10) debido a la presencia de materiales alcalinos utilizados en los detergentes. Los principales componentes químicos que se encuentran en las aguas grises que se generan como resultado de las actividades de limpieza o lavado son los tensoactivos. Estos tensoactivos sirven como principal agente activo en la mayoría de los productos de limpieza. Pueden ser de naturaleza catiónica o aniónica, siendo la mayoría de los productos de limpieza y lavado aniónicos (Jakobi & Löhr, 1987). Los surfactantes son generalmente a base de sal y constituyen

una fuente de amonio en las aguas grises. Otros componentes que se encuentran en las aguas grises también incluyen nitratos y fosfatos que, según se informa, provienen de surfactantes y de amonio y desinfectantes de ropa, respectivamente (Eriksson et al., 2003). Otros componentes, como el sodio, que también proviene de las actividades de cocción y conservación en la cocina, también puede ser encontrado en niveles apreciables. Los jabones a base de sodio también aportan una cantidad significativa de sodio a las aguas grises. Otros aditivos en los detergentes que controlan la dureza del agua son la fuente principal de contaminantes de fosfato en las aguas grises (Lange, 1994). Nutrientes como el nitrógeno (N) y Fósforo (P) están asociados con las actividades de cocina y lavandería. Las aguas grises con altas concentraciones de nutrientes se componen principalmente de una alta fracción de fuentes de cocina y lavandería (Boyjoo et al., 2013). Los desechos de cocina son la principal fuente de nitrógeno en las aguas grises y oscilan entre 4 y 74 mg/L, mientras que, los detergentes para ropa, son la principal fuente de fosfatos que se encuentran en las aguas grises, que oscilan entre 4 y 14 mg/L (Boyjoo et al., 2013).

Los parámetros convencionales de aguas residuales como la demanda bioquímica de oxígeno ( $DBO_5$ ) y demanda química de oxígeno (DQO) siempre muestran una dominancia de DQO sobre  $DBO_5$ . La biodegradabilidad del agua gris es determinada por la relación  $BOD_5/DQO$ . La relación determina la facilidad con la que las bacterias pueden descomponer la materia orgánica en las aguas grises. En su mayoría, las aguas grises muestran una buena biodegradabilidad en términos de relaciones  $DBO_5/DQO$  (Li et al., 2009). Las relaciones medias de  $DBO_5/DQO$  en las aguas grises han oscilado entre 0.3 y 0.7, lo que indica que casi la mitad de la materia orgánica de las aguas grises es biodegradable (Halalsheh et al., 2008). La dominancia de DQO sobre el  $BOD_5$  se debe en gran parte a la presencia de XOCs que aumentan la DQO. Los XOCs son componentes orgánicos sintéticos que están presentes en los químicos que están presentes en productos químicos domésticos y farmacéuticos, como blanqueadores, surfactantes,

suavizantes y productos de belleza. Los XOCs (componentes xenobióticos orgánicos, en inglés xenobiotic organic compound) también se pueden formar por la modificación parcial de químicos en tratamientos de aguas grises químicos o biológicos (Fatta-Kassinos et al., 2011). Los XOCs son resistentes a los protocolos de tratamiento convencionales y pueden acumularse fácilmente en plantas y animales y, posteriormente, poner riesgos en el medio ambiente natural (Fatta-Kassinos et al., 2011). Se han identificado 900 XOCs potenciales en el agua gris solamente basado en los ingredientes de diferentes cosméticos y detergentes en Dinamarca (Eriksson et al., 2003). También se ha identificado la presencia de antibióticos en el agua gris, lo que puede dar pie a la proliferación de cepas de bacterias resistentes (Le-Minh et al., 2010). Revitt et al (2010) identificó la presencia de benceno y 4-nitrofenol en concentraciones apreciables en aguas grises. Otras sustancias peligrosas como los retardantes de llama bromados, hidrocarburos aromáticos policíclicos, aromáticos monocíclicos, triclosanos y ftalatos (Palmquist & Hanæus, 2005).

### **3.3.3 Características Biológicas**

Las aguas grises contienen microorganismos como bacterias, protozoos y helmintos que se introducen en estas por contacto directo. La manipulación de alimentos inapropiada en la cocina y la manipulación directa de alimentos contaminados se ha identificado como fuente de bacterias patógenas entéricas como Salmonella y Campylobacter en aguas grises (Maimon et al., 2014; Ottoson & Stenström, 2002). La contaminación fecal también es común en las aguas grises y se asocia en gran medida con una higiene personal deficiente y con la eliminación de las aguas grises que contienen pañales lavados. Se ha detectado Escherichia coli patógena y virus entéricos en aguas grises con mayoría de fuentes procedentes de lavado durante un programa de control microbiano en Melbourne, Australia (O'Toole et al., 2012). En este estudio fueron detectados en 20 de 111 muestras (18%), 8 muestras fueron positivas por enterovirus (7%) y 11% por *E. Coli*. Los indicadores más comunes para evaluar la contaminación fecal son las coliformes fecales y *E.*

*Coli*. Estudios hechos por Eriksson et al., (2003) y Ottoson & Stenström (2002) revelaron una gran cantidad de patógenos relacionados con las excretas asociados con aguas grises.

### 3.3.4 Resumen de caracterizaciones de aguas grises

En la tabla 2 se muestra un resumen de la caracterización de aguas grises realizada por Franco, 2007:

**Tabla 2**

*Resumen Caracterización de Aguas Grises en la literatura, extraído de Franco, 2007.*

Parámetros	Unidades	Promedio	Mínimo	Máximo
<b>Físicos</b>				
C.E.	dS/m	-	0.33	1.48
SST	mg/l	77.0	20	1500
SDT	mg/l	-	420	1700
Turbiedad	UNT	100	20	200
<b>Químicos</b>				
DBO5	mg/l	158.2	26	550
DQO	mg/l	515.8	77	1135
Fósforo (P)	mg/l	3.3	0.28	27.3
Nitrógeno Total	mg/l	10.2	1.7	50
Nitrógeno Kjeldahl	mg/l	10.7	0.6	50
Nitrato (NO3)	mg/l	4.1	0	11.5
pH		7.0	5	8.7
<b>Microbiológicos</b>				
Coliformes Fecales	ufc/100ml	3*10 <sup>6</sup>	10 <sup>1</sup>	10 <sup>7</sup>
Coliformes Totales	ufc/100ml	-	10 <sup>2</sup>	8.03*10 <sup>7</sup>

En la tabla 3 se muestra un resumen de las caracterizaciones de aguas grises en diferentes países y Chile, según diferentes fuentes literarias.

**Tabla 3**

*Caracterización de aguas grises en Chile y países similares. Para España se considera solo duchas y lavamanos.*

Fuente		March et al, 2004; March y Gual, 2007; AQUA España, 2018	Andreidakis et al, 2015	Franco, 2007	Franco, 2007
País		España (a)	Grecia	Chile, Vallenar	Chile, Calama
Parámetros	Unidades				
<b>Físicos</b>					
C.E.	dS/m	10			
SST	mg/l	32-330		119	70
SDT	mg/l				
Turbiedad	UNT	22-200			
<b>Químicos</b>					
DBO5	mg/l	90-290	397-863	384	194
DQO	mg/l	151-177	617-1189	719	457
Fósforo (P)	mg/l			4.9	3.94
Nitrógeno Total	mg/l				
Nitrógeno Kjeldahl	mg/l	2.1-31.5	1.9-7.3	6.14	9.3
Nitrato (NO3)	mg/l				
pH		7.0-8.0			
<b>Microbiológicos</b>					
Coliformes Fecales	ufc/100ml	10 <sup>1</sup> -10 <sup>5</sup>		1.3*10 <sup>4</sup>	1.5*10 <sup>3</sup>
Coliformes Totales	ufc/100ml	10 <sup>1</sup> -10 <sup>6</sup>			

La composición de las aguas grises es variada y depende de las condiciones climáticas, del estilo de vida, el tipo de artículos higiénicos que se usan, la calidad del suministro de agua, el tipo de la red de distribución (Oteng-Peprah et al., 2018). Habrá variaciones significativas en la composición de las aguas grises tanto en ubicación como en el tiempo que pueden deberse a variaciones en el uso del agua (Oteng-Peprah et al., 2018). Generalmente, contienen altas

concentraciones de materiales orgánicos fácilmente biodegradables y algunos constituyentes básicos que en gran medida se generan en los hogares (Oteng-Peprah et al., 2018). Además el agua gris generada por diferentes orígenes según artefacto presenta una composición diferente como muestra la tabla 4 (Franco, 2007).

**Tabla 4**

*Características de aguas grises según origen. Extraído y modificado de Franco, 2007.*

Origen	Características
<b>Lavavajillas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Altamente contaminada con partículas de comida, aceites y grasas.</li> <li>-Cantidades variables de coliformes.</li> <li>-Crecimiento de microorganismos. Descomposición rápida. Mal olor.</li> <li>-Contiene detergentes, blanqueadores. Espumas.</li> <li>-Alta demanda de oxígeno.</li> <li>-Usualmente se considera como agua negra.</li> <li>-Generalmente presenta un valor sobre el promedio en sólidos suspendidos.</li> </ul>
<b>Ducha, tina y lavamanos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Generalmente corresponde al agua menos contaminada (aguas grises claras).</li> <li>-Ducha y tina presentan coliformes.</li> <li>-Puede contener orina, que es estéril en personas sanas, no obstante algunas infecciones en la vejiga pueden hacer que exista presencia de microorganismos, el potencial de éstos para sobrevivir y causar infecciones es considerado remoto.</li> <li>-Contiene pelos y productos de limpieza como jabón, shampoo y pasta de dientes.</li> <li>-Baja demanda de oxígeno.</li> <li>-Presenta turbiedad debido al jabón, shampoo y grasas.</li> </ul>
<b>Lavadora</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Contiene coliformes.</li> <li>-Contiene detergentes (sodio, fósforo, boro, amonio, nitrógeno). Espumas.</li> <li>-Alto pH</li> <li>-Alta salinidad</li> <li>-Alta cantidad de sólidos suspendidos (pelusas), alta turbiedad.</li> <li>-Son la principal fuente de sólidos disueltos y conductividad debido a la gran cantidad de sales disueltas, producto de los detergentes.</li> <li>-Es la principal fuente de surfactantes.</li> </ul>
<b>Piscinas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Altas concentraciones de microorganismos.</li> <li>-Gran presencia de químicos (residuos químicos de productos para mantenimiento, aceites para el cuerpo, cosméticos, etc.)</li> <li>-Polvo, pelos, pelusas</li> <li>-Generalmente no se considera esta agua en recuperación de aguas grises, debido al gran volumen evacuado en poco tiempo.</li> </ul>

### 3.3.5 Caracterización del afluente

Para la estimación de los parámetros físicos y químicos de las aguas grises se toman las siguientes consideraciones:

1.- La concentración de cualquier contaminante de la mezcla, es igual a la concentración (C) de una de las 4 fuentes diferentes, multiplicado por la proporción (P) de la fuente:

$$\sum_{k=1}^4 C_k \cdot P_k = C_{mezcla}$$

donde:

$$k = \{1, 2, 3, 4\} = \{ducha, lavamanos, lavaplatos, lavamanos\}$$

2.- Se considera la proporción de contaminantes según origen (k), con la misma proporción (P) de uso según origen que se considera en las aguas grises de las 4 fuentes diferentes (k) consideradas en Chile (Franco, 2007):

$$\begin{aligned} P_{k-Chile} &= P_{k-India} = P_{k-Grecia} \\ P_{ducha-Chile} &= 41\% \quad ; \quad P_{lavamanos-Chile} = 15\% ; \\ P_{lavaplatos-Chile} &= 11\% \quad ; \quad P_{lavadora-Chile} = 33\% \end{aligned}$$

3.- Para la estimación de las concentraciones iniciales de cada uno de los 4 orígenes (k) se consideran las proporciones de contaminantes de los estudios hechos en India y Grecia, manteniendo estas proporciones para la estimación de concentraciones por origen en Chile:

$$\begin{aligned} C_{ducha-India} : C_{lavamanos-India} : C_{lavaplatos-India} : C_{lavadora-India} \\ C_{ducha-Grecia} : C_{lavamanos-Grecia} : C_{lavaplatos-Grecia} : C_{lavadora-Grecia} \end{aligned}$$

4.- Por lo tanto, el valor estimado de cada origen (k) en Chile manteniendo la proporción sería multiplicando la concentración de cada contaminante por el siguiente factor dependiendo del país considerado para la estimación:

$$\frac{C_{mezcla-Chile}}{C_{mezcla-India}} ; \frac{C_{mezcla-Chile}}{C_{mezcla-Grecia}}$$

5.- La concentración de contaminantes considerada para Chile es el promedio de la caracterización de aguas grises realizada en Calama y Vallenar por Franco (2007).

### 3.3.6 Temperatura

Otro factor importante a definir es la temperatura a la que trabajará el sistema de tratamiento de aguas grises. Para esto, se extraen los datos desde el explorador de cuencas de CAMELS-CL tomando temperaturas mínimas y máximas desde el año 2012 al año 2019 y se calculan los promedios históricos entre los 5 meses más calurosos (Diciembre a Abril) y los 5 meses más fríos (Junio a Octubre). Debido a que la inactivación de patógenos es mucho más rápida en climas cálidos y/o soleados, se considera la temperatura media en la temporada más fría ya que es la condición más desfavorable; y se toma la temperatura media ya que los humedales mantienen una temperatura relativamente constante durante el día. De esta forma se llega a que el valor promedio en la temporada más fría es de 11 °C.

El rango óptimo para el desarrollo de la actividad bacteriana se encuentra entre 25 y 35 °C, si la temperatura se acerca a los 50 °C los procesos de digestión aerobia y nitrificación bacteriana se detienen, mientras que si la temperatura es menor a 5 °C la actividad microbiana se inhibe (Delgadillo et al., 2010). El valor promedio en la temporada más cálida es de 18 °C.

### 3.3.7 Consideraciones Ambientales y de Salud Pública

El tratamiento adecuado del agua es esencial para eliminar contaminantes y microorganismos perjudiciales que pueden representar riesgos significativos para la salud humana y el ecosistema en general. Cuando el agua no se trata correctamente, se pueden

presentar una serie de riesgos preocupantes que afectan tanto a las personas como al medio ambiente (Lara-Borrero, 1999).

Los elementos que causan mayor preocupación y sus efectos potenciales se presentan en la tabla 5.

**Tabla 5**

*Contaminantes y sus efectos potenciales. Extraído de Lara-Borrero, 1999.*

<b>Contaminantes y sus efectos potenciales</b>		
<b>Contaminante</b>	<b>Salud</b>	<b>Medio Ambiente</b>
Nitrógeno	Suministro de agua a niños pequeños	Eutrofización
Fósforo	No tiene impacto directo	Eutrofización
Patógenos	Formación de aerosoles en el suministro de agua para cultivos	Acumulación en el terreno y contaminación de la vida salvaje
Metales	Suministro de agua a cultivos y animales en la cadena alimenticia humana	A largo plazo daños en el terreno y son tóxicos para plantas y animales
Elementos traza orgánicos	Suministro de agua para plantas y animales en la cadena alimenticia	Acumulación en el terreno

### **3.4 Tecnologías para tratamiento de aguas grises**

Existen diversos sistemas de tratamiento para recuperar aguas grises, el objetivo clave es lograr una calidad apropiada para el uso previsto y pueden ser de tipo primario, secundario o terciario. Estos sistemas ocupan procesos físicos, químicos y biológicos. Según Díaz et al (2021) los procesos físicos más comunes son; los filtros de arena y de membrana. Los químicos incluyen la coagulación, oxidación foto catalítica, intercambio iónico, etc. Los procesos químicos son de mayor complejidad y costo, por ello, no se abordan en este estudio. Los tratamientos biológicos

incluyen; el reactor ascendente, humedales y bioreactores de membranas, en general todos seguidos por desinfección.

Las etapas del tratamiento de aguas residuales se pueden definir de la siguiente manera (Rojas, 2002):

- Pretratamiento
- Tratamiento primario
- Tratamiento secundario
- Tratamiento avanzado o terciario
- Desinfección

### **3.4.1 Pretratamiento**

El objetivo del pretratamiento en un sistema de tratamiento de agua es eliminar, reducir o modificar los componentes de las aguas grises del influente que puedan provocar problemas operativos en los procesos siguientes, como la colmatación (Fernández, 2016).

Algunos procesos considerados dentro del tratamiento preliminar son rejillas o tamices, trituradores, desarenadores, desengrasadores, preaireación y fosas sépticas.

Se recomienda considerar fosa séptica como pretratamiento en diferentes tipos de tratamientos de aguas grises, incluido los humedales construídos (Díaz et al., 2021).

Este tipo de sistemas disminuye contaminantes como la  $DBO_5$ , DQO, y SST. Se puede suponer que remueve 1/3 de la carga de  $DBO_5$  (Dotro et al., 2021). Lo que modifica las concentraciones iniciales del afluente antes de llegar al tratamiento de aguas grises.

Para tener un enfoque conservador, se considera una eliminación del 25% para los SST y la  $DBO_5$ .

### **3.4.2 Tratamiento primario**

Su objetivo es la remoción por medios físicos o mecánicos de gran parte del material sedimentable o flotante. Puede remover entre 25 y 40% de la carga orgánica DBO<sub>5</sub> y entre 50 y 65% de los sólidos suspendidos. Algunos tipos de tratamiento primario son: Sedimentación primaria, flotación, precipitación química, filtros gruesos, oxidación química y coagulación, floculación, sedimentación y filtración (Rojas, 2002).

### **3.4.3 Tratamiento secundario**

La reducción de compuestos orgánicos se realiza principalmente mediante procesos biológicos. Los procesos biológicos más usados son los lodos activados y los filtros percoladores. Dentro de este grupo se incluyen las lagunas de estabilización y aireadas, así como el tratamiento aeróbico y anaeróbico. Estos tratamientos tienen una eficiencia de remoción de la DBO<sub>5</sub> de 85 a 95%, y están compuestos por:

- Filtración biológica:
  - Baja capacidad (filtros clásicos)
  - Alta capacidad:
    - Filtros comunes
    - Biofiltros
    - Aero-filtros
- Lodos activados:
  - Convencional
  - Aireación prolongada
- Lagunas:
  - Estabilización:
    - Aerobia

- Facultativa
    - Maduración
  - Aireada
    - Mezcla completa
    - Aireada facultativa
    - Difusión de aire
- Otros:
  - Anaeróbicos:
    - Contacto
    - Filtro anaerobio
    - Reactor anaeróbico de flujo ascendente
  - Oxígeno puro:
    - Unox/linde.
  - Discos rotatorios

#### **3.4.4 Tratamiento terciario**

Complementa los procesos anteriores para lograr efluentes más puros, con menor carga contaminante y pueda ser utilizado para usos con diferentes exigencias. Los compuestos removidos generalmente por este tratamiento son (Rojas, 2002):

- Fosfatos y nitratos
- Huevos y quistes de parásitos
- Sustancias surfactantes
- Algas
- Bacterias y virus (desinfección)

- Radionucleidos

### 3.4.5 Desinfección

La desinfección tiene gran importancia ya que asegura la inocuidad del agua y para evitar la transmisión de enfermedades.

Actúa destruyendo los microorganismos patógenos presentes en el agua antes de ser utilizada. Puede ser mediante agentes químicos o físicos y debe tener un efecto residual con el fin de mantener esta desinfección hasta el momento del uso de esta agua (Fustamante, 2017).

De los desinfectantes presentes en el mercado el cloro es el de mayor uso, debido a su efecto residual, su bajo costo y su facilidad de aplicación (Fustamante, 2017).

### 3.4.6 Resumen Tecnologías para Tratamiento

La tabla 6 muestra un resumen de las características de cada nivel de tratamiento. Indicando el contaminante objetivo, su eficiencia de remoción y su mecanismo de acción predominante para remover los contaminantes.

**Tabla 6**

*Características de los principales niveles de tratamiento (Arancibia Pérez, 2022).*

Item	Nivel de tratamiento			
	Preliminar	Primario	Secundario	Terciario
Contaminantes removidos	Sólidos gruesos (basuras, arenas) Grasas Acondicionamiento químico (pH)	Sólidos suspendidos sedimentables Materia orgánica suspendida (parcialmente)	Sólidos no sedimentables Materia orgánica suspendida fina/soluble (parcialmente) Nutrientes (parcialmente) Patógenos (parcialmente)	Contaminantes específicos Materia orgánica fina y soluble (pulimento) Nutrientes patógenos (principalmente)
Eficiencias de remoción	DBO5: 0-5% Coliformes: 0% Nutrientes: 0%	SS: 60-70% DBO5: 30-40% Coliformes: 30-40% Nutrientes: <20%	SS: 60-99% DBO5: 60-99% Coliformes: 60-99% Nutrientes: 10-50%	SS: >99% DBO5: >99% Coliformes: >99% Nutrientes >90%
Mecanismo predominante	Físico	Físico	Biológico o químico	Biológico o químico

La tabla 7 muestra algunos sistemas de tratamiento de aguas grises y sus resultados

**Tabla 7**

*Eficiencias de remoción de contaminantes de sistemas de tratamiento de aguas grises,*

*adaptado de Oteng-Peprah et al. (2018), Dotro et al., (2021) y Díaz et al. (2021).*

Parámetro	Filtración	Humedal Construido	Reactor Biológico Secuencial	Contactador Biológico Rotatorio	Biorreactor de Membrana	Reactor Anaeróbico de Flujo Ascendente
Turbiedad [NTU]	-	45-100%	-	-	98-99%	-
EC [µS/m]	-	-	-	-	-	-
SST [mg/L]	53-93%	>80%	-	9-12%	Hasta un 100%	-
SDT [mg/L]	-	-	-	-	-	-
DBO5 [mg/L]	89-98%	>80%	90-98%	27-53%	93-97%	Hasta un 67%
DQO [mg/L]	37-94%	>80%	90-98%	21-61%	86-99%	38-79%
Cl [mg/L]	-	92-94%	-	-	-	-
Nitrato [mg/L]	17-73%	-	-	-	6-72%	-
Nitrato total [mg/L]	5-98%	30-50%	80%	-	52-63%	24-58%
Fosforo total [mg/L]	Hasta un 100%	10-20%	-	-	Hasta un 19%	10-39%
CF [CFU]	-	-	-	88.5-99.9%	Hasta un 99%	-
E.Coli [CFU]	Hasta un 100%	51-99%	-	88.5-99.9%	-	-
Ca [mg/L]	Hasta un 100%	-	-	-	-	-
Mg [mg/L]	Hasta un 100%	-	-	-	-	-
Na [mg/L]	47%	-	-	-	-	-

### 3.5 Percepciones del reúso de aguas grises

Un factor importante para el éxito de un sistema de tratamiento de aguas grises es la percepción pública del sistema y el reúso de aguas grises.

Se ha estudiado la percepción pública sobre el reúso de aguas grises en diferentes partes del mundo a través de diferentes métodos como encuestas, cuestionarios, entrevistas, etc. y gran cantidad de estos estudios han identificado un apoyo claro al concepto de reúso de aguas grises como un método ambientalmente sustentable para la protección de recursos hídricos frescos y prevención de la contaminación. El esquema más aceptado para el reúso de aguas grises es para usos no potables (Oteng-Peprah et al., 2018).

Otros estudios han identificado una mejor disposición a usar agua reciclada propia que la de una fuente no conocida (Jeffery & Jefferson, 2003). El apoyo público a estas iniciativas es mayor en áreas con sequía y suministro de agua incierto (Alhumoud & Madzikanda, 2010).

### **3.6 Elección de Sistemas de Tratamiento**

Para la elección de sistemas de tratamiento se consideran diferentes factores tales como la superficie de terreno requerida, rendimiento, consumo energético, costos de construcción, costos de operación/mantenimiento, mano de obra y generación de lodos. Cada uno de estos factores altera el resultado final del desempeño del sistema de tratamiento, cada uno en diferente medida dependiendo de las condiciones iniciales del lugar. Sin embargo, también dependiendo del usuario y el uso final que se le dará a las aguas tratadas es que se le da mayor valor a un factor sobre otro. De acuerdo al fin de este trabajo, los factores que se priorizan en la elección del sistema de tratamiento a utilizar son el costo de construcción y una fácil operación/mantenimiento.

Para este caso de estudio, que es una vivienda unifamiliar de 5 personas en la región de Valparaíso, los factores que se priorizan, son el costo de construcción, que sea amigable con el medio ambiente y operación/mantenimiento.

De acuerdo a la tabla 8 presentada a continuación, se considerará la opción de humedal construido, ya que es un sistema que tiene costos de construcción y operación/mantenimiento bajos, y además Chile presenta ventaja en la utilización de humedales (Díaz et al., 2021).

**Tabla 8**

*Comparación entre sistemas de tratamiento de aguas servidas. Extraído de Pizarro, 2011.*

Tipo de Tratamiento	Criterio						
	Superficie	Rendimiento	Consumo Energético	Construcción	Operación/Mantenimiento	Mano de Obra	Generación de lodos
Lodos Activados	Bajo	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto
Laguna Estabilización	Alto	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
Laguna Aireada	Alto	Bajo	Alto	Medio	Medio	Medio	Medio
Biodiscos (CBR)	Bajo	Alto	Medio	Alto	Medio	Alto	Medio
Lombrifiltro	Medio	Medio	Bajo	Bajo	Bajo	Medio	Bajo
Biofiltro	Medio	Medio	Bajo	Medio	Bajo	Medio	Bajo
Humedales Construidos	Alto	Medio	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo

### 3.7 Humedales construidos (HC)

Los HC son sistemas de ingeniería diseñados para embalsar el agua bajo diferentes condiciones operativas, aprovechando los procesos naturales que involucran vegetación, suelos y bacterias, para tratar los residuos líquidos como las aguas servidas (Vera et al., 2016). Se deben tener consideraciones especiales para elegir la flora y fauna, suelo y microorganismos para remover los contaminantes de interés. Generalmente se clasifican en 3 tipos, de flujo subsuperficial, de flujo superficial y humedales flotantes. Los sistemas de flujo subsuperficial han sido los más utilizados y se agrupan en 2 tecnologías principales, HC de flujo vertical (HCFV) y HC de flujo horizontal (HCFH). Cada uno remueve contaminantes por una combinación de procesos físicos, químicos y biológicos. La eficiencia del tratamiento depende de factores como la tasa de carga (Halalsheh et al., 2008). Tienen potencial de remoción de  $DBO_5$ ,

sólidos suspendidos y algunos metales pesados como Pb, Zn y Fe, entre otros. Gross (2008) observó que, en los Humedales Construidos de Flujo Horizontal (HCFH) aplicados en el tratamiento de aguas grises, el desempeño mejoraba si había un pretratamiento en las aguas a tratar. Una de las ventajas que tienen los humedales construidos es su habilidad para funcionar sin la atención de un operador. Además, son incapaces de remover al nivel requerido agentes microbiológicos como *E. Coli* y huevos de helminto por lo que el efluente requiere de tratamiento extra si el objetivo es el reúso. Los HC pueden producir efluentes con la DBO<sub>5</sub> y SST dentro de los límites del estándar para el reúso.

En el capítulo 4 de esta memoria se entra más en profundidad sobre las consideraciones para el diseño de un HCFH y un HCFV.

### **3.8 Marco legal y normativo**

Si bien tanto en Chile como en el mundo uno de los principales factores que limitan el reúso de aguas grises son de tipo cultural y de percepción pública, también otra gran barrera es de tipo regulatorio, ya que para promover el reúso de aguas grises se requiere el apoyo de políticas para el aprovechamiento de estas fuentes de agua y del financiamiento para las instalaciones requeridas para el reúso de aguas grises.

Históricamente las aguas grises han sido tratadas como aguas servidas en vista de la inexistencia del concepto en algún cuerpo legal vigente. Hasta el año 1999 se mencionaba en la NCh 1105 Of 1999 actualizada el 2009 y declarada Norma Oficial de la República por el Decreto N° 418 de 2014 del Ministerio de Obras Públicas. Esta norma señala que las aguas grises son “las aguas residuales que provienen de tinajas y duchas, lavaderos, lavaplatos y otros similares, excluyendo las aguas negras”. El año 2014 cambia la situación ya que se discute en el Congreso el proyecto de ley que norma el servicio de recolección y disposición de aguas grises (Stevens Salazar, 2021).

En 2018 en Chile se aprobó la Ley 21.075, que regula la recolección, reutilización y disposición final de aguas grises. Esta ley establece que el Ministerio de Salud es el responsable de dictar un reglamento que indique las condiciones sanitarias que deberán cumplir los sistemas de reutilización de aguas grises. Este reglamento abordará aspectos como los usos permitidos para las aguas grises tratadas, los requisitos que deberá cumplir el sistema para cada uso autorizado y las características específicas del efluente tratado.

Las principales leyes y normas que regulan los asuntos del agua en Chile, tanto en recolección, aprovechamiento, alcantarillado y agua potable, salud y reutilización de aguas grises son las siguientes:

### **3.8.1 Leyes**

- **Decreto 236, Ministerio de Higiene, Asistencia, Previsión y Trabajo:** reglamento general de alcantarillados particulares, fosas sépticas, cámaras filtrantes, cámaras de contacto, cámaras absorbentes y letrinas domiciliarias.
- **Decreto 70, Ministerio de Obras Públicas:** manual de normas y técnicas para la realización de las instalaciones de agua potable y de alcantarillado
- **Decreto 46, Ministerio Secretaría General de la Presidencia:** establece norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas.
- **Decreto 90, Ministerio Secretaría General de la Presidencia:** establece norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales.
- **Decreto 609, Ministerio de Obras Públicas:** establece norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos industriales líquidos a sistemas de alcantarillado.

- **Decreto con Fuerza de Ley 1.122, Ministerio de Justicia:** regula las aguas y el derecho de aprovechamiento.
- **Decreto con Fuerza de Ley 725, Ministerio de Salud Pública:** código sanitario, rige todas las cuestiones relacionadas con el fomento, protección y recuperación de la salud de los habitantes de la República, salvo aquellas sometidas a otras leyes.
- **Ley 19.300, Ministerio Secretaría General de la Presidencia:** ley sobre bases generales del medio ambiente.
- **Decreto 50, Ministerio de Obras Públicas:** establece las condiciones técnicas que deberán cumplirse en el proyecto, construcción y operación de las obras hidráulicas identificadas en el artículo 294 del referido texto legal.
- **Ley 21.075, Ministerio de Obras Públicas:** regula la recolección, reutilización y disposición de aguas grises. Esta ley indica que el Ministerio de salud debe dictar el reglamento con las condiciones sanitarias mínimas, organismo que generó un reglamento pero que aún no ha sido aprobado por la Contraloría General de la República (Stevens Salazar, 2021), aunque para este trabajo se utilizará.

En la tabla 9 se presentan los parámetros que deben cumplir las aguas grises tratadas para ser reutilizadas para uso urbano.

**Tabla 9**

*Límites máximos permisibles para uso urbano del proyecto de reglamento sobre condiciones sanitarias básicas para la reutilización de aguas grises.*

Parámetros	Unidad	Límite máximo
DBO5	mg/l	10
SST	mg/l	10
CF	UFC/100 ml	10
Turbiedad	NTU	5
Cloro libre residual	mg/l	$0,5 \leq X \leq 2$

### 3.8.2 Normas

- **NCh 1.105:** ingeniería sanitaria - alcantarillado de aguas residuales - diseño y cálculo de redes.
- **NCh 3.371:** instalaciones domiciliarias de alcantarillado de aguas servidas - diseño, cálculo y requisitos.
- **NCh 1.104:** ingeniería sanitaria - presentación y contenido de proyectos de sistemas de agua potable y alcantarillado.
- **NCh 1.333:** requisitos de calidad del agua para diferentes usos.

### 3.9 Análisis económico

Para llevar a cabo un análisis exhaustivo, se procederá a proyectar cada alternativa a lo largo de un horizonte temporal de 20 años tomando en cuenta que los primeros sistemas instalados en Chile se construyeron a partir del año 2002, con una vida útil proyectada de igual duración (Vera et al., 2016). Con el objetivo de realizar una evaluación precisa, se aplicará una tasa de descuento del 6% al Valor Actual Neto (VAN), valor usado para proyectos de reciclaje de agua (Hernandez Loyola, 2017), considerando tanto la opción de implementar el proyecto con

financiamiento como la de prescindir de este último. Además del VAN se calculará el Periodo de Retorno de la Inversión (PRI) y la Tasa Interna de Retorno (TIR).

Se considerará además una variación de los precios de acuerdo al promedio de variación del IPC entre los años 2002 hasta el 2022, dando un valor de 3,57% anual (Banco Mundial, 2023).

En el contexto de la utilización de financiamiento, se tomará en cuenta el programa de crédito verde. Este programa, a través de instituciones financieras, tiene como objetivo impulsar el desarrollo y la implementación de proyectos destinados a mitigar los impactos del cambio climático y/o mejorar la sostenibilidad ambiental, según menciona la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). Esto se encuentra respaldado por el reglamento de crédito verde, específicamente en su punto 7, sección 3.i, que establece que son elegibles las operaciones de inversión que contribuyan a mejorar la eficiencia en el uso de los recursos naturales. Por ejemplo, se consideran proyectos orientados a reducir los efectos de la escasez hídrica. La distribución de este crédito se llevará a cabo a lo largo de un período de dos años. Esto permitirá minimizar el impacto de los intereses, respetando la tasa máxima anual establecida a 2 años por el comité ejecutivo de créditos, que asciende al 9.22% (CORFO, 2023). En este contexto, se considerará un monto de préstamo equivalente al 90% del valor total del proyecto, en conformidad con las directrices establecidas por CORFO del crédito verde.

Un aspecto adicional a analizar es la viabilidad en los distintos grupos tarifarios, dado que cada uno de estos grupos está compuesto por diversas localidades y tienen diferentes valores por m<sup>3</sup> de agua.

Los Grupos Tarifarios a considerar en este estudio son los siguientes:

- Grupo 1: Valparaíso, Quilpue, Villa Alemana, Viña del Mar, Reñaca, Con Con, Placilla, Curauma, Casablanca. 1.940 \$/m<sup>3</sup>.

- Grupo 2: Cuenca Aconcagua: Quillota, La Cruz, Limache, San Pedro, La Calera, Artificio, Hijuelas, San Felipe, Los Andes, Almendral, Real Curimón, Calle Larga, Rinconada, Catemu, Nogales, San Esteban, Putaendo, Llay Llay, Santa Maria. 1.791 \$/m<sup>3</sup>.
- Grupo 3: Cabildo, Petorca, La Ligua, Placilla de Ligua. 2.107 \$/m<sup>3</sup>.
- Grupo 4: Quintero, Papudo, Zapallar, Cachagua, La Laguna, Punta Puyai, Puchuncaví. 2.120 \$/m<sup>3</sup>.
- Grupo 5: Cartagena, San Sebastian, San Antonio, Las Cruces. 1.838 \$/m<sup>3</sup>.
- Grupo 6: El Tabo, Isla Negra, El Quisco, Algarrobo y Punta de Tralca. 2.944 \$/m<sup>3</sup>.

Este análisis financiero, fundamentado en criterios sólidos y acordes a las regulaciones pertinentes, permitirá una evaluación precisa de las diferentes opciones en juego, brindando una visión integral de los aspectos económicos del proyecto.

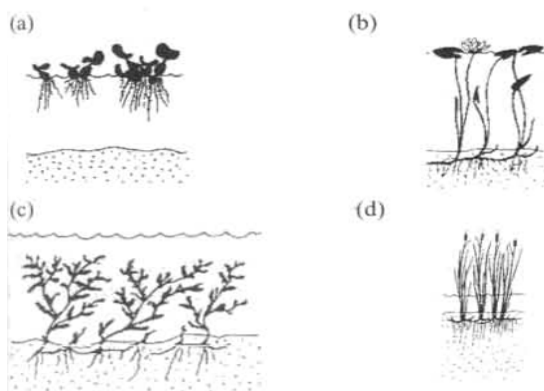
#### 4. Humedales Construidos

Principalmente los humedales construidos son tecnologías para tratamiento que pueden tratar eficientemente una gran variedad de aguas contaminadas. Son diseñados para optimizar los procesos encontrados en ambientes naturales por lo que son considerados como amigables con el ambiente y sustentables para el tratamiento de aguas residuales. Además tienen bajos requerimientos de operación y mantenimiento y su rendimiento es menos susceptible a variaciones de carga y concentración de contaminantes en el afluente (Dotro et al., 2021).

##### 4.1 Tipos de humedales construidos:

Los humedales se pueden clasificar de acuerdo a las características de la vegetación predominante en el lecho (ver Figura 5):

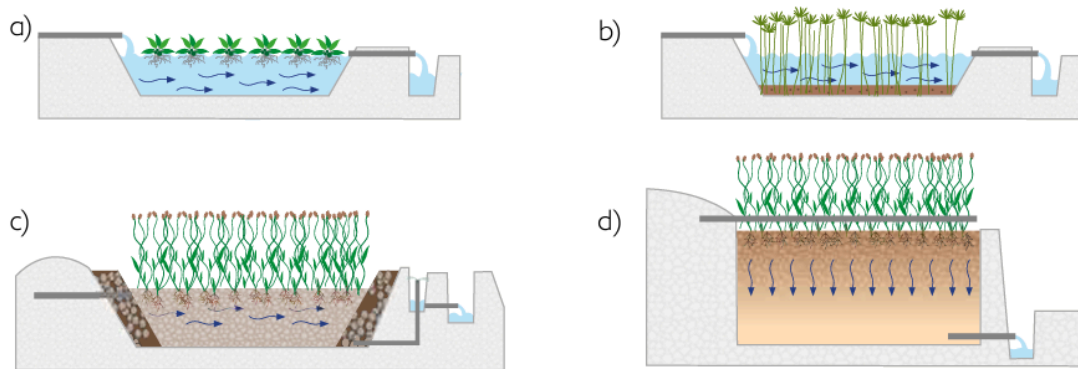
- a) Basados en macrófitas flotantes
- b) Basados en macrófitas de hojas flotantes
- c) Basados en macrófitas sumergidas
- d) Basados en macrófitas emergentes



**Figura 5.** Tipos de humedales según plantas predominantes: (a) macrófitas flotantes, (b) macrófitas de hojas flotantes, (c) macrófitas sumergidas y (d) macrófitas emergentes (Arias I. & Brix, 2003).

También los humedales se pueden clasificar de acuerdo a las características del flujo hidráulico de la siguiente forma (ver Figura 6):

- a) Humedales construidos con flujo superficial (FS)
- b) Humedales construidos con flujo horizontal subsuperficial (HFSS)
- c) Humedales construidos de flujo vertical subsuperficial (VFSS)



**Figura 6.** Tipos de humedales según tipo de flujo: (a) Humedales de flujo superficial con macrófitas flotantes. (b) Humedales de flujo superficial con macrófitas arraigadas (c) Humedales de flujo horizontal subsuperficial y (d) Humedales de flujo vertical subsuperficial. *Extraído de Vidal & Hormazábal, 2018.*

La Figura 7 muestra los distintos tipos de humedales construidos:



**Figura 7.** Esquema de distintos tipos de Humedales construidos, extraído de Delgadillo *et al.*, 2010.

Las macrófitas emergentes han demostrado buena capacidad de adaptación y son resistentes a las condiciones ambientales adversas cuando se trata de aguas residuales (Arias I. & Brix, 2003).

#### **4.1.2 Humedal construido de flujo subsuperficial horizontal (HCFSSH)**

El humedal de flujo horizontal (FH) se originó en Alemania a finales de la década de 1960 y es conocido también como humedal construido de flujo subsuperficial horizontal (HCFSSH). El concepto fundamental es el trasiego de agua a través de un medio poroso. En el tratamiento de aguas residuales domésticas, a menudo siguen al tratamiento primario realizado mediante fosa séptica o tanques Imhoff (Dotro et al., 2021).

Su estructura normalmente incluye un lecho de grava saturado, plantado con macrófitas emergentes. El agua entra al sistema, fluye a través del lecho de grava sin exponerse a la atmósfera y se recoge en la salida. Se regula el nivel del agua a través de un sistema de control de nivel de agua. El lecho se debe impermeabilizar mediante una lámina de HDPE y si es necesario se protege con geotextil. El medio granular generalmente tiene una profundidad de 0,5 a 0,7m y el nivel del agua queda entre 5 a 10cm bajo el medio. Llevan una pendiente longitudinal de 1% para facilitar el drenaje (Dotro et al., 2021).

#### **4.1.3 Humedal construido de flujo subsuperficial vertical (HCFSSV)**

En líneas generales, los humedales de flujo vertical (FV) demuestran eficacia en la eliminación de contaminantes degradables aeróbicamente. En el tratamiento de aguas residuales domésticas y urbanas, la materia orgánica es eliminada mayormente mediante procesos microbiológicos aerobios, mientras que los sólidos y organismos patógenos se eliminan principalmente por filtración. El diseño del humedal, especialmente la elección del material de relleno, incide directamente en los resultados del tratamiento (Dotro et al., 2021).

La guía de diseño danesa establece que un humedal de FV diseñado según sus directrices puede eliminar hasta el 95% de DBO5 y el 90% de amonio, cumpliendo así con las normativas locales. Las guías de diseño en Dinamarca, Alemania y Austria comparten parámetros similares y proporcionan orientación sobre el cumplimiento de normativas de descarga locales. Esto incluye recomendaciones sobre capas de drenaje, capas de transición y capas superficiales en el lecho del humedal. Además, la presencia de plantas contribuye físicamente al proceso, aunque su papel en la asimilación de nutrientes es menor en comparación con los procesos microbiológicos (Dotro et al., 2021).

## **4.2 Mecanismos de remoción de contaminantes**

La purificación de las aguas ocurre por la interacción de los diferentes elementos que componen un humedal y los fenómenos físicos, químicos y biológicos que acontecen en el sistema.

### **4.2.1 Eliminación de sólidos suspendidos**

Principalmente se elimina por filtración a través del sustrato, rizomas y raíces, mediante los procesos de sedimentación, floculación y filtración.

El mayor porcentaje de eliminación de partículas en suspensión tiene lugar en la zona de entrada de los HCFSSH (García & Corzo, 2008).

En el caso de los HCFSSV, la eliminación de los sólidos suspendidos ocurre entre 1/4 y 1/3 de la longitud del sistema mientras que en los verticales ocurre en los primeros centímetros del medio granular y va disminuyendo en forma vertical (Forero Siachoque, 2013).

La eliminación de la materia en suspensión en estos sistemas es muy elevada, generalmente con porcentajes de remoción sobre el 90% generando efluentes con concentraciones menores a 20 mg/l de forma sistemática (Forero Siachoque, 2013).

#### **4.2.2 Eliminación de materia orgánica**

En humedales diseñados para el tratamiento de aguas residuales, los mecanismos de eliminación de materia orgánica varían según el tipo de materia orgánica (particulada o soluble) y el diseño del humedal. Para medir la materia orgánica se utiliza la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y la Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días ( $DBO_5$ ). La materia orgánica particulada se retiene mediante procesos físicos como filtración y sedimentación, acumulándose y sufriendo hidrólisis en el lecho del humedal. La materia orgánica soluble se elimina a través de diversas vías microbianas, como respiración aerobia, desnitrificación, sulfato reducción y metanogénesis, cada una operando en condiciones redox específicas dentro del humedal. La respiración aerobia es dominante en humedales de flujo superficial, mientras que la desnitrificación es importante en humedales de flujo subsuperficial. La sulfato reducción es significativa para la eliminación de DQO en humedales de flujo horizontal, y la metanogénesis, aunque no elimina DQO directamente, contribuye a la desgasificación del metano, ayudando en la eliminación de materia orgánica. Estos procesos son influenciados por la disponibilidad de oxígeno, nitrato, sulfato y la relación DQO:S (Dotro et al., 2021).

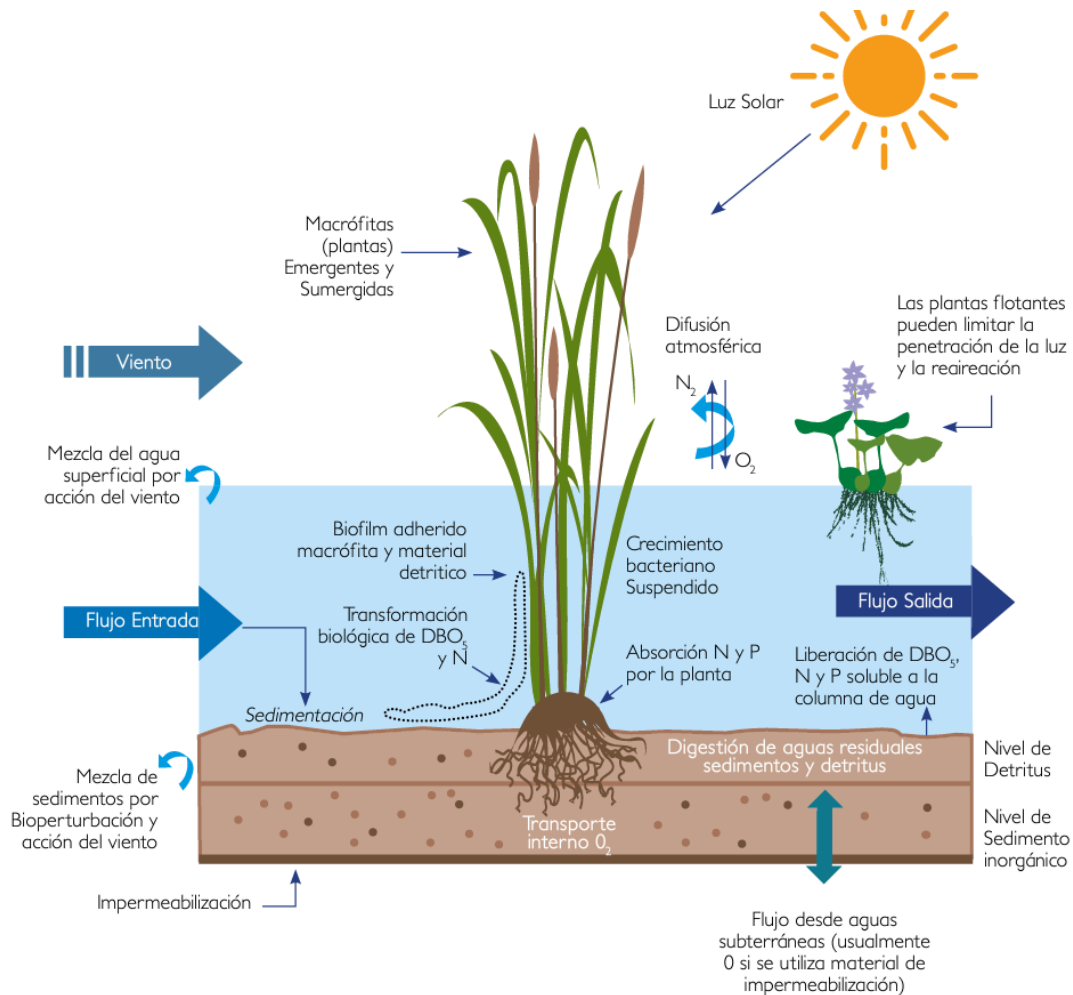
#### **4.2.3 Eliminación de patógenos**

La eliminación de patógenos principalmente se debe a tres procesos que ocurren dentro del sustrato, la filtración, la adsorción y la depredación.

Existe una relación directamente proporcional entre la eliminación de patógenos y el tiempo de retención hidráulico e inversamente proporcional al tamaño de la grava. La evaluación de la remoción de los patógenos se hace en base al estudio de microorganismos indicadores de contaminación fecal, como los coliformes fecales. La remoción en sistemas horizontales y verticales es similar y se mantiene entre 1 y 2 unidades logarítmicas/100 ml para todos los indicadores (Forero Siachoque, 2013).

#### 4.2.4 Resumen de mecanismos de remoción de contaminantes

La Figura 8 muestra las diferentes interacciones que ocurren en un humedal, graficando los intercambios de nutrientes y gases, transformaciones bioquímicas y mecanismos físicos que tienen lugar dentro de estos.



**Figura 8.** *Interrelaciones de una macrófita en un humedal construido. Extraído de Vidal y Hormazábal 2018.*

La tabla 10 muestra los mecanismos más importantes en la reducción de contaminantes dentro de los diferentes tipos de humedales.

**Tabla 10**

*Procesos principales en la reducción de contaminantes en HCFS, HCFSSH y HCFSSV.*

*Extraído de Vidal & Hormazábal, 2018.*

<b>Contaminante</b>	<b>FS</b>	<b>HCFSSH</b>	<b>HCFSSV</b>
Materia orgánica	Reducción de la materia orgánica soluble por conversión biológica por efecto de bacterias aerobias, facultativas y anaerobias que crecen en la superficie de las plantas y sobre los detritos. La materia orgánica particulada se elimina por adsorción, por filtración y por sedimentación en el fondo del lecho.	Reducción por conversión biológica por intervención de bacterias facultativas y anaeróbicas adheridas a la superficie de las plantas y los detritos del medio de relleno del humedal.	Reducción por conversión biológica por medio de bacterias facultativas y anaeróbicas adheridas a la superficie de las plantas y detritos.
Materia en suspensión	Filtración y sedimentación.	Filtración y sedimentación.	Filtración.
Nitrógeno	Nitrificación/desnitrificación, asimilación por las plantas y volatilización.	Nitrificación/desnitrificación, asimilación por las plantas y volatilización.	Nitrificación/desnitrificación, asimilación por las plantas y volatilización.
Fósforo	Reducción por sedimentación y por asimilación por parte de las plantas y microorganismos.	Por filtración, sedimentación, adsorción y asimilación por parte de las plantas y microorganismos.	Filtración, sedimentación, adsorción y asimilación por las plantas.
Metales pesados	Adsorción a las plantas, superficie de detritos y por sedimentación.	Adsorción a las raíces de las plantas y los detritos, sedimentación.	Adsorción a las raíces de las plantas, sedimentación y filtración.
Trazas de contaminantes orgánicos	Volatilización, adsorción, biodegradación, radiación UV.	Adsorción, biodegradación.	Volatilización, adsorción, biodegradación.
Patógenos	Muerte natural, depredación, radiación UV, sedimentación, secreción de antibióticos de las raíces de las plantas.	Muerte natural, depredación, sedimentación, secreción de antibióticos de las raíces de las plantas.	Muerte natural, depredación, sedimentación, secreción de antibióticos de las raíces de las plantas.

### **4.3 Componentes de los humedales construidos:**

Los principales componentes de los humedales son el sustrato o medio granular, la vegetación y los microorganismos.

#### **4.3.1 Sustrato o medio granular**

Los sustratos pueden ser suelo, arena, grava, roca y materiales orgánicos como el compost. La baja velocidad del agua permite la acumulación de sedimentos y restos de vegetación. Estos elementos desempeñan un papel fundamental al servir como sustrato para numerosos microorganismos residentes en el ecosistema. Además, actúan como catalizadores de transformaciones químicas y biológicas esenciales que ocurren en el humedal. Asimismo, funcionan como reservorios de varios contaminantes, y la acumulación de materia orgánica derivada de los restos de vegetación enriquece el entorno, promoviendo interacciones biológicas cruciales, la fijación de microorganismos y proporcionando una fuente de carbono indispensable para llevar a cabo procesos biológicos fundamentales en el humedal (Lara-Borrero, 1999).

Es necesario que los áridos utilizados para el medio granular deben estar lavados, ya que de lo contrario, puede haber un alto porcentaje de finos que pueden causar un incorrecto funcionamiento del humedal, provocando colmatación (Dotro et al., 2021).

En el caso del HC de flujo horizontal el tamaño de la grava en el medio principal varía entre 4 y 20 mm de diámetro. En la zona de entrada y salida del humedal se debe utilizar áridos de mayor tamaño para permitir una mejor distribución del afluente y recolección de este. Esta zona de amortiguación tiene un largo entre 0,5 y 1 m, y el diámetro de los áridos debe estar entre 10 a 20 cm (Dotro et al., 2021).

Para el caso del HC de flujo vertical el medio principal debe utilizar arena entre 0,06 y 4 mm y su profundidad va desde 0,5 a 1 m. Además se exige una capa de drenaje en el fondo del lecho de unos 20 cm de grava (20-60 mm) y una capa de transición de 10 cm de grava (4-8 mm).

Para evitar el lavado de arena a la capa de drenaje se coloca la capa de transición y utilizar la regla de Terzaghi  $D_{15}/d_{85} \leq 4$ , donde  $D$  corresponde a la capa de transición y  $d$  la capa principal (Dotro et al., 2021).

#### **4.3.2 Vegetación**

Los tipos de plantas que crecen y se utilizan en los humedales son las macrófitas, este tipo de plantas habita permanentemente en ambiente inundados, ya sea sumergida o emergente, la mayoría habita en aguas dulces, ya que muy pocas aguantan la salinidad que hay más cercana al mar (Vidal & Hormazábal, 2018).

Según Arias Triguero (2004) la tendencia general en los humedales construidos es plantar solo una especie de planta o como máximo 2 o 3 especies diferentes y los efectos de estas son:

- a) Efectos físicos: estabilizan el medio granular y amortiguan las variaciones de los parámetros ambientales como la temperatura, la velocidad del viento y la intensidad de la luz que llega al lecho.
- b) Efectos en la conductividad hidráulica: La muerte de raíces y rizomas dejan huecos en forma de pequeños tubos que permiten un cierto incremento y estabilización de la conductividad hidráulica del suelo.
- c) Superficie para el crecimiento de microorganismos: Las raíces y rizomas son un soporte físico para el crecimiento de bacterias y protozoos.
- d) Asimilación de nutrientes: Absorben nutrientes a través de su sistema radicular ya que requieren de estos para su crecimiento. Aunque hay que tener en cuenta que las cantidades asimiladas son menores y si las partes aéreas de las plantas no se cortan periódicamente, los nutrientes asimilados vuelven al agua por los procesos de descomposición.

e) Aporte de oxígeno: Los rizomas liberan oxígeno que promueve las reacciones bioquímicas estimulando la descomposición aeróbica de la materia orgánica y el crecimiento de bacterias nitrificantes.

Las plantas deben cumplir algunas condiciones como: (1) ser tolerantes a altas cargas orgánicas y de nutrientes, (2) tener abundantes raíces y rizomas para proporcionar sustrato para bacterias adheridas y oxigenación de las áreas adyacentes a estas y (3) tener una alta biomasa aérea para aislación térmica frente a las variaciones de temperatura y eliminación de nutrientes mediante la cosecha (Vymazal, 2011).

En la tabla 11 se muestran las especies emergentes más utilizadas para la depuración de las aguas y las características del hábitat necesarias para que se mantengan con vida.

**Tabla 11**

*Especies de macrófitas emergentes más utilizadas en humedales construidos. Adaptado y extraído de Vidal & Hormazábal, 2018.*

Familia	Nombre latino	Nombres comunes más usuales	Temperatura °C		Máxima salinidad tolerable ppt	Rango efectivo de pH
			Deseable	Germinación de las semillas		
<b>Macrófitas emergentes</b>						
Cyperaceae	Carex spp.	Cortadera	14-32		20	5-7,5
	Eleocharis spp.	Rume	18-27			4-9
	Scirpus lacustris	Junco de laguna	16-27			4-9
Poaceae o Gramíneas	Glyceria fluitans	Hierba del maná	12-23	10-30	45	2-8
	Phragmites australis	Carrizo	16-27	20-24	35	4,8-8,2
Iridaceae	Iris pseudacorus	Lirio amarillo, espadaña amarilla	15-20			
Juncáceas	Juncus spp.	Juncos	16-26		20	5-7,5
Typhaceae	Thypha latifolia	Eneas, espadañas	10-30	12-24	30	4-10

A continuación se presentan algunas de las plantas más utilizadas en humedales construidos:

- La espadaña (*Thypha*): se distribuye homogéneamente, robusta, crece bajo diversas condiciones medioambientales y se propaga fácilmente, lo que la hace ideal para un humedal construido. Produce una biomasa anual grande y puede remover pequeñas cantidades de N y P por medio de la poda y cosecha. Se planta en intervalos de 0,6m aproximadamente, produciendo una cubierta densa en menos de un año. Tiene baja penetración en grava (0,3m), por lo que no es recomendable en sistemas de flujo superficial (Lara-Borrero, 1999). Ver Figura 9.



**Figura 9.** *Espadaña (Thypha)*, Lara-Borrero, 1999.

- Juncos (*Scirpus*): se distribuyen homogéneamente y crecen en variados sistemas como aguas interiores y costeras, pantanos salobres y humedales. De la familia de las ciperáceas, son perennes y crecen en grupos. Crecen bien en agua desde 5cm a 3cm de profundidad. Su rango de temperatura deseable es de 16 a 27 °C. Pueden crecer en un pH entre 4 a 9. Su crecimiento es moderado y logran un buen recubrimiento en alrededor de un año plantándose en intervalos de 0,3m. Algunas variedades crecen más rápido y pueden cubrir en un año con la mitad de

espaciamiento (hasta 0,6m) (Lara-Borrero, 1999). Penetra en grava hasta 0,76m (Crites et al., 2006). Se usan mucho en humedales de flujo superficial (Lara-Borrero, 1999). Ver Figura 10.



**Figura 10.** *Juncos (Scirpus spp.)*, Lara-Borrero, 1999.

- Carrizos (Phragmites): plantas anuales y altas, con rizoma perenne extenso. Logran cubrir el medio en un año con una separación de 0,6m. En Europa son las plantas acuáticas emergentes más usadas (Lara-Borrero, 1999). Tienen una penetración de las raíces sobre 0,6m (Crites et al., 2006). Otra ventaja que poseen es que no se ven atacadas por animales en comparación a otras especies debido a que poseen un bajo valor alimenticio (Lara-Borrero, 1999). En Chile es una especie exótica y no se recomienda usarla en HC.

Ver Figura 11.



**Figura 11.** Carrizo (*Phragmites*), Lara-Borrero, 1999.

Los criterios para la elección de plantas que se van a considerar para el diseño del humedal construido serán:

1. Que estén presentes en la zona de interés (V Región).
2. De fácil cultivación y propagación.
3. Que sean perennes.
4. Profundidad de enraizamiento.

Una revisión de la literatura hizo una revisión de 643 sistemas en el mundo, dando cuenta que las 3 macrófitas más utilizadas que están presentes en humedales construidos son del género *Typha* (77%), *Scirpus* (37%) y *Phragmites* (36%) (Vymazal, 2013)

De las plantas que se utilizan frecuentemente en la construcción de humedales construidos hay 2 que están presentes en humedales naturales de la V región, *Typha Angustifolia* (Totora) presente en la laguna de Sausalito, Viña del Mar, el estero de Catapilco, comuna de Zapallar y en

el humedal de Mantagua, comuna de Quintero y *Scirpus* sp., presente en el estero de Catapilco (Silva Haun & Arancibia Fortes, 2015; Valencia Muñoz & Arancibia Fortes, 2015; Tapia Zurita, 2018). Entre estas especies de macrófitas la *Typha* puede vivir en un rango de temperatura mayor a la *Scirpus*, además de aguantar una mayor salinidad, lo que la hace un especie más atractiva por su mejor resistencia para usar en un humedal en la V región de Chile.

La tabla 12 muestra la penetración de raíces de 3 diferentes especies de macrófitas.

**Tabla 12**

*Profundidad de penetración de raíces en macrófitas, Crites et al., 2006*

Especie	Penetración de raíces [cm]
Scirpus	76
Phragmites	>60
Typha	30

#### 4.3.3 Microorganismos

Los microorganismos realizan el tratamiento biológico. En la zona superior del humedal, donde hay mayor cantidad de oxígeno por las raíces de las plantas y el oxígeno que llega por difusión atmosférica, crecen colonias de microorganismos aerobios, mientras que en las zonas de menor o sin oxígeno predominan los organismos anaerobios y anóxicos, llevando a cabo la degradación de la materia orgánica, la eliminación de nutrientes y la desinfección (Arias Triguero, 2004).

Las funciones de los humedales son principalmente reguladas por los microorganismos y su metabolismo. Los cuales incluyen bacterias, levaduras, hongos y protozoarios. La biomasa microbiana es quien consume gran parte del carbono orgánico y muchos nutrientes (Lara-Borrero, 1999).

#### **4.4 Generalidades de diseño de Humedales construidos**

Las características físicas del humedal a construir dependen de la localización de la planta, clima del lugar, de la calidad del afluente y sus variaciones y de la calidad del efluente deseada. Existen muchas metodologías para el cálculo del área superficial mínima en humedales subsuperficiales de flujo horizontal. El enfoque P-k-C\* es el más reciente para representar la degradación de contaminantes en los HC, está demostrado que el rendimiento del HC para tratamiento está bien representado por este enfoque (Dotro et al., 2021).

El método P-k-C\*, considera variables tanto hidráulicas como cinéticas, que integran no solo las variables hidrodinámicas, sino también el comportamiento de los microorganismos, las plantas y la adherencia al medio de soporte. El área de tratamiento calculada debe ajustarse a recomendaciones que incluyen relación largo-ancho, profundidad y pendiente. También el medio filtrante en humedales de flujo subsuperficial debe cumplir con características físicas como porosidad, granulometría, conductividad hidráulica y resistencia mecánica del material de relleno (Vidal & Hormazábal, 2018).

Para el caso de los humedales de flujo vertical, una alternativa para el diseño propuesta por Platzer (1999), se basa en calcular la demanda de oxígeno requerida para efectuar los procesos aerobios (oxidación de la DQO y nitrificación), el criterio de diseño consiste en que el aporte de oxígeno debe ser mayor que la demanda de oxígeno. Este modelo de diseño considera una eliminación promedio del 85% para la DQO. Este modelo de diseño se ha utilizado con frecuencia en América Latina, y a la fecha hay bastante experiencia (Platzer et al., 2016).

La tabla 13 muestra los parámetros típicos de diseño de HC para tratamiento de aguas residuales domésticas.

**Tabla 13**

*Parámetros típicos de diseño para HC para tratamiento de aguas residuales domésticas.*

*(Vidal & Hormazábal, 2018; Dotro et al., 2021). Nota: NA\*:no aplica. <sup>a</sup>:profundidad de la capa de grava.*

<b>Tipo de flujo</b>	<b>Superficial</b>	<b>Subsuperficial horizontal</b>	<b>Subsuperficial vertical</b>
Carga Orgánica Afluente	< 6 g DBO5/m <sup>2</sup> *d	< 6 g DBO5/m <sup>2</sup> *d	30 g DBO5/m <sup>2</sup> *d
Carga Hidráulica Superficial	< 5 cm/d	< 5 cm/d	> 5 cm/d
Tiempo de retención hidráulico	5-15 días	> 5 días	Minutos/horas
Área aproximada por PE	5 m <sup>2</sup> a 20 m <sup>2</sup> /PE	5 m <sup>2</sup> a 20 m <sup>2</sup> /PE	1 m <sup>2</sup> a 4 m <sup>2</sup> /PE
Relación Largo-Ancho	10:1	3:1	NA*
Profundidad	0,3-0,6 m	0,5-0,7 m <sup>a</sup>	>= 0,50 m
Pendiente del Fondo	1%	1%	NA*
Tipo de Relleno	NA*	Arenas y gravas	Arenas y gravas
Vegetación	Variable	Variable	Variable

#### **4.5 Consideraciones sobre aspectos constructivos, operación y mantenimiento.**

Los sistemas que se está proponiendo tienen en cuenta diferentes partidas necesarias para que todo el sistema funcione en conjunto, de las cuales se pueden identificar las siguientes partes:

- Canalización de aguas grises
- Pretratamiento
- Humedal construido
- Desinfección
- Estanque de acumulación
- Sistema de bombeo

De estas se explicará en más detalle las referentes a la construcción de los Humedales Construidos, ya que tienen algunas características que se deben cumplir para que el sistema funcione correctamente. Las consideraciones de construcción, operación y mantenimiento se realizan en base a lo indicado en Delgadillo et al., 2010, Dotro et al., 2021 y Vidal & Hormazábal, 2018.

#### **4.5.1 Construcción de Humedal Construido**

Las partidas que componen la construcción de un humedal construido de flujo subsuperficial, tanto horizontal como vertical, son las siguientes:

1. Reconocimiento del terreno.
2. Estudio de suelos.
3. Escarpe.
4. Replanteo.
5. Toma de energía eléctrica.
6. Excavación.
7. Cámaras de entrada y salida.
8. Construcción de cámara de bombeo e instalación de bombas.
9. Impermeabilización.
10. Sistema de drenaje o recolección.
11. Llenado de gravas y/o arenas.
12. Sistema de distribución.
13. Plantado

A continuación, se describe cada paso del proceso constructivo para los HC FH y FV.

1. Reconocimiento del terreno: previo al diseño se debe reconocer y evaluar el terreno. De esta forma se pueden saber las características del terreno para diseñar

en base a las condiciones reales del lugar. Aspectos como la pendiente, disponibilidad de terreno, accesibilidad, entre otros, son fundamentales para adecuar el diseño y garantizar una correcta implementación.

2. Estudio de suelos: es importante realizar el estudio de suelos, ya que la información obtenida afecta directamente al diseño. Algunos de los datos más importantes son el tipo de suelo, su capacidad de carga, el nivel de la napa freática, entre otros.
3. Escarpe: luego se continúa con un escarpe para limpiar el terreno, eliminando malezas, escombros, arbustos o todo lo que pueda interferir en el área de emplazamiento del humedal construido.
4. Replanteo: después del escarpe se puede replantear el proyecto en el terreno de las estructuras que componen el sistema.
5. Toma de energía eléctrica: según el diseño y los requerimientos de electricidad para el funcionamiento del sistema se deben hacer las instalaciones correspondientes para que el sistema tenga el acceso a la energía eléctrica requerida. En ambos sistemas es necesario tener acceso a la energía eléctrica en las bombas que se utilizan para el reuso de las aguas grises tratadas.
6. Excavación: posterior al replanteo, se procede con la excavación, aunque no siempre es necesario, en caso que se haya considerado la construcción a un nivel más elevado respecto al terreno. En este caso es necesario construir un terraplén para nivelar, además de las paredes del humedal. Estos trabajos pueden realizarse a mano o con maquinaria. Para el caso de estudio se considera excavación a mano.

Además en la excavación se debe considerar un borde libre, que corresponde a una profundidad extra, el cual tiene como función poder almacenar temporalmente eventos de alta precipitación.

7. Cámaras de entrada y salida: las cámaras pueden ser in situ o prefabricadas. Para el caso de estudio se consideran cámaras prefabricadas. En el caso del HC de flujo horizontal, la cámara de salida controla el nivel del agua dentro del humedal. Posteriormente esta cámara sirve para vaciar el humedal cuando necesite mantenimiento.
8. Construcción de cámaras de bombeo e instalación de bombas: Para ambos sistemas, se debe construir una cámara de bombeo, donde luego se instalen las bombas para el reúso de las aguas tratadas. En el caso del HC de flujo vertical además se deben instalar las bombas que realizan los pulsos durante el día.
9. Impermeabilización: para sistemas pequeños se recomienda realizar la impermeabilización mediante membrana de HDPE, para el caso de estudio se considera de 0,5mm. Previo a la instalación se debe nivelar el sello de la excavación, dando la pendiente correspondiente. La superficie debe estar compactada, libre de afloramientos rocosos, grietas, depresiones y cambios abruptos de pendiente, luego se instala el geotextil que protege la membrana de HDPE de posible punzonamiento. Luego se despliega la membrana de HDPE desde el nivel más bajo al más alto. Se debe colocar homogéneamente y sin arrugas, las juntas deben quedar termosoldadas. Para anclar el perímetro de la membrana se debe usar una zanja de anclaje perimetral y luego rellenar con el material de la excavación.

10. Sistema de drenaje o recolección: en ambos sistemas el drenaje se construye con tubería de PVC con perforaciones de acuerdo a la grava de la capa de drenaje. En el caso del HC de flujo horizontal, se usa PVC 110 mm perforado, con perforaciones equidistantes del orden de 12 mm ubicado en el extremo de la salida del humedal. Mientras que en el HC de flujo vertical se usa la misma tubería pero distribuida en todo el fondo del humedal.

Para los HC verticales y horizontales es necesario asegurar una buena nivelación del sistema de drenaje para evitar flujos preferenciales.

11. Llenado de gravas y/o arenas: previo al llenado de la excavación con el medio filtrante se recomienda colocar una capa de 5 a 10cm de arena o una capa de geotextil, para proteger la membrana de HDPE de posible punzonamiento. El material se debe colocar en capas, sin compactar, hasta llenar lo especificado según el diseño de HC de flujo horizontal o vertical. Una vez finalizado el llenado, se debe nivelar la superficie para evitar zonas de encharcamiento.

12. Sistemas de distribución: este sistema se compone de tuberías perforadas por las cuales se distribuye el agua a tratar. Es necesario asegurar una correcta nivelación del sistema con el fin de evitar una distribución no homogénea.

Para el caso de estudio, en el HC de flujo horizontal se considera PVC 110mm instalado en la zona de entrada, ya que se diseñará para que funcione por gravedad. Para el HC de flujo vertical se considera PPR 20mm distribuido en toda el área superficial del humedal, se considera este diámetro porque el agua será bombeada.

13. Plantado: una vez finalizado el llenado del lecho, se comienza con el proceso de plantado. Como se revisó en un punto anterior la planta considerada, para los HC

de flujo horizontal y vertical a diseñar, es la *Typha Angustifolia*, macrófita que está presente en humedales de la zona. Esta planta tiene una profundidad de implantación de 30-40 cm y su tasa de propagación es muy alta.

La densidad de plantas en humedales es de 3 a 4 plantas/m<sup>2</sup> (Vidal & Hormazábal, 2018).

En los HC de flujo horizontal, antes de iniciar el plantado el humedal se debe inundar para corregir los desniveles en la superficie, una vez realizado se disminuye el nivel del agua y se inicia el plantado.

Si bien el plantado se puede realizar en cualquier momento del año, es recomendable que sea durante la primavera. El riesgo de congelamiento es alto si se realiza en períodos de heladas. Las plantas crecen más rápido si son cultivadas en macetas. Al momento de trasplantarlas, se debe utilizar el sustrato en que ha crecido en la maceta. Las plantas siempre deben tener humedad suficiente.

En el caso del HC de flujo horizontal, después del plantado, el nivel de agua del humedal debe ser alto, por encima del nivel diseñado, hasta que las plantas se hayan adaptado bien. Las malezas que puedan aparecer se deben remover manualmente, y en caso de infestación se recomienda subir el nivel de agua dentro del lecho.

En el HC de flujo vertical, se debe eliminar malezas y evitar la infestación hasta que la vegetación se establezca y haya una cubierta madura de vegetación de humedales.

Otro punto que se puede considerar para mejorar la protección del humedal es la construcción de una cerca, que ayude a evitar el acceso de animales o niños al humedal.

#### **4.5.2 Operación y mantenimiento**

El mayor problema operativo en los humedales es la colmatación. Esto corresponde a la obstrucción de los poros del medio por acumulación de sólidos. Algunas de las causas principales son el mantenimiento inadecuado del pretratamiento o un mal dimensionamiento del humedal.

Se puede minimizar la colmatación y aumentar la vida útil con una correcta selección de medio filtrante y tasas de carga (hidráulica y orgánica), y asegurando que el humedal funcione dentro del rango de diseño previsto.

La operación y mantenimiento queda a cargo del propietario, quien se guiará con las guías de operación y mantenimiento que el constructor debe entregar. Algunas actividades que forman parte de la operación y mantenimiento son:

1. Vaciado y limpieza del pretratamiento.
2. Control del nivel del agua dependiendo de la estación (sólo en HCSSFH).
3. Control del estado de las plantas.
4. Inspección de partes mecánicas.
5. Lavado a presión de las tuberías de entrada y salida.
6. Reparar el humedal en caso de obstrucciones.
7. Cambio de pastillas de cloración y decloración.
8. Monitoreo.

A continuación se definen cada una de las actividades de la operación y mantenimiento:

1. Vaciado y limpieza del pretratamiento: el mantenimiento de la cámara desgrasadora o fosa séptica es fundamental por diferentes motivos. Entre estos, evitar que salgan grasas por la salida, garantizar un funcionamiento adecuado del sistema, prolongar su vida útil y evitar gastos en reparaciones.

Los pasos para realizar la mantención de este elemento son, cerrar la entrada de agua a la cámara, eliminar la capa de grasas que se forma en la superficie, extraer la capa de agua central, aspirar la capa de sólidos decantados al fondo, limpiar toda la cámara y llenar con agua limpia hasta que salga por la salida.

2. Control del nivel del agua: en el HCFSSH, para regular el nivel de agua en el humedal se ajusta la tubería en la arqueta de salida entre 50 y 100 mm por debajo de la superficie del lecho del humedal. En condiciones invernales para evitar el congelamiento se debe bajar un poco el nivel del agua. Para asegurar la salud de las plantas, una vez llega la primavera se debe volver al nivel de agua normal ya que no hay riesgo de congelamiento.
3. Control del estado de las plantas: el control de las plantas está compuesto de 3 etapas diferentes. El primer control se hace después de la primera estación de crecimiento, verificando que las plantas están vivas y revisando la densidad de plantas, la cual debe ser al menos de 2 plantas/m<sup>2</sup>, si hay lugares donde la densidad de plantas sea menor se debe replantar. El segundo control que se debe hacer es el control de malezas, retirando manualmente si aparecen y teniendo especial cuidado en no dañar el sistema radicular de las plantas. El tercer control que se debe efectuar es la cosecha, durante el otoño no se debe retirar el material vegetal muerto ya que este sirve de aislamiento térmico para el invierno. Si se va a retirar este material la estación es la primavera, la cosecha debe ser manualmente y depende de la planta a utilizar, se debe cuidar no dañar los brotes nuevos que están creciendo y no se deben cubrir de agua los tallos.
4. Inspección de partes mecánicas: los componentes mecánicos como bombas se deben revisar al menos una vez al año y según las indicaciones del proveedor.

5. Lavado a presión de las tuberías de entrada y salida: la mantención de las tuberías de inicio y fin del humedal debe ser mediante lavado a alta presión con el fin de eliminar el material que se pueda haber acumulado en las tuberías o para limpiar los orificios que se puedan haber tapado. La frecuencia de lavado puede ser de una vez al año.
6. Reparar el humedal en caso de obstrucciones: en caso de obstrucción del sistema se recomienda suspender la carga al humedal, acumulando las aguas residuales, el humedal se vacía completamente de aguas y el sistema no debe operar por un periodo de entre 3 a 4 semanas. Se recomienda que este proceso se realice en verano para tener mejores resultados. En caso que no funcione, se puede intentar de nuevo y si aún así no mejora, se debe retirar el material de relleno y reemplazarlo por otro nuevo de buena calidad.
7. Cambio de pastillas de cloración y decloración: se debe verificar el estado de las pastillas de cloración y decloración una vez a la semana de acuerdo al proveedor, las cuales se deberán cambiar en caso que sea necesario.
8. Monitoreo: el proyecto de reglamento para reutilización de aguas grises indica que los sistemas correspondientes a viviendas individuales no necesitan contar con registro y seguimiento de los resultados de los análisis de autocontrol de la calidad del efluente generado, pero en caso que se desee, la frecuencia de los monitoreos se determina dependiendo del caudal de descarga, para el caso de una vivienda se considera una muestra puntual de forma trimestral debido a que el caudal tratado es inferior a  $14 \text{ m}^3/\text{d}$ . El muestreo y análisis de las muestras se debe realizar de acuerdo a lo indicado en el proyecto de reglamento para reutilización de aguas grises.

En cuanto a las mediciones de cloro residual en viviendas que proyecten la reutilización de aguas grises, estas se deben realizar de forma semanal.

#### **4.6 Ecuaciones de diseño de humedal de flujo subsuperficial**

En el caso de los HFSSH, se llevará a cabo el diseño basándose en el modelo PKC\*.

Para los HFSSV, el cálculo se basará en el método de demanda de oxígeno.

##### **4.6.1 Diseño de Humedales de Flujo Subsuperficial Horizontal (HFSSH)**

El modelo de diseño más utilizado es conocido como modelo PKC\*, el cual se basa en la degradación de primer orden. En este modelo, la constante "P" representa las condiciones hidráulicas y la meteorización del contaminante a tratar, mientras que "K" corresponde a una constante de degradación cinética del contaminante que depende del tipo de humedal, las concentraciones iniciales del contaminante, las condiciones climáticas y la actividad biológica, entre otros factores (Vidal & Hormazábal, 2018).

Durante el diseño, otro factor importante a considerar es la producción de materia orgánica, nutrientes y microorganismos (concentración de fondo, C\*) por el propio sistema del humedal. Dado que el humedal es un ecosistema donde ocurren procesos biogeoquímicos, también actúa como generador de materia orgánica y nutrientes. Esto implica que el humedal no puede producir efluentes con concentraciones de "0 mg/L" de ciertos contaminantes en el efluente, debido a la presencia de estos procesos biológicos y químicos (Vidal & Hormazábal, 2018).

El área superficial de acuerdo al modelo PKC\* estaría dada por la ecuación:

$$A_S = \frac{P \cdot Q}{K_T} \cdot \left( \left( \frac{C_i - C^*}{C_o - C^*} \right)^{\frac{1}{P}} - 1 \right)$$

donde:

A<sub>S</sub>: área superficial [m<sup>2</sup>]

P: cantidad aparente de tanques en serie

Q: caudal [m<sup>3</sup>/d]

K<sub>T</sub>: constante de velocidad de reacción del sistema dependiente de la T° [m/d]

C<sub>i</sub>: concentración afluente [mg/l]

C<sub>o</sub>: concentración efluente [mg/l]

C\*: concentración de fondo [mg/l]

El valor de P para humedales de FH enfocado en el DBO<sub>5</sub> es de 3.

El cálculo de K<sub>T</sub> para la remoción de DBO<sub>5</sub> se hace por medio de la siguiente ecuación:

$$K_T = K_A \cdot \theta^{T-20}$$

donde:

K<sub>A</sub>: coeficiente de reacción superficial de primer orden [m/d]

T: temperatura [°C]

θ: factor de corrección de temperatura

La tabla 14 muestra los parámetros de diseño según el contaminante a remover.

#### **Tabla 14**

*Parámetros de diseño de humedales construidos de flujo subsuperficial. Elaborado con*

*datos de Asprilla et al., 2020 y Dotro et al., 2021.*

<b>Parámetro</b>	<b>K<sub>A</sub> [m/año]</b>	<b>θ</b>
DBO <sub>5</sub>	25	0.981
SST	43.3	1
Nitrógeno orgánico	35	1.05
Nitrógeno amoniacal	34	1.05
Nitrógeno NOx	41.8	1.05
Nitrógeno total	8.4	1.05
Fósforo total	9.1	1.09

La tabla 15 muestra los posibles valores de C\*. Dependiendo de la concentración inicial se puede estimar el valor de C\*.

**Tabla 15**

*Valores de C\* para Humedales. Kadlec & Wallace, 2008, citado en Dotro et al., 2021.*

Valores de C* para HC		
Tipo de efluente	Ci [mg/L]	C* [mg/L]
Primario	100 a 200 [mg/L]	10 [mg/L]
Secundario	30 a 100 [mg/L]	5 [mg/L]
Terciario	3 a 30 [mg/L]	1 [mg/L]

Para definir el ancho del humedal, se considera la relación Largo:Ancho deseada, la cantidad de lechos y el área superficial calculada anteriormente. Para definir el ancho W de cada lecho del humedal se realizará de la siguiente forma:

$$R = \frac{L}{W}$$

$$L = R \cdot W$$

donde:

R: relación largo:ancho (L:W) [m/m]

L: largo del lecho del humedal [m]

W: ancho del lecho del humedal [m]

Y además se sabe que:

$$\frac{As}{Ca} = L \cdot W$$

por lo que:

$$\frac{As}{Ca} = R \cdot W \cdot W$$

por lo tanto:

$$W = \sqrt{\left(\frac{As}{Ca \cdot R}\right)}$$

donde:

As: área superficial [m<sup>2</sup>]

Ca: cantidad de lechos [-]

R: relación largo:ancho [-]

#### 4.6.2 Diseño de Humedales de Flujo Subsuperficial Vertical (HFSSV)

El método de diseño que se utilizará en esta memoria para el HFSSV será el método de Demanda de Oxígeno (Platzer, 1999). Este método está desarrollado bajo la premisa de que el aporte de oxígeno (OI) debe ser mayor que la demanda de oxígeno (OD) (oxígeno requerido para realizar el tratamiento de las aguas). Por lo que:

$$OI - OD > 0$$

donde:

OI: aporte de oxígeno [g/d]

OD: demanda total de oxígeno [g/d]

Además:

$$OD = OD_{DQO} + OD_{nitrificación} + OD_{desnitrificación}$$

$$OI = OI_{difusión} + OI_{convección}$$

donde:

OD<sub>DQO</sub>: demanda de oxígeno por descomposición de la materia orgánica [g/d]

OD<sub>nitrificación</sub>: demanda de oxígeno por nitrificación [g/d]

OD<sub>desnitrificación</sub>: reducción de la demanda de oxígeno por desnitrificación parcial [g/d]

OI<sub>difusión</sub>: aporte de oxígeno por difusión [g/d]

OI<sub>convección</sub>: aporte de oxígeno por convección [g/d]

A continuación, se presentan las consideraciones para cada uno de los aportes y demandas de oxígeno:

Consideraciones para  $OD_{DQO}$ :

- Se necesitan 0,7 gO<sub>2</sub> para degradar 1 gDQO
- Se obtiene un eliminación promedio del 85%

Por lo que:

$$OD_{DQO} = 0,85 \cdot 0,7 \left[ \frac{gO_2}{gDQO} \right] \cdot DQO_i \left[ \frac{gDQO}{d} \right]$$

donde:

DQO<sub>i</sub>: DQO en el afluente [g/d]

Consideraciones para  $OD_{nitrificación}$ :

- Se necesitan 4,3 gO<sub>2</sub> para degradar 1 gNTK
- Se asume nitrificación completa

Por lo que:

$$OD_{nitrificación} = 4,3 \left[ \frac{gO_2}{gNTK} \right] \cdot NTK_i \left[ \frac{gNTK}{d} \right]$$

Consideraciones para  $OD_{desnitrificación}$ :

- Se recuperan 2,9 gO<sub>2</sub> por cada gNTK desnitrificado
- Se considera un 10% de desnitrificación

Por lo que:

$$OD_{desnitrificación} = 0,1 \cdot 2,9 \left[ \frac{gO_2}{gNTK} \right] \cdot NTK_i \left[ \frac{gNTK}{d} \right]$$

Consideraciones  $OI_{convección}$ :

- Supuesto que el aire tiene 0,3 gO<sub>2</sub>/L
- El aporte por convección es proporcional a la carga hidráulica

Por lo que:

$$OI_{convección} = 0,3 \left[ \frac{gO_2}{L} \right] \cdot Q \left[ \frac{L}{d} \right]$$

Consideraciones  $OI_{difusión}$ :

- Aporte de  $O_2$  por difusión es de 1  $gO_2/h$  por cada  $m^2$
- Tiempo entre cargas debe ser superior a 1.5h para que haya reoxigenación

Por lo que:

$$OI_{difusión} = 1 \left[ \frac{gO_2}{h \cdot m^2} \right] \cdot A_s [m^2] \cdot \left( \frac{24[h] - 1.5[h] \cdot n_{cargas}}{d} \right)$$

donde:

$n_{cargas}$ : Número de cargas diarias que se considerarán

Es en el aporte de  $O_2$  por difusión donde entra el área superficial en el diseño. Una vez con el área, el largo y ancho se definen, en este caso, con una relación largo:ancho de 1:1, aunque esta relación puede variar (Brix & Arias, 2005).

## 4.7 Verificaciones

Para asegurarse que los humedales diseñados puedan cumplir con su ciclo de vida y evitar una posible colmatación del sistema hay algunas verificaciones que se deben realizar y que se deben cumplir.

### 4.7.1 HSSFH

Las verificaciones en este tipo de humedales construidos son 3:

1. Carga Orgánica Transversal (COT): consiste en la carga orgánica diaria que atraviesa el humedal en su área transversal. Wallace (2014) recomienda una COT máxima de 100  $g/m^2.d$ .

$$COT = CO \left[ \frac{gDBO_5}{d} \right] \div A_t [m^2]$$

2. Carga Orgánica Superficial (COS): corresponde a la carga orgánica diaria que recibe el humedal dividido en su área superficial. El valor máximo recomendado en España es de 6 gDBO<sub>5</sub>/m<sup>2</sup>.d (Garcia y Corzo, 2008), mientras que en Estados Unidos se recomienda entre 4 y 8 gDBO<sub>5</sub>/m<sup>2</sup>.d (Wallace y Knight, 2006).

$$COS = CO\left[\frac{gDBO_5}{d}\right] \div A_s[m^2]$$

3. Carga Hidráulica (CH): es la carga de agua dividida en el área superficial en mm/d. Garcia y Corzo (2008) recomiendan una CH máxima de 20 mm/d.

$$CH = Q\left[\frac{m^3}{d}\right] \div A_s[m^2] \times \frac{1000[mm]}{1[m]}$$

#### 4.7.2 HSSFV

Las verificaciones que se deben realizar en los HSSFV son 2:

1. Carga Orgánica Superficial (COS): en este tipo de humedales sigue siendo el mismo concepto, pero varía la COS máxima. El valor máximo recomendado en Alemania (DWA, 2017) y Austria (ÖNORM B 2505, 2009) es de 20 gDQO/m<sup>2</sup>.d, mientras que en Dinamarca (Brix y Arias, 2005) se recomienda un máximo de 27 gDBO<sub>5</sub>/m<sup>2</sup>.d (Dotro et al., 2021)

$$COS = CO\left[\frac{gDBO_5}{d}\right] \div A_s[m^2]$$

2. Carga Hidráulica (CH): si bien la CH máxima recomendada es de 80 mm/d según la DWA, 2017 (Dotro et al., 2021) es posible encontrar en la literatura Cargas Hidráulicas mayores sin afectar la eficiencia de remoción de contaminantes. En una planta piloto en Lima, Perú, se evaluaron 4 cargas hidráulicas 400 mm/d, 600 mm/d, 800 mm/d y 1.200 mm/d, y si bien la menor carga hidráulica fue la que tuvo mejor eficiencia de remoción de DBO<sub>5</sub> con 95,26% a 97,35%, todas tuvieron

una eficiencia de remoción mayor a 85% de reducción de DBO<sub>5</sub> con un mínimo de 89,43% (Larico Larico, 2021). En Talca e Iquique se ha usado una CH de 120mm/d (Vera-Puerto et al., 2021).

$$CH = Q\left[\frac{m^3}{d}\right] \div A_s[m^2] \times \frac{1000[mm]}{1[m]}$$

## 5. Estimación de condiciones iniciales

### 5.1 Estimación de la caracterización de las aguas grises en Chile

La tabla 16, muestra los resultados de la estimación de la caracterización de las aguas grises en Chile, según fuente de origen basándose en las caracterizaciones realizadas en Grecia e India.

**Tabla 16**

*Estimación de concentraciones de contaminantes según proporciones en Grecia e India. Concentraciones basadas en estudios de caracterización según fuente de origen (Noutsopoulos et al., 2017; Edwin et al., 2013) y volúmenes por fuente de origen según Franco, 2007.*

Estimación por Origen en Chile	Ducha		Lavamanos		Cocina		Lavadora	
	Grecia	India	Grecia	India	Grecia	India	Grecia	India
SST [mg/l]	51,6	75,2	63,6	54,7	224	244,4	118,7	86,6
DBO5 [mg/l]	109,4	162,4	126,9	166,8	345,7	1121,5	567	224,3
DQO [mg/l]	222,5	253,1	243,6	240,8	638,3	794,1	1181,9	1093,2
Fósforo (P) [mg/l]	0,5	0,4	6,2	0,4	12,9	17,4	5,7	6,9
Nitrógeno Kjeldahl [mg/l]	5,2	5	4,6	4,8	11,1	12,2	11,1	10,9

De la tabla 16 se puede observar que respecto a los SST los mayores aportantes de estos son, primero la Cocina con valores sobre los 200 [mg/l], luego la lavadora con valores entre 80 y 120 [mg/l] y luego la ducha y el lavamanos juntos con valores entre 50 y 75 [mg/l]. En el DBO<sub>5</sub>

se observa que siguiendo las proporciones de contaminantes de Grecia el mayor aportante es la lavadora por sobre la cocina, con 566 [mg/l] contra 345 [mg/l] respectivamente, mientras que siguiendo las de India el mayor aportante es la cocina con 1120 [mg/l], muy superior a la lavadora, lavamanos y ducha, con 224 [mg/l], 166 [mg/l], y 162 [mg/l]. El resto de contaminantes no son mencionados en los límites máximos del proyecto de Reglamento de reutilización de aguas grises, por lo que solo se menciona que los mayores aportantes en DQO, Fósforo y Nitrógeno Kjeldahl son la Cocina y la Lavadora.

Respecto a la turbiedad, en Chile solo se realizó la caracterización para las aguas de duchas la cual tuvo un promedio de 96,45 [UNT], valor que es un buen indicador ya que estas junto con las aguas de la lavadora son las principales fuentes de turbiedad, por lo que se utilizará este valor para el afluente a tratar. En cuanto a los Coliformes fecales se utilizará el valor de  $7,25 \times 10^3$ , promedio entre los valores medidos en las aguas grises de Calama y Vallenar.

A continuación, se presenta en la tabla 17 las concentraciones de los contaminantes al considerar la mezcla de aguas grises con 3 opciones diferentes, A (Ducha, lavamanos, cocina y lavadora), B (Ducha, lavamanos y lavadora) y C (Ducha y lavamanos).

**Tabla 17**

*Estimaciones de concentración de mezcla en Chile en 3 formas distintas. Proporción de contaminantes según origen basado en estudios en Grecia por Noutsopoulos et al., 2017 y en India por Edwin et al., 2013. D: Ducha; LM: Lavamanos; C: Cocina; LV: Lavadora.*

Estimación Chile	Mezclados A (D+LM+C+LV)	Mezclados B (D+LM+LV)		Mezclados C (D+LM)	
		Proporción Grecia	Proporción India	Proporción Grecia	Proporción India
SST [mg/l]	95	79	76	55	70
DBO <sub>5</sub> [mg/l]	289	282	186	114	164
DQO [mg/l]	588	582	563	228	250
Fósforo (P) [mg/l]	4,4	3,4	2,8	2	0,4
Nitrógeno Kjeldahl [mg/l]	7,7	7,3	7,2	5,1	5

De la tabla 17 se observa que al descontar las aguas de la Cocina los SST disminuyen a valores entre 75 y 80 [mg/l] y al eliminar también las aguas de la lavadora el valor de los SST disminuye al rango de 55 y 70 [mg/l]. En el caso de la DBO<sub>5</sub> al eliminar las aguas del lavaplatos queda en el rango de 186 a 282 [mg/l], mientras que al eliminar también las aguas de la lavadora el rango de la DBO<sub>5</sub> baja al rango de 114 a 163 [mg/l].

El proyecto de Reglamento para la reutilización de aguas grises indica que se deben controlar 5 parámetros, DBO<sub>5</sub>, SST, CF, Turbiedad y cloro residual. De estos las CF y el cloro residual se controlarán mediante la cloración y dechloración, proceso posterior al tratamiento secundario.

En la tabla 18 se muestran los parámetros iniciales definitivos que se utilizarán para el diseño de los sistemas de tratamiento, considerando la estimación basada en Grecia, debido a la similitud climática, considerando sólo las opciones B y C, ya que las aguas de la cocina quedan

excluidas por el proyecto de reglamento de reutilización de aguas grises. Además, en la tercera columna se muestran los rangos en los parámetros según España, estos datos no fueron considerados en la estimación debido a que muestran un rango muy amplio y no promedios. Por lo que solo se consideran para evaluar si la estimación para Chile es apropiada.

**Tabla 18**

*Parámetros físicos, químicos y microbiológicos iniciales del afluente a tratar. Se consideran sólo las estimaciones basadas en Grecia, debido a la similitud climática con Valparaíso, Chile.*

Parámetros	Valor estimado en Chile caso B (D+LM+LV)	Valor estimado en Chile caso C (D+LM)	Valor orientativo España
SST [mg/l]	79	55	45-330
Turbiedad [UNT]	97	97	22-200
DBO5 [mg/l]	282	114	90-290
Coliformes Fecales [UFC/100ml]	$7 \times 10^3$	$7 \times 10^3$	$10^1$ - $10^6$
DQO [mg/l]	582	228	180-580
Fósforo (P) [mg/l]	4	2	-
Nitrógeno Kjeldahl [mg/l]	7,3	5	2,1-31,5

## 5.2 Estimación del caudal a considerar

La tabla 19 muestra los caudales a considerar para cada artefacto de acuerdo al punto 3.2:

**Tabla 19**

Descripción	Porcentaje del volumen	Q [l/día]	Tipo de aguas
Retención	20%	158,5	Consumo
Inodoro	27%	215,56	Negras
Ducha	22%	171,18	Grisas
Lavaplatos	8%	63,4	Grisas
Lavadora	18%	139,48	Grisas
Lavamanos	6%	44,38	Grisas
Aguas grises total	53%	418,44	Grisas
Aguas residuales	80%	634	Aguas residuales
Consumo total	100%	792,5	Dotación

*Estimación de caudales por artefacto en vivienda de 5 personas (158,5 l/hab/d) en la región de Valparaíso. Elaboración propia con datos de ESVAL S.A. y porcentajes por artefacto según Franco, 2007.*

Con los caudales calculados se llega a los caudales de AG a considerar para el diseño:

Caso B (ducha + lavamanos + lavadora):

$$171,18 \text{ [l/día]} + 44,38 \text{ [l/día]} + 139,48 \text{ [l/día]} = 355,04 \text{ [l/día]} = 0,36 \text{ [m}^3\text{/día]}$$

Caso C (ducha + lavamanos):

$$171,18 \text{ [l/día]} + 44,38 \text{ [l/día]} = 215,56 \text{ [l/día]} = 0,22 \text{ [m}^3\text{/día]}$$

## 5.2 Resumen de las condiciones iniciales

Con los datos calculados anteriormente se puede estimar la caracterización del afluente en los casos B y C. Estas estimaciones se entregan en la tabla 20, la cual resume las condiciones iniciales del afluente.

**Tabla 20**

*Resumen de condiciones iniciales del afluente. Elaboración propia con datos calculados en puntos 5.1 y 5.2 de esta memoria.*

Parámetros	Caso B	Caso C
Caudal AG [m <sup>3</sup> /día]	0,36	0,22
Temperatura [°C]	11	11
SST [mg/l]	78	55
Turbiedad [UNT]	96	96
DBO5 [mg/l]	282	114
DQO [mg/l]	582	228
Fósforo [mg/l]	3,4	2
Nitrógeno Kjeldahl [mg/l]	7,3	5,1
Coliformes Fecales [UFC/100ml]	7,3x10 <sup>3</sup>	7,3x10 <sup>3</sup>

Las aguas grises a tratar, como se explicó anteriormente en el punto 3.4.1 reciben un pretratamiento que disminuye la contaminación en algunos parámetros. La tabla 21 presenta la estimación de los parámetros del afluente del pretratamiento.

**Tabla 21**

*Concentraciones de contaminantes en el efluente del pretratamiento.*

Parámetros	Caso B	Caso C
Caudal [m3/día]	0,36	0.22
SST [mg/l]	78	41
Turbiedad [UNT]	96	96
DBO5 [mg/l]	212	86
Coliformes Fecales [UFC/100ml]	7,25x10 <sup>3</sup>	7,25x10 <sup>3</sup>

## 6. Diseño de Humedales Construidos

La metodología de diseño utilizada fue la mencionada en los puntos anteriores. A continuación, se presentan los resultados obtenidos del dimensionamiento en base a los afluentes caracterizados en el punto 4 de esta memoria. En total se dimensionan 3 opciones, HSSFH para afluentes de ducha y lavamanos, HSSFV para los mismos afluentes y por último, un sistema de tratamiento combinado que tiene una primera etapa de un HSSFH y luego un HSSFV para tratar los afluentes provenientes de la ducha, el lavamanos y la lavadora.

### 6.1 Caso 1: HSSFH

Caso C (LM+D)	un	cant
<b>Caracterización</b>		
Artefactos	un	2
Caudal (Q)	m3/d	0,22
Temperatura mínima	°C	11
SST	mg/l	58
Turbiedad	UNT	96
DBO5 (Ci)	mg/l	86
Coliformes Fecales (CF)	UFC/100ml	7,25x10 <sup>3</sup>
<b>Determinación del medio poroso</b>		
Medio poroso	Tipo	Grava 10mm

Porosidad (n)	%	0,38
Conductividad hidráulica (ks)	m/d	1000
Altura (h)	m	0,4
<b>Diseño biológico</b>		
DBO5 afluente (Co)	mg/l	10
Cantidad aparente de tanques en serie (P)	-	3
Coefficiente superficial de primer orden modificado (KA)	m/d	0,07
Factor de corrección de temperatura para DBO5 ( $\theta$ )	-	0,98
Coefficiente superficial de primer orden modificado (Kt)	m/d	0,08
Concentración de fondo (C*)	mg/l	5
Área Superficial (As)	m <sup>2</sup>	12,3
<b>Dimensionamiento</b>		
Altura de agua (hw)	m	0,3
Relación L/A deseada	m/m	3:1
Cantidad de lechos	un	2
Ancho humedal (W)	m	1,4
Pendiente (S)	%	1%
Área Transversal (At)	m <sup>2</sup>	0,4
Largo humedal (L)	m	4,3
<b>Verificaciones</b>		
Carga Orgánica (CO)	gDBO5/d	18,8
Carga Orgánica Transversal (COT)	gDBO5/m <sup>2</sup> /d	43,6
Carga Orgánica Superficial (COS)	gDBO5/m <sup>2</sup> /d	1,5
Carga Hidráulica (CH)	mm/d	17,8
<b>Resumen dimensionamiento</b>		
Altura (h)	m	0,4
Altura de agua (hw)	m	0,3
Cantidad de lechos	un	2
L	m	4,3
W	m	1,4
Área Superficial (As)	m <sup>2</sup>	12,4
Plantas por lecho	un	25
Borde libre	m	0,1

## 6.2 Caso 2: HSSFV

<b>Caso C (LM+D)</b>	un	cant
<b>Caracterización</b>		
Artefactos	un	2
Caudal (Q)	m <sup>3</sup> /d	0,22
Temperatura mínima	°C	11
SST	mg/l	41
Turbiedad	UNT	96
DBO5 (Ci)	mg/l	86
DQO	mg/l	228
Nitrógeno Kjeldahl (NTK)	mg/l	5
Fósforo (P)	mg/l	2,01
Coliformes Fecales (CF)	UFC/100ml	7,25x10 <sup>3</sup>
<b>Determinación del medio poroso</b>		
Medio poroso	Tipo	Arena 2mm
Porosidad (n)	%	0,39
Conductividad hidráulica (ks)	m/d	480
Altura (h)	m	0,5
<b>Diseño biológico</b>		
% de remoción DBO;DQO	%	85%
DBO5 afluente (Co)	mg/l	12,8
Carga Másica DQO	g/d	50,2
Carga Másica NTK	g/d	1,1
Número de cargas diarias	-	12
Demanda de oxígeno por DQO (OD,DQO)	g/d	29,9
Demanda de oxígeno por nitrificación (OD,nitrificación)	g/d	4,8
Demanda de oxígeno por desnitrificación (OD,nitrificación)	g/d	0,3
Demanda total de oxígeno (OD)	g/d	34,3
Aporte de oxígeno por convección (OI,convección)	g/d	66
Aporte de oxígeno requerido por difusión (OI,difusión)	g/d	-31,7
Área superficial mínima requerida por OI (As)	m <sup>2</sup>	0
<b>Verificaciones</b>		
Carga hidráulica máxima	m/d	0,12
Área mínima según CH	m <sup>2</sup>	1,8

Carga orgánica superficial (COS) máxima	gDQO/(m <sup>2</sup> *d)	27,0
Área mínima según COS	m <sup>2</sup>	1,9
Área a considerar	m <sup>2</sup>	1,9
<b>Resumen dimensionamiento</b>		
Altura (h)	m	0,5
Área Superficial (As)	m <sup>2</sup>	1,9
L=W	m	1,4
Plantas por lecho	un	8
Borde libre	m	0,1

nota: <sup>a</sup>área mínima necesaria para aportar oxígeno por difusión es 0 ya que el oxígeno por convección ya es suficiente para suplir la demanda de oxígeno.

### 6.3 Caso 3: HSSFH + HSSFV

<b>Consideraciones de diseño</b>		
Co HSSFV	mgDBO <sub>5</sub> /l	10
Ci HSSFV = Co HSSFH	mgDBO <sub>5</sub> /l	66,7
<b>Caso B (LM+D+LV)</b>	un	cant
<b>Diseño HSSFH</b>		
<b>Caracterización</b>		
Artefactos	un	3
Caudal (Q)	m <sup>3</sup> /d	0,36
Temperatura mínima (T°)	°C	11
SST	mg/l	77
Turbiedad	UNT	96
DBO <sub>5</sub> (Ci)	mg/l	212
Coliformes Fecales (CF)	UFC/100ml	7,25x10 <sup>3</sup>
<b>Determinación del medio poroso</b>		
Medio poroso	Tipo	Grava 10mm
Porosidad (n)	%	0,38
Conductividad hidráulica (ks)	m/d	1000
Altura (h)	m	0,5
<b>Diseño biológico</b>		
DBO <sub>5</sub> afluente (Co)	mg/l	66,7
Cantidad aparente de tanques en serie (P)	-	3

Coeficiente superficial de primer orden modificado (KA)	m/d	0,07
Factor de corrección de temperatura para DBO5 ( $\theta$ )	-	0,98
Coeficiente superficial de primer orden modificado (Kt)	1/d	0,08
Concentración de fondo (C*)	mg/l	10
Área Superficial (As)	m <sup>2</sup>	6,9
<b>Dimensionamiento</b>		
Altura de agua (hw)	m	0,4
Relación L/A deseada	-	2
Cantidad de lechos	un	1
Ancho humedal (W)	m	1,9
Pendiente (S)	%	1%
Área Transversal (At)	m <sup>2</sup>	0,7
Largo humedal (L)	m	3,7
<b>Verificaciones</b>		
Carga Orgánica (CO)	gDBO5/d	76,1
Carga Orgánica Transversal (COT)	gDBO5/m <sup>2</sup> /d	101,8
Carga Orgánica Superficial (COS)	gDBO5/m <sup>2</sup> /d	11,0
Área mínima según COS	m <sup>2</sup>	12,7
Carga Hidráulica (CH)	mm/d	51,9
Área mínima según CH	m <sup>2</sup>	9,0
Área a considerar	m <sup>2</sup>	12,7
<b>Resumen dimensionamiento</b>		
Altura (h)	m	0,5
Altura de agua (hw)	m	0,4
Cantidad de lechos	un	1
W	m	2,5
L	m	5
Área Superficial (As)	m <sup>2</sup>	12,7
Plantas por lecho	un	51
Borde libre	m	0,1
<b>Diseño HSSFV</b>		
<b>Caracterización</b>		
Caudal (Q)	m <sup>3</sup> /d	0,36

Temperatura mínima	°C	11
DBO5 (Ci)	mg/l	67
DQO	mg/l	133
Nitrógeno Kjeldahl (NTK)	mg/l	5,08
Fósforo (P)	mg/l	2,01
Coliformes Fecales (CF)	UFC/100ml	$7,25 \times 10^3$
<b>Determinación del medio poroso</b>		
Medio poroso	Tipo	Arena 2mm
Porosidad (n)	%	0,39
Conductividad hidráulica (ks)	m/d	480
Altura (h)	m	0,5
<b>Diseño biológico</b>		
% de remoción DBO;DQO	%	0,9
DBO5 afluente (Co)	mg/l	10
Carga Másica DQO	g/d	48,0
Carga Másica NTK	g/d	1,8
Número de cargas diarias		12,0
Demanda de oxígeno por DQO (OD,DQO)	g/d	28,6
Demanda de oxígeno por nitrificación (OD,nitrificación)	g/d	7,9
Demanda de oxígeno por desnitrificación (OD,nitrificación)	g/d	0,5
Demanda total de oxígeno (OD)	g/d	35,9
Aporte de oxígeno por convección (OI,convección)	g/d	108
Aporte de oxígeno por difusión (OI,difusión)	g/d	-72,1
Área Superficial mínima requerida por OI (As)	m <sup>2</sup>	0 <sup>a</sup>
<b>Verificaciones</b>		
Carga hidráulica máxima	m/d	0,12
Área mínima según CH	m <sup>2</sup>	3,0
Carga orgánica superficial (COS) máxima	gDQO/(m <sup>2</sup> *d)	27
Área mínima según COS	m <sup>2</sup>	1,8
Área a considerar	m <sup>2</sup>	3,0
<b>Resumen dimensionamiento</b>		
Altura (h)	m	0,5
L	m	1,7

W	m	1,7
Cantidad de lechos	un	1
Área Superficial (As)	m <sup>2</sup>	3
Plantas por lecho	un	13
Borde libre	m	0,1

nota: <sup>a</sup>área mínima necesaria para aportar oxígeno por difusión es 0 ya que el oxígeno por convección ya es suficiente para suplir la demanda de oxígeno.

## 7. Costos de construcción y mantenimiento de los Humedales Construidos

Los costos considerados en la inversión inicial incluyen las siguientes partes:

- Obras previas: que incluye los movimientos de tierra, el trazado, preparación para el resto de las partidas y el retiro de excedentes.
- Sistema de recolección de aguas: se refiere a todas las obras de gasfitería que incluyen las canalizaciones desde las fuentes de aguas grises (lavamanos, ducha y lavadora) hasta la primera cámara de inspección antes de la fosa séptica.
- Pretratamiento: corresponde a la instalación de la fosa séptica.
- Humedal Construido: corresponden a las partidas relacionadas a las canalizaciones, incluyendo tuberías perforadas, hasta el humedal, la cámara de distribución, la impermeabilización, el sistema de recogida, la colocación del medio granular, la cámara de control de nivel de agua y la plantación de las plantas. En el caso del HFSSV este requiere una bomba de aguas residuales y un controlador de pulsos de agua.
- Desinfección: corresponde a la instalación de las cámaras de cloración y decloración y sus canalizaciones hasta el estanque de acumulación.
- Sistema de acumulación de agua y bombeo: se refiere a la instalación del estanque de acumulación, la bomba de distribución y la instalación del control de presión.

Además, en esta parte se considera un rebalse en el estanque de acumulación hacia un dren de 1 metro, de forma de evitar que, en caso que se generen muchas aguas grises y no se utilicen, el sistema se inunde.

- Sistema de distribución: se refiere a las partidas relacionadas a las tuberías para la reutilización de aguas grises en los artefactos sanitarios.
- Gastos de operación y mantenimiento: corresponde a las tareas periódicas que se deben realizar para que el sistema pueda funcionar bien y sin problemas. Debido a la naturaleza de este tipo de tratamientos, los costos de operación y mantenimiento son bastante bajos. Se considera un 2% de costo de mantenimiento para las bombas (UpKeep, 2023), ya que su uso no será continuo y además será muy inferior a las condiciones límite de las bombas consideradas.

Los costos considerados en cada tipo de sistema se presentan resumidos en las siguientes tablas:

**Tabla 22**

*Presupuesto Caso 1: HSSFH*

HSSFH	
Costos iniciales	CLP
Obras Previas	647.991
Recolección	101.824
Pretratamiento	171.494
Humedal Construido FH	814.840
Desinfección	192.837
Acumulación y bombeo	322.815
Red de distribución	20.394
Costo Directo	2.272.195
Gastos Generales	681.659
Utilidad contratista	227.220
Total Neto	3.181.073
IVA (19%)	604.404
<b>Total</b>	<b>3.785.477</b>

HSSFH	
Costos de operación y mantenimiento	CLP/a
Tabletas cloradoras anuales	7.795
Tabletas decloradoras anuales	7.795
Consumo eléctrico anual	3.2925
Mantenimiento bomba	942
<b>Total</b>	<b>19.822</b>

**Tabla 23**

*Presupuesto Caso 2: HSSFV*

HSSFV	
Costos iniciales	CLP
Obras Previas	299.241
Recolección	101.824
Pretratamiento	169.511
Humedal Construido FV	396.479
Desinfección	172.723
Acumulación y bombeo	289.065
Red de distribución	1.885
Costo Directo	1.430.728
Gastos Generales (30%)	429.218
Utilidad contratista	143.073
Total Neto	2.003.019
IVA (19%)	380.574
<b>Total</b>	<b>2.383.593</b>

HSSFV	
Costos de operación y mantenimiento	CLP/a
Tabletas cloradoras anuales	7.795
Tabletas decloradoras anuales	7.795
Consumo eléctrico anual	4.247
Mantenimiento bomba	1.782
<b>Total</b>	<b>21.617</b>

**Tabla 24***Presupuesto Caso 2: HSSFH + HSSFV*

HSSFH + HSSFV	
Costos iniciales	CLP
Obras Previas	690.085
Recolección	139.538
Pretratamiento	171.494
Humedales Construidos	1.392.465
Desinfección	170.237
Acumulación y bombeo	357.828
Red de distribución	21.787
Costo Directo	2.943.434
Gastos Generales (30%)	883.030
Utilidad contratista	294.343
Total Neto	4.120.808
IVA	782.953
<b>Total</b>	<b>4.903.761</b>

HSSFH + HSSFV	
Costos de operación y mantenimiento	CLP/a
Tabletas cloradoras anuales	12.839
Tabletas decloradoras anuales	12.839
Consumo eléctrico anual	6.995
Mantenimiento bomba	1.782
<b>Total</b>	<b>34.452</b>

Para más detalle de los costos ver Anexo B: Presupuestos detallados.

Se asumió que el costo de construcción no varía independiente de la ciudad de la quinta región donde se planea llevar a cabo el proyecto. Esto provoca que uno de los factores determinantes para la rentabilidad del proyecto sea el grupo tarifario al que pertenezca la ciudad donde se planea invertir. Esto se debe a que un mayor costo por metro cúbico de agua en la

ciudad, se traduce en un mayor ahorro económico. Concretamente, las ciudades del grupo tarifario 6 presentan la mejor rentabilidad en este aspecto.

El análisis de costos inicial indica que la inversión más baja se encuentra en el Humedal Construido con Flujo Subsuperficial Vertical (HCFSSV). Esto se debe principalmente a su menor requerimiento de superficie, lo que resulta en una reducción significativa de los costos asociados con la impermeabilización y el material granular. En comparación, el HCFSSH es un 58,8% más costoso que el HCFSSV, mientras que el HC mixto es un 105,7% más costoso. Sin embargo, es importante destacar que el HC mixto ofrece la ventaja de poder tratar un caudal de aguas grises un 63% mayor y brinda la posibilidad de usarlo para riego y la recarga de artefactos sanitarios.

## 8. Resultados Económicos

A continuación, se muestran dos tablas que muestran los VAN correspondientes a los tres distintos tipos de humedales diseñados, en los seis tramos diversos que han sido considerados. La primera tabla no incluye financiamiento, mientras que la segunda sí lo incluye.

**Tabla 25**

*VAN de los diferentes tipos de HC diseñados sin considerar financiamiento.*

Sin Financiamiento						
VAN	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5	Grupo 6
HSSFH	\$-1,672,356.10	\$-1,857,906.17	\$-1,465,590.35	\$-1,449,379.77	\$-1,799,314.03	\$-422,971.51
HSSFV	\$-270,472.08	\$-456,022.15	\$-63,706.32	\$-47,495.75	\$-397,430.01	\$978,912.52
HSSFH + HSSFV	\$-1,227,371.53	\$-1,532,983.41	\$-886,816.16	\$-860,116.39	\$-1,436,478.71	\$830,438.40

*Nota.* Elaboración propia.

**Tabla 26**

*VAN de los diferentes tipos de HC diseñados considerando financiamiento.*

Con Financiamiento						
VAN	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5	Grupo 6
HSSFH	\$-1,826,819.00	\$-2,012,369.00	\$-1,620,052.87	\$-1,603,842.29	\$-1,953,776.56	\$-577,434.03
HSSFV	\$-367,732.15	\$-553,282.23	\$-160,966.40	\$-144,755.82	\$-494,690.09	\$881,652.44
HSSFH + HSSFV	\$-1,427,464.49	\$-1,733,076.38	\$-1,086,909.13	\$-1,060,209.36	\$-1,636,571.68	\$630,345.43

*Nota.* Elaboración propia.

De las tablas 25 y 26 se puede ver que en el caso del HSSFH, para el caudal de diseño considerado, no es viable económicamente en ninguna de las localidades incluidas en los grupos estudiados.

En el caso del HSSFV, este es viable en las localidades del grupo tarifario 6, con o sin financiamiento, al igual que el HC mixto. La diferencia del HSSFV con el HC mixto es que no llega al límite máximo de DBO<sub>5</sub> requerido para reuso en artefactos sanitarios, por lo que sólo puede ser reutilizado para riego. Por lo tanto, no disminuiría la cuenta de agua a fin de mes por concepto de ahorro en artefactos sanitarios, pero sí habría un beneficio en m<sup>3</sup> de agua, que pueden ser reutilizados para riego.

Una ventaja del HC mixto (HSSFH + HSSFV) sobre el HSSFV, es que puede tratar un caudal un 63% mayor, pero también teniendo una inversión inicial más alta.

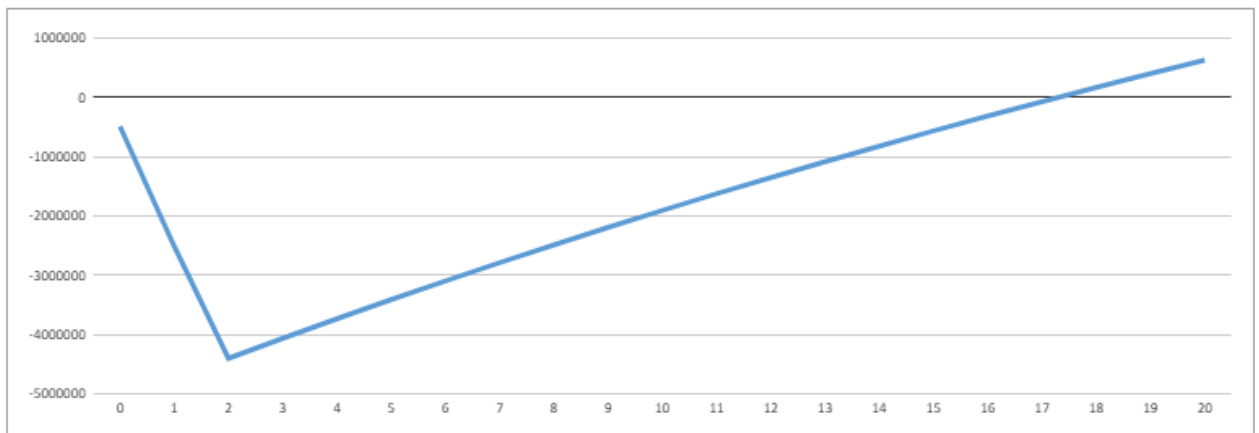
Este sistema es el que trata la mayor cantidad de m<sup>3</sup> de aguas grises, debido a que incluye además del lavamanos y ducha, las aguas de la lavadora, lo que permite una disminución de la cuenta de agua por concepto de ahorro en artefactos sanitarios y queda un restante no menor, que se puede utilizar para riego de jardines.

A continuación, se presenta el resumen del modelo económico considerado para el HC mixto y el HSSFV, con y sin financiamiento, en las Tablas 27, 28, 29 y 30, y en las Figuras 12, 13 14 y 15:

**Tabla 27**

*Resumen del modelo económico del HSSFH + HSSFV con financiamiento.*

Tipo de Humedal	HSSFH + HSSFV
Ubicación	Tramo 6
Valor por m3 del Tramo	\$2.944
Monto de Inversión Inicial	\$4.903.761
Financiamiento	Si
Monto de crédito verde	\$4.413.385
Interés anual	9,22%
Periodo en años	2
Cuota anual	\$2.516.361
TIR	7,5%
VAN	\$630.345
PRI	17,11

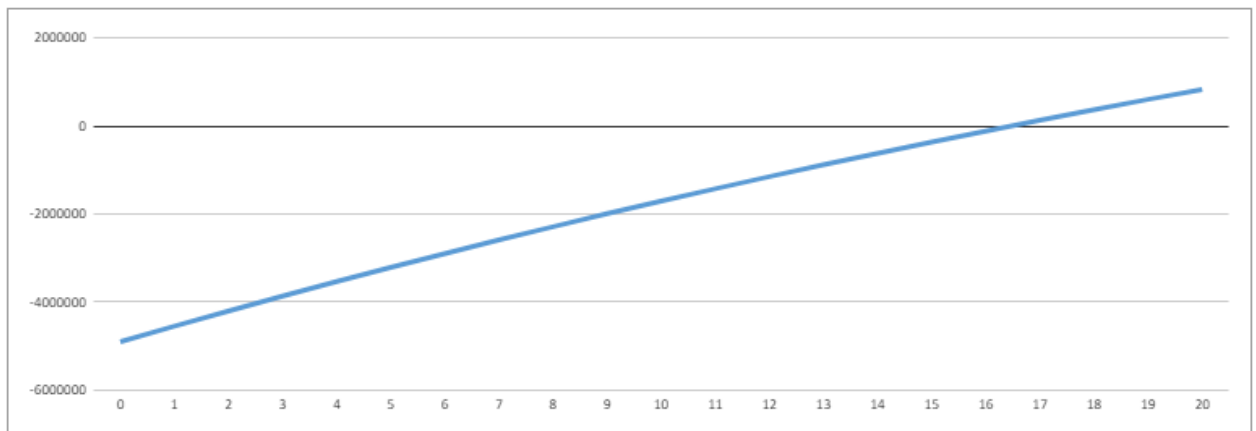


**Figura 12.** *VAN Acumulado del modelo económico del HSSFH + HSSFV con financiamiento.*

**Tabla 28**

*Resumen del modelo económico del HSSFH + HSSFV sin financiamiento.*

Tipo de Humedal	HSSFH + HSSFV
Ubicación	Tramo 6
Valor por m3 del Tramo	\$2.944
Monto de Inversión Inicial	\$4.903.761
Financiamiento	No
Monto de crédito verde	\$0
Interés anual	-
Periodo en años	-
Cuota anual	\$0
TIR	7,8%
VAN	\$830.438
PRI	16,02

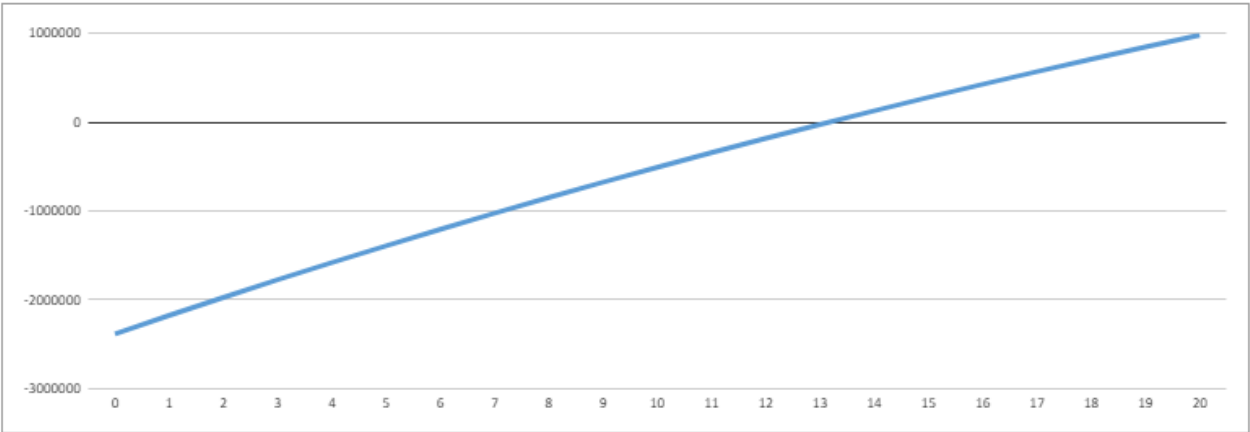


**Figura 13.** *VAN Acumulado del modelo económico del HSSFH + HSSFV sin financiamiento.*

**Tabla 29**

*Resumen del modelo económico del HSSFV sin financiamiento.*

Tipo de Humedal	HSSFV
Ubicación	Tramo 6
Valor por m3 del Tramo	\$2.944
Monto de Inversión Inicial	\$2.383.593
Financiamiento	No
Monto de crédito verde	\$0
Interés anual	-
Periodo en años	-
Cuota anual	\$0
TIR	10.1%
VAN	\$978.913
PRI	13,01

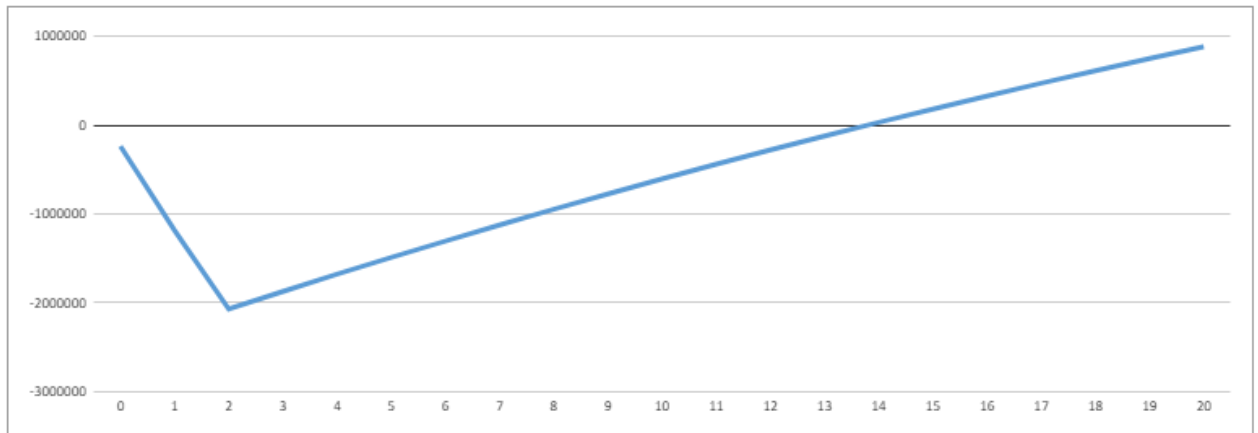


**Figura 14.** *VAN Acumulado del modelo económico del HSSFV sin financiamiento.*

**Tabla 30**

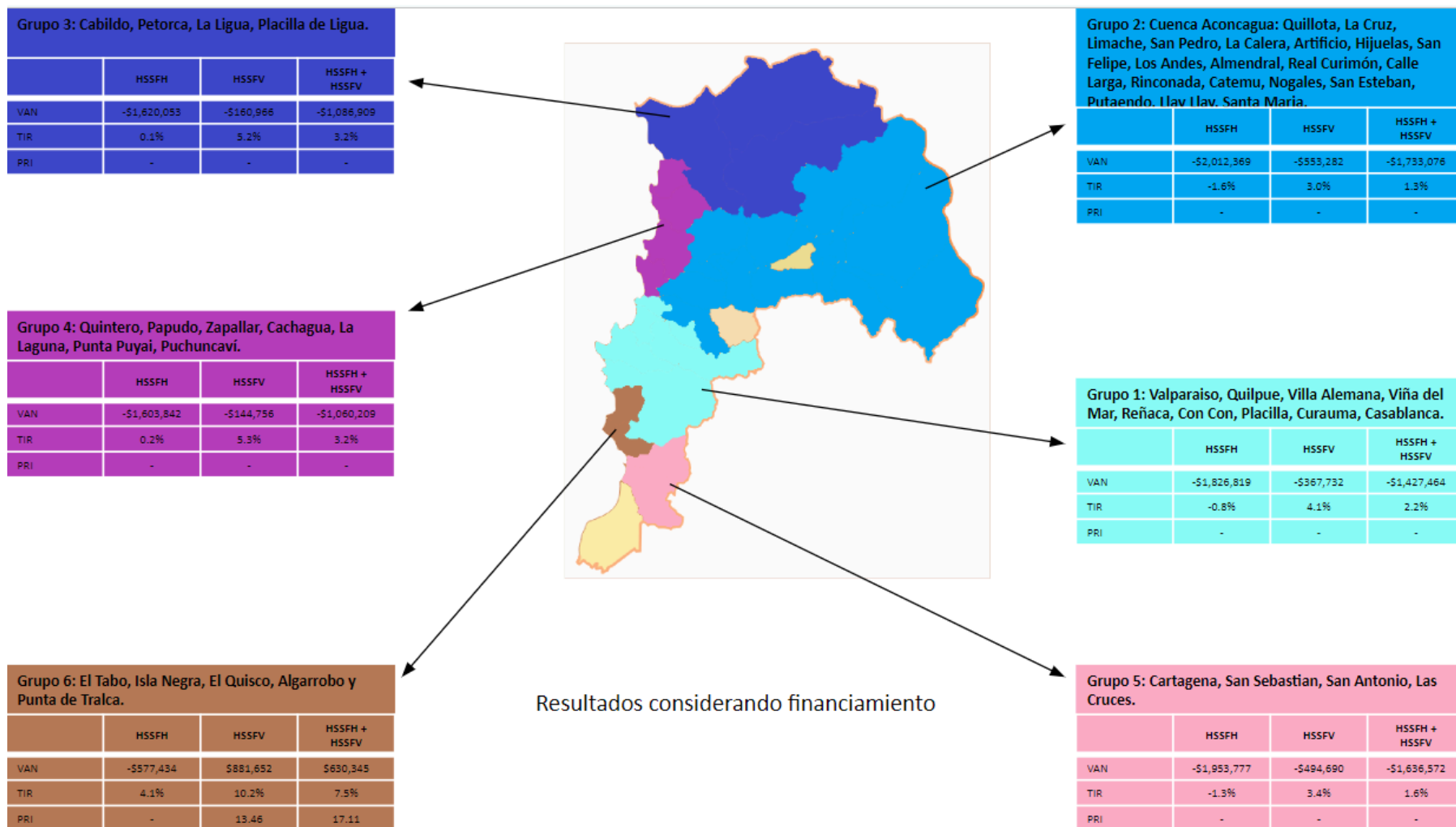
*Resumen del modelo económico del HSSFV con financiamiento.*

Tipo de Humedal	HSSFV
Ubicación	Tramo 6
Valor por m3 del Tramo	\$2.944
Monto de Inversión Inicial	\$2.383.593
Financiamiento	Si
Monto de crédito verde	\$2.145.234
Interés anual	9,22%
Periodo en años	2
Cuota anual	\$1.223.139
TIR	10,2%
VAN	\$881.652
PRI	13,46

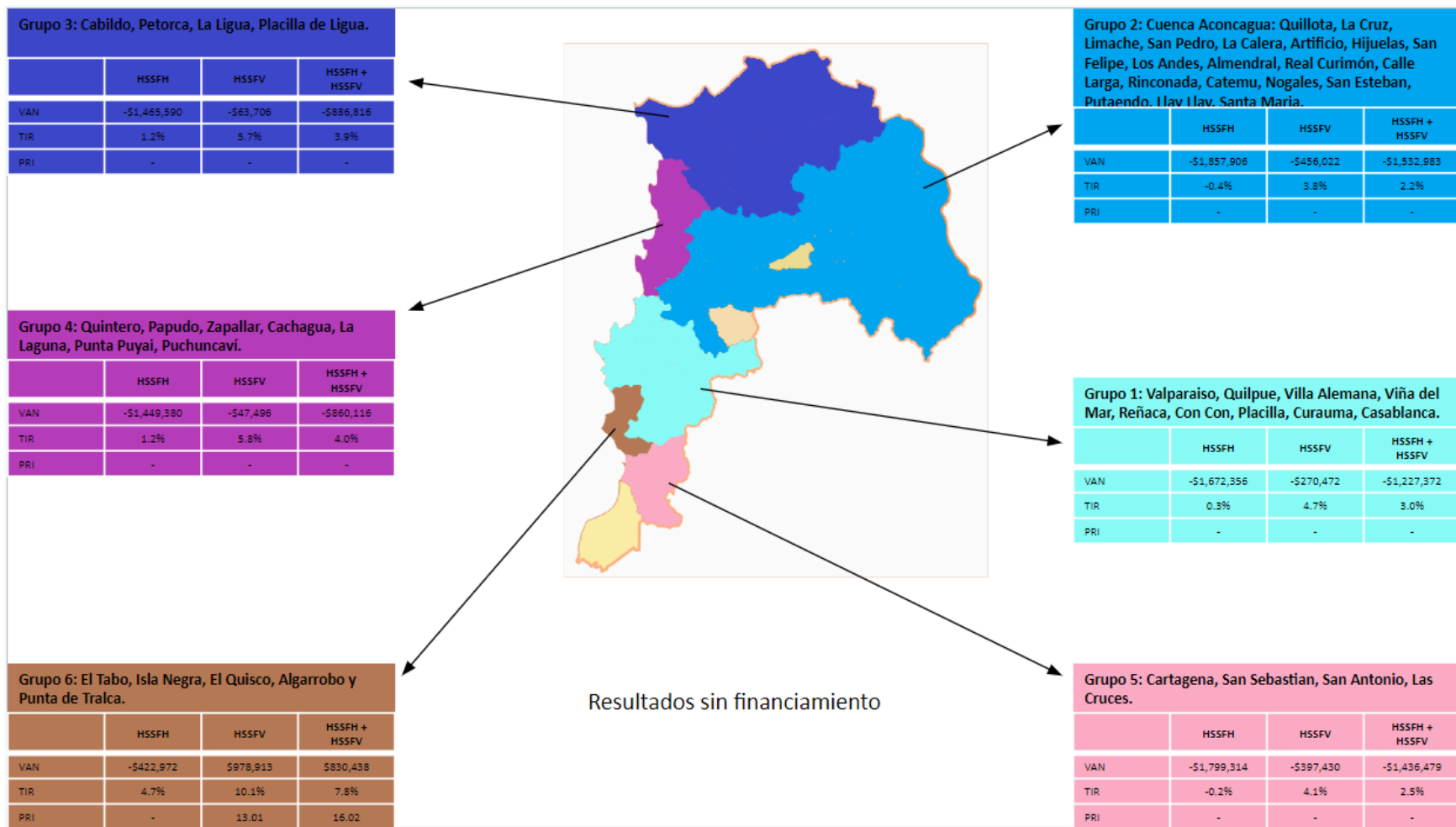


**Figura 15.** *VAN Acumulado del modelo económico del HSSFV con financiamiento.*

Las Figuras 16 y 17 muestran los resultados del análisis financiero por zona para cada grupo tarifario y tipo de proyecto considerando las opciones con financiamiento y sin este.



**Figura 16.** Resultados económicos por zona para cada tipo de proyecto considerando financiamiento. Zonas en amarillo no se consideran. Sólo se consideran los sectores de cobertura de ESVAL.



**Figura 17.** Resultados económicos por zona para cada tipo de proyecto sin considerar financiamiento. Zonas en amarillo no se consideran. Sólo se consideran los sectores de cobertura de ESVAL.

En las Figuras, se puede observar de mejor manera la zona donde es rentable este tipo de sistemas de reuso de aguas grises, ya sea con o sin financiamiento. Al comparar el VAN de las diferentes opciones, se observa que la mejor opción sería el HSSFV, obviamente sin financiamiento, ya que esto conlleva a tener gastos de financiación por la tasa de interés.

La diferencia entre el VAN del HSSFV y el HC mixto es de 148.475 CLP. Además se observa que el PRI para el HSSFV es de 13 años, mientras que para el HC mixto es de 16 años.

Además para poder hacer una comparación con caudales mayores, se presentan las tablas 31 y 32, las cuales muestran el VAN considerando un diseño un 30% para los sistemas propuestos.

**Tabla 31**

*VAN de los diferentes tipos de HC diseñados, considerando un caudal de aguas grises un 30% mayor, sin financiamiento.*

Sin Financiamiento						
VAN	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5	Grupo 6
HSSFH	\$-1,168,936.85	\$-1,416,093.06	\$-893,520.95	\$-871,928.16	\$-1,338,047.22	\$495,267.08
HSSFV	\$491,477.05	\$244,320.84	\$766,892.95	\$788,485.74	\$322,366.68	\$2,155,680.98
HSSFH + HSSFV	\$340,332.68	\$-66,748.13	\$793,958.87	\$829,523.47	\$61,797.96	\$3,081,374.45

**Tabla 32**

*VAN de los diferentes tipos de HC diseñados, considerando un caudal de aguas grises un 30% mayor, con financiamiento.*

Con Financiamiento						
VAN	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5	Grupo 6
HSSFH	\$-1,335,588.56	\$-1,582,744.77	\$-1,060,172.66	\$-1,038,579.87	\$-1,504,698.93	\$328,615.37
HSSFV	\$392,576.84	\$145,420.63	\$667,992.74	\$689,585.53	\$223,466.47	\$2,056,780.76
HSSFH + HSSFV	\$150,298.90	\$-256,781.91	\$603,925.09	\$639,489.69	\$-128,235.82	\$2,891,340.67

## 9. Conclusiones

En resumen, este estudio ha logrado su objetivo principal de determinar la viabilidad legal, técnica y económica de tres sistemas de tratamiento que sean de bajo costo y necesiten de bajos costes de operación y mantención, enfocados en las familias promedio de la región de Valparaíso, para luego compararlos. Entre las opciones de tratamiento estudiadas, los Humedales Construidos (HC) fueron la opción que mejor se adecuaba a los requisitos de costos de construcción, operación y mantención, ya que además de cumplir con estos requisitos, la V región tiene ventaja en la utilización de humedales ya que funcionan mejor en climas cálidos y soleados. Se evaluaron tres variantes de humedales construidos para llevar a cabo la comparación, HSSFH, HSSFV y HC mixto.

En cuanto a la viabilidad legal, se observa que, aunque no existe legislación específica para los HC, sí existe normativa para las condiciones mínimas de los efluentes que afectan el diseño. Por lo tanto, se concluye que existe una base legal para la integración de este tipo de sistemas.

En la comparación entre los HC y otros sistemas, se resalta su bajo requerimiento de mantenimiento y su contribución significativa a la estética del paisaje. Dado que son capaces de restaurar ecosistemas, su impacto ambiental es muy positivo. Aunque en el caso de los HCFSSH hay que tener en cuenta que requieren de una mayor superficie. En el caso de los HCFSSV se requiere una superficie menor, pero su capacidad de remoción de contaminantes se ve limitada en el diseño a un 85%, factor que limita su uso final, pudiendo utilizarla sólo para riego. Por esta razón, se incluyó como tercera opción un Humedal Construido combinado, que implica un primer tratamiento en el HCFSSH con la consideración de un efluente de diseño ideal para que, considerando el 85% de remoción de contaminantes del HCFSSV, el efluente final esté dentro de los rangos que la normativa requiere para considerar su uso en riego y en artefactos sanitarios.

Al llevar a cabo el análisis financiero en los grupos tarifarios definidos por la empresa ESVAL, se concluyó que para el promedio de las familias de la V región, el HCFSSH no es viable en ninguna de las localidades dentro de los sectores de cobertura de ESVAL. En el caso del HCFSSV, este viable en las localidades del grupo tarifario 6, con o sin financiamiento. Sin considerar financiamiento se obtiene un VAN de \$978.913 y un PRI de 13 años. Con financiamiento se obtiene un VAN de \$881.652 y un PRI de 13,4 años.

Y en cuanto al HC combinado, este también solo es viable en el grupo tarifario 6 con o sin financiamiento. Sin financiamiento se obtiene un VAN de \$830.438 y un PRI de 16 años. Mientras que con financiamiento se obtiene un VAN de \$630.345 y un PRI de 17,1 años.

Este estudio muestra que la implementación de Humedales Construidos en viviendas unifamiliares promedio de 5 personas es una opción técnica y económicamente factible para el tratamiento de aguas grises en entornos urbanos, dentro de las localidades del grupo tarifario 6, que puedan cubrir los requerimientos de superficie, dependiendo del tipo de Humedal Construido que se quiera construir. La viabilidad económica en este grupo de localidades se debe al alto costo del m<sup>3</sup> de agua, el cual llega a ser entre un 38% y un 64% mayor al resto de los otros grupos de localidades.

Debido a que caudal de diseño se realizó en base al promedio de la dotación diaria de la zona, solo es viable económicamente en las localidades del grupo tarifario 6, debido a que este caudal no es muy alto, pero si se considera un caudal de diseño mayor, este tipo de sistemas comienza a ser viable en las localidades de otros grupos tarifarios. Esto se puede observar en las tablas 31 y 32, las cuales muestran el VAN de los sistemas propuestos, considerando un caudal de diseño un 30% mayor. Al hacer este ejercicio se observa que el HSSFH se hace rentable en el grupo 6, el HSSFV se hace rentable en todas las localidades de cobertura de ESVAL y el HC mixto es rentable en las localidades del grupo 1, 3, 4 y 6. Además se observa que al realizar este

aumento en el caudal de diseño, la opción de HC mixto en el grupo 6 se convierte en la opción más rentable de todas.

## 10. Bibliografía

- Alhumoud, J. M., & Madzikanda, D. (2010). Public Perceptions on Water Reuse Options: The Case of Sulaibiya Wastewater Treatment Plant in Kuwait. *International Business & Economics Research Journal*, 9(1), 141-158. <https://doi.org/10.19030/iber.v9i1.515>
- Andreadakis, A., Noutsopoulos, C., & Mantziaras, I. (2015). *Grey Water Characterization and Treatment*. ResearchGate. Retrieved November 29, 2022, from [https://www.researchgate.net/publication/283686808\\_Grey\\_Water\\_Characterization\\_and\\_Treatment/link/56433c4708ae451880a326d9/download](https://www.researchgate.net/publication/283686808_Grey_Water_Characterization_and_Treatment/link/56433c4708ae451880a326d9/download)
- AQUA España. (2018). *Agua Grises: Origen, Composición y Tecnologías para su Reciclaje*. Aqua España. Retrieved November 29, 2022, from [https://aquaespana.org/sites/default/files/documents/files/Pildora\\_08-Grises\\_origen.pdf](https://aquaespana.org/sites/default/files/documents/files/Pildora_08-Grises_origen.pdf)
- Arancibia Pérez, K. E. (2022). *Análisis de factibilidad para el reúso de aguas servidas tratadas con aplicación en riego en Chile*. Repositorio Académico de la Universidad de Chile. Retrieved Diciembre 7, 2022, from <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/186624>
- Arias I., C. A., & Brix, H. (2003). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 13, 17-24. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91101302>
- Arias Triguero, Ó. (2004). *Estudio de la biodegradación de la materia orgánica en humedales contruidos de flujo subsuperficial* [Tesina]. Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental. <http://hdl.handle.net/2099.1/3339>
- Asprilla, W. J., Ramírez, J. S., & Rodríguez, D. C. (2020). Humedales artificiales de flujo subsuperficial: comparación de metodologías de diseño para el cálculo del área superficial

basado en la remoción de materia orgánica. *Ingenierías USBMed*, 11(2), 65-73.

10.21500/20275846.4558

Banco Mundial. (2023). *Inflación, precios al consumidor (% anual) - Chile | Data*. Banco

Mundial - Datos. Retrieved August 8, 2023, from

<https://datos.bancomundial.org/indicador/FP.CPI.TOTL.ZG?locations=CL>

Bohórquez Bedoya, E. (2015). *Efectos del medio filtrante y la frecuencia de alimentación en*

*humedales construidos de flujo vertical para tratamiento de aguas residuales domésticas en condiciones tropicales*. Universidad Tecnológica de Pereira.

<https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/bd3f8b07-2e6f-4f4f-9c7c-87b2cf7efca7/content>

Boyjoo, Y., Pareek, V. K., & Ang, M. (2013). A review of greywater characteristics and treatment

processes. *Water Science and Technology*, 67, 1403-1424.

<https://doi.org/10.2166/wst.2013.675>

Brix, H., & Arias, C. A. (2005). The use of vertical flow constructed wetlands for on-site

treatment of domestic wastewater: New Danish guidelines. *Ecological Engineering*, 25, 491-500. doi:10.1016/j.ecoleng.2005.07.009

Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia. (2019). CAMELS-CL: EXPLORADOR DE

CUENCAS. Retrieved December 13, 2022, from <https://camels.cr2.cl/>

Ciabatti, I., Cesaro, F., Faralli, L., Fatarella, E., & Tognotti, F. (2009). Demonstration of a

treatment system for purification and reuse of laundry wastewater. *Desalination*, 245, 451-459. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.02.008>

CORFO. (2023). *CORFO*. CORFO. Retrieved August 8, 2023, from

[https://www.corfo.cl/sites/cpp/convocatorias/credito\\_verde](https://www.corfo.cl/sites/cpp/convocatorias/credito_verde)

CORFO. (2023). *Tasas de Interés para Líneas de Financiamiento*.

<https://www.corfo.cl/sites/Satellite?blobcol=urldata&blobkey=id&blobtable=MungoBlobs&blobwhere=1475169229410&ssbinary=true>

Crites, R. W., Middlebrooks, J., & Reed, S. C. (2006). *Natural Wastewater Treatment Systems*.

CRC Press. 10.1201/9781420026443

Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L. F., & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Nelson Antequera Durán.

<https://core.ac.uk/download/pdf/48017573.pdf>

Díaz, M. A., Decinti, A., Blanco, D., & Vasquez, K. (2021). Metodología para la reutilización de aguas grises en viviendas ubicadas en áreas de estrés hídrico y estrés hídrico extremo - Caracterización, calidad y opciones de tratamiento para su reuso en Chile. *Informes De La Construcción*, 73(563). <https://doi.org/10.3989/ic.80823>

Dirección General de Aguas. (2022). *Decretos declarac*. Ministerio de Obras Públicas -

Dirección de General de Aguas. Retrieved November 24, 2022, from

<https://dga.mop.gob.cl/administracionrecursoshidricos/decretosZonasEscasez/Paginas/default.aspx>

Dotro, G., Langergraber, G., Molle, P., Nivala, J., Puigagut, J., R. Stein, O., & Von Sperling, M.

(2021). *Humedales Para Tratamiento* (Vol. 7). Ismael L. Vera-Puerto, Carlos A. Arias.

10.2166/9781789062526

Edwin, G. A., Gopalsamy, P., & Muthu, N. (2013). Characterization of domestic gray water from point source to determine the potential for urban residential reuse: a short review. *Applied*

*Water Science*, 4, 39-49. <https://doi.org/10.1007/s13201-013-0128-8>

Eriksson, E., Auffarth, K., Eilersen, A.-M., Henze, M., & Ledin, A. (2003). Household chemicals and personal care products as sources for xenobiotic organic compounds in grey

wastewater. *Water SA*, 29, 135-146.

<https://www.ajol.info/index.php/wsa/article/view/4848>

Fatta-Kassinou, D., Kalavrouziotis, I. K., Koukoulakis, P. H., & Vasquez, M. I. (2011). The risks associated with wastewater reuse and xenobiotics in the agroecological environment. *Science of the Total Environment*, 409, 3555-3563.

<https://doi-org.usm.idm.oclc.org/10.1016/j.scitotenv.2010.03.036>

Fernández, R. (2016). *Pretratamientos/Aguas*. Escuela de Organización Industrial, Madrid.

[https://www.eoi.es/sites/default/files/savia/documents/pretratamientos\\_magua\\_2016\\_rfd\\_rev0.pdf](https://www.eoi.es/sites/default/files/savia/documents/pretratamientos_magua_2016_rfd_rev0.pdf)

Forero Siachoque, I. J. (2013). Estudio del comportamiento de humedales artificiales de flujo sub-superficial en la planta experimental de Carrión de los Cespedes, (Sevilla, España). In *Repositorio Institucional de la Universidad Pontificia Bolivariana*. Repositorio Institucional de la Universidad Pontificia Bolivariana.

<http://hdl.handle.net/20.500.11912/525>

Franco, M. V. (2007). *Tratamiento y Reutilización de Aguas Grises con Aplicación a Caso en Chile*. Repositorio Académico de la Universidad de Chile. Retrieved Noviembre 24, 2022, from <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104596>

Fundación COPEC-UC. (2021). *Seminario Internacional 2021: Uso del agua de mar, ¿es una solución para la escasez hídrica?* | Fundación COPEC-UC. Fundación COPEC-UC |. Retrieved 2023, from

<https://www.fcuc.cl/2021/10/07/seminario-internacional-2021-uso-del-agua-de-mar-es-un-a-solucion-para-la-escasez-hidrica/>

Fundación Ecología y Desarrollo Barcelona. (2005). *Ordenanza Tipo para el Ahorro de Agua.*

*Xarxa de Ciutats i Pobles cap a la Sostenibilitat. Grupo de trabajo Nueva Cultura del Agua, España.* Recuperado <https://ecodes.org/docs/ordenanza-agua.pdf>.

Fustamante, N. (2017). *Manual para la cloración del agua en sistemas de abastecimiento de agua potable en el ámbito rural.* Cooperación Alemana al Desarrollo.

[https://sswm.info/sites/default/files/reference\\_attachments/GIZ%202017.%20Manual%20para%20la%20cloraci%C3%B3n%20del%20agua%20en%20sistemas%20de%20abastecimiento%20de%20agua%20potable.pdf](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/GIZ%202017.%20Manual%20para%20la%20cloraci%C3%B3n%20del%20agua%20en%20sistemas%20de%20abastecimiento%20de%20agua%20potable.pdf)

García Serrano, J., & Corzo Hernández, A. (2008). *Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial.* Universidad Politécnica de Catalunya. <http://hdl.handle.net/2117/2474>

Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., &

Veloso-Aguila, D. (2019). The Central Chile Mega Drought (2010-2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 1-2.

<https://doi.org/10.1002/joc.6219>

Gleick, P. H. (1993). *Water in crisis: a guide to the world's fresh water resources* (Vol. 100).

Oxford University Press.

[http://www.ibiologia.unam.mx/pdf/directorio/z/introduccion/world\\_watershed\\_re.pdf](http://www.ibiologia.unam.mx/pdf/directorio/z/introduccion/world_watershed_re.pdf)

Gobierno de Chile. (2022). *Gob.cl - Plan Sequía - Antecedentes.* Gobierno de Chile. Retrieved November 15, 2022, from <https://www.gob.cl/plansequia/antecedentes/>

Gross, A., Wiel-Shafran, A., Bondarenko, N., & Ronen, Z. (2008). Reliability of small scale greywater treatment systems and the impact of its effluent on soil properties. *International Journal of Environmental Studies*, 65, 41-50.

<https://doi.org/10.1080/00207230701832762>

- Halalsheh, M., Dalahmeh, S., Sayed, M., Suleiman, W., Shareef, M., Mansour, M., & Safi, M. (2008). Grey water characteristics and treatment options for rural areas in Jordan. *Bioresource Technology*, 99, 6635-6641.  
<https://doi-org.usm.idm.oclc.org/10.1016/j.biortech.2007.12.029>
- Hernandez Loyola, C. A. (2017). *Evaluación de un plan de reciclaje y tratamiento de aguas para la ciudad de Rancagua*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/146290>
- Jakobi, V. G., & Löhr, A. (1987). *Detergents and Textile Washing*. VCH.  
<https://doi.org/10.1002/cite.330600916>
- Jeffery, P., & Jefferson, B. (2003). Understanding public receptivity issues regarding "in-house" water recycling. *Water Supply*, 3, 109-116. <https://doi.org/10.2166/ws.2003.0015>
- Kadlec, R. H., & Wallace, S. (2008). *Treatment Wetlands* (2nd ed.). CRC press.  
[https://www.academia.edu/download/57206744/10\\_.pdf](https://www.academia.edu/download/57206744/10_.pdf)
- Lange, K. R. (1994). *Detergents and cleaners: a handbook for formulators*. Schoder Druck GmbH and Co.
- Lara-Borrero, J. (1999). *Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales*. Pontificia Universidad Javeriana.  
[https://www.researchgate.net/publication/230887937\\_Depuracion\\_de\\_Aguas\\_Residuales\\_Municipales\\_con\\_Humedales\\_Artificiales](https://www.researchgate.net/publication/230887937_Depuracion_de_Aguas_Residuales_Municipales_con_Humedales_Artificiales)
- Larico Larico, C. C. (2021). *Reducción de materia orgánica y nutrientes mediante un humedal artificial sub superficial de flujo vertical en función de la carga hidráulica y la composición del medio granular*. Universidad Nacional de Ingeniería.  
<http://hdl.handle.net/20.500.14076/22282>

- Le-Minh, N., Khan, S. J., Drewes, J. E., & Stuetz, R. M. (2010). Fate of antibiotics during municipal water recycling treatment processes. *Water Research*, *44*, 4295-4323.  
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.06.020>
- Li, F., Wichmann, K., & Otterpohl, R. (2009). Review of the technological approaches for grey water treatment and reuses. *Science of the Total Environment*, *407*, 3439-3449.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.02.004>
- Maimon, A., Friedler, E., & Gross, A. (2014). Parameters affecting greywater quality and its safety for reuse. *Science Total Environment*, *487*, 20-25.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.03.133>
- March, J. G., & Gual, M. (2007). Breakpoint Chlorination Curves of Greywater. *Water Environment Research*, *79*(8), 828-832.  
<https://doi-org.usm.idm.oclc.org/10.2175/106143007X156736>
- March, J. G., Gual, M., & Simonet, B. M. (2004). A Sensitive Extracto-Photometric Method for Determination of Residual Chlorine in Greywater. *Journal of AOAC International*, *87*(4), 852-855. <https://doi.org/10.1093/jaoac/87.4.852>
- Ministerio de Obras Públicas. (2018). *Regula la Recolección, Reutilización y Disposición de Aguas Grises*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. Retrieved November 19, 2022, from <https://bcn.cl/2fig>
- Naciones Unidas. (2022). *Día Mundial de Lucha contra la Desertificación y la Sequía* | Naciones Unidas. the United Nations. Retrieved November 14, 2022, from <https://www.un.org/es/observances/desertification-day>
- Noutsopoulos, C., Andreadakis, A., Kouris, N., Charchousi, D., Mendrinou, P., Galani, A., Mantziaras, I., & Koumaki, E. (2017). Greywater characterization and loadings -

- Physicochemical treatment to promote onsite reuse. *Journal of Environmental Management*, 216, 339. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.094>
- Oteng-Peprah, M., deVries, N. K., & Acheampong, M. A. (2018). Greywater Characteristics, Treatment Systems, Reuse Strategies and User Perception—a Review. *Water, Air & Soil Pollution*, 229. <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3909-8>
- O'Toole, J., Sinclair, M., Malawaraarachchi, M., Hamilton, A., Barker, S. F., & Leder, K. (2012). Microbial quality assessment of household greywater. 46, 4301-4313. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.05.001>
- Ottoson, J., & Stenström, T. A. (2002). Faecal contamination of greywater and associated microbial risks. *Water Research*, 37, 645-655. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00352-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00352-4)
- Palmquist, H., & Hanæus, J. (2005). Hazardous substances in separately collected grey- and blackwater from ordinary Swedish households. *Science of the Total Environment*, 348, 151-163. <https://doi-org.usm.idm.oclc.org/10.1016/j.scitotenv.2004.12.052>
- Pizarro, L. A. (2011). *Diagnóstico y desafíos para los sistemas de tratamiento de aguas servidas en localidades rurales*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104348>
- Platzer, C. (1999). Design Recommendations for Subsurface Flow Constructed Wetlands for Nitrification and Denitrification. *Water Science and Technology*, 40(3), 257-263. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=4acfdd4b8d1815f06c7f53a8b9418ffc9d3d4ea0>
- Platzer, C., Hoffmann, H., & Miglio, R. M. (2016). Long term experiences with dimensioning and operation of vertical flow constructed wetlands in warm climate regions of South America. *International Water Association (IWA)*, 868-887.

[https://brasil.rotaria.net/wp-content/uploads/2017/08/IWA-2016-wetland\\_vertical\\_experiences.pdf](https://brasil.rotaria.net/wp-content/uploads/2017/08/IWA-2016-wetland_vertical_experiences.pdf)

Prathapar, S. A., Jamrah, A., Ahmed, M., Adawi, S. A., Sidairi, A., & Harassi, A. A. (2005).

Overcoming constraints in treated greywater reuse in Oman. *Desalination*, 186, 177-186.

<https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.01.018>

Revitt, D. M., Eriksson, E., & Donner, E. (2010). The implications of household greywater

treatment and reuse for municipal wastewater flows and micropollutant loads. *Water*

*Research*, 45, 1549-1560. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.11.027>

Rojas, R. (2002). *Sistemas de tratamiento de aguas residuales*. Gestión integral de tratamiento de aguas residuales. Retrieved November 30, 2022, from

[https://www.academia.edu/download/57123734/GESTION\\_INTEGRAL\\_DEL\\_TRATAMIENTO\\_AR.pdf](https://www.academia.edu/download/57123734/GESTION_INTEGRAL_DEL_TRATAMIENTO_AR.pdf)

Silva Haun, R., & Arancibia Fortes, J. (2015). Utilización de los índices de hábitat fluvial, bosque

de ribera y macrófitas para la determinación de calidad del recurso hídrico del estero

Catapilco, Región de Valparaíso. *Anales Museo de Historia Natural de Valparaíso*, 26,

9-30. <https://repositorio.uvm.cl/handle/20.500.12536/1883>

SiSS. (2003). *Anexos Reglamento de Instalaciones Domiciliarias de Agua Potable y*

*Alcantarillado (RIDAA)*. Superintendencia de Servicios Sanitarios. Retrieved November

26, 2022, from <https://www.siss.gob.cl/586/w3-article-7450.html>

SiSS. (2022). *Informe de Gestión del sector sanitario 2021*. Superintendencia de Servicios

Sanitarios. [https://www.siss.gob.cl/586/articles-22969\\_recurso\\_1.pdf](https://www.siss.gob.cl/586/articles-22969_recurso_1.pdf)

Stevens Salazar, E. I. (2021). Implementación del reglamento sobre condiciones sanitarias para la

reutilización de aguas grises: reúso residencial - análisis desde la experiencia comparada.

In *Universidad de Chile*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/183863>.

- Tapia Zurita, L. (2018). *Análisis de la calidad hídrica del humedal de Mantagua, Región de Valparaíso, y su relación con el entorno social*. Universidad de Chile.  
<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/152402>
- UpKeep. (2023). *¿Cuánto debo presupuestar para el mantenimiento de mi equipo?* UpKeep.  
Retrieved January 11, 2024, from  
<https://upkeep.com/es/learning/budget-for-equipment-maintenance/>
- Valencia Muñoz, J., & Arancibia Fortes, J. (2015). Evaluación del estado ecológico de la laguna Sausalito a través de las comunidades de macrófitos y macroinvertebrados. *Anales Museo de Historia Natural de Valparaíso*, 26, 31-44.  
<https://repositorio.uvm.cl/handle/20.500.12536/1883>
- Vera, I., Jorquera, C., López, D., & Vidal, G. (2016). Humedales construidos para tratamiento y reúso de aguas servidas en Chile: reflexiones. *Tecnología y Ciencias del Agua*, VII(3), 19-35.  
[https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-2422201600030001](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-2422201600030001)
- 9
- Vera-Puerto, I., Escobar, J., Rebolledo, F., Valenzuela, V., Olave, J., Tijaro-Rojas, R., Correa, C., & Arias, C. (2021). Performance Comparison of Vertical Flow Treatment Wetlands Planted with the Ornamental Plant *Zantedeschia aethiopica* Operated under Arid and Mediterranean Climate Conditions. *Water*, 13. <https://doi.org/10.3390/w13111478>
- Vidal, G., & Hormazábal, S. (2018). *Humedales construidos: diseño y operación*. Sello Editorial Universidad de Concepción. <http://biblioteca.cehum.org/handle/CEHUM2018/1779>
- Vymazal, J. (2011). Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: a review. *Hydrobiologia*, 674, 133-156. 10.1007/s10750-011-0738-9

Vymazal, J. (2013). Emergent plants used in free water surface constructed wetlands: A review.

*Ecological Engineering*, 61, 582-592. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.06.023>

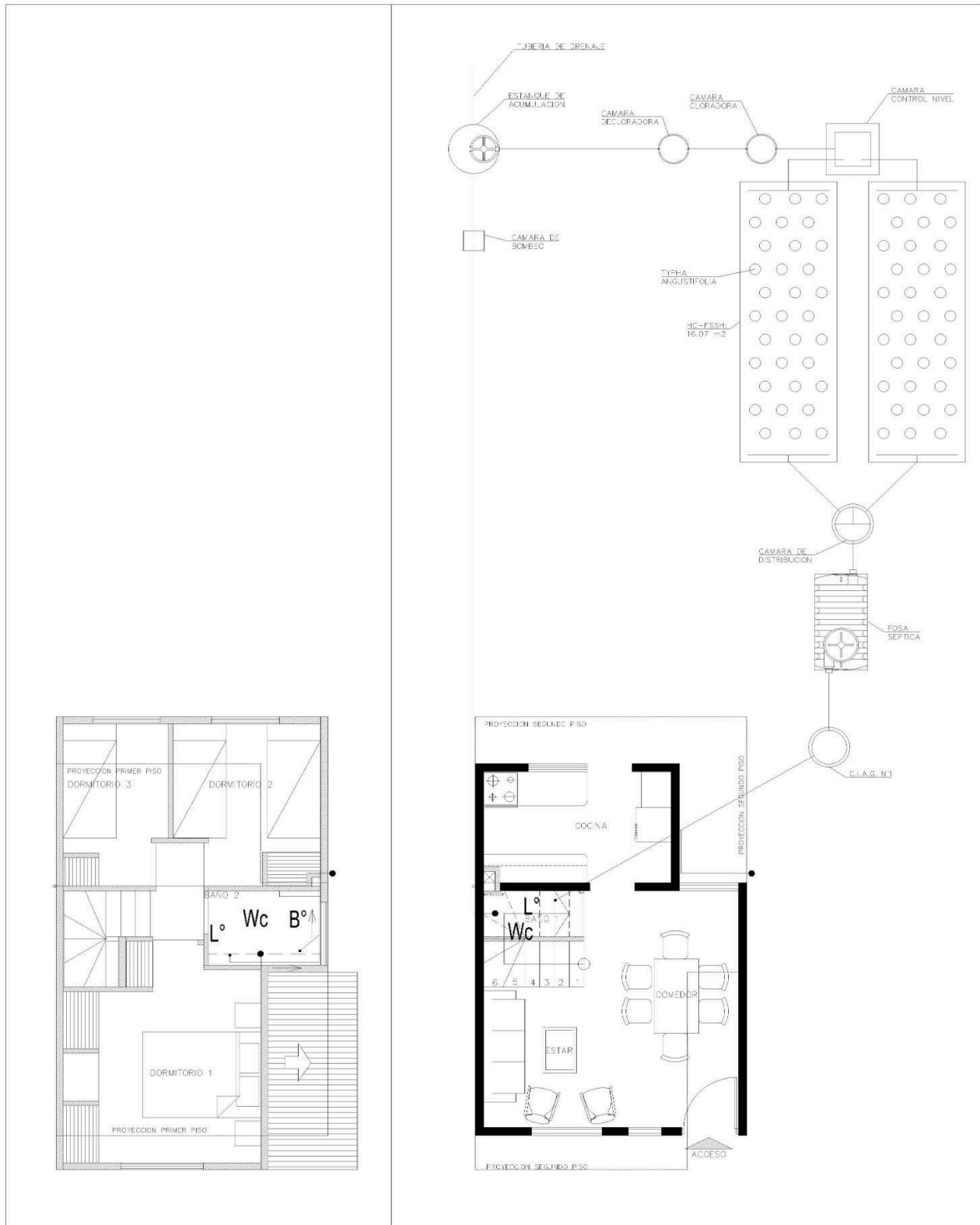
World Bank. (2016). *High and Dry: Climate Change, Water, and the Economy*. World Bank.

Retrieved November 22, 2022, from

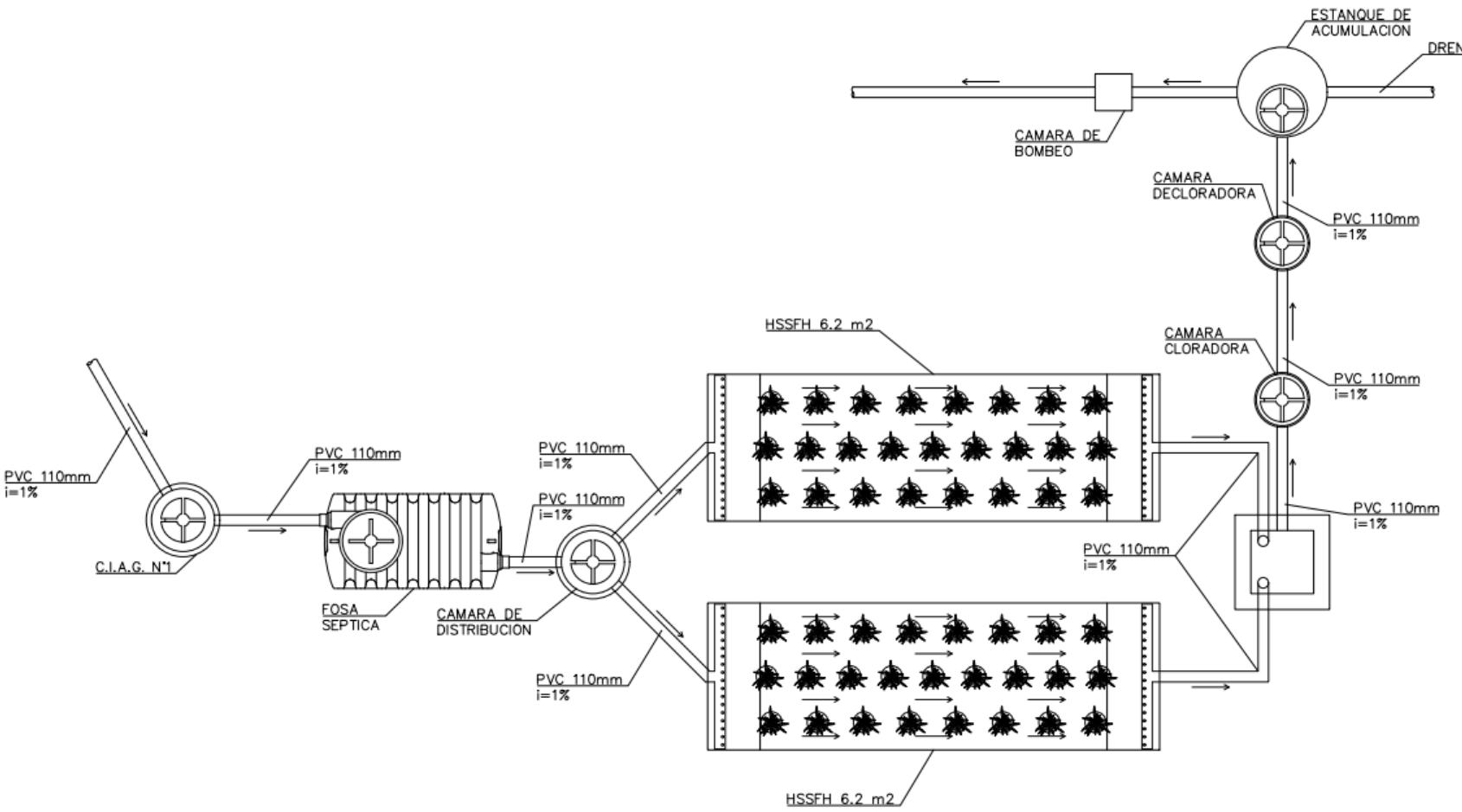
<https://www.worldbank.org/en/topic/water/publication/high-and-dry-climate-change-water-and-the-economy>

# Anexo A: Esquemas de Sistemas de Tratamiento de Aguas Grises

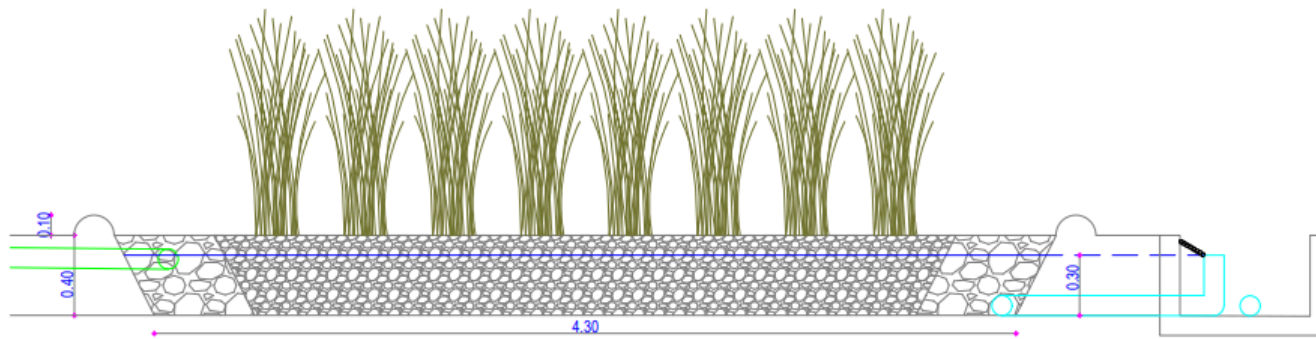
HSSFH:



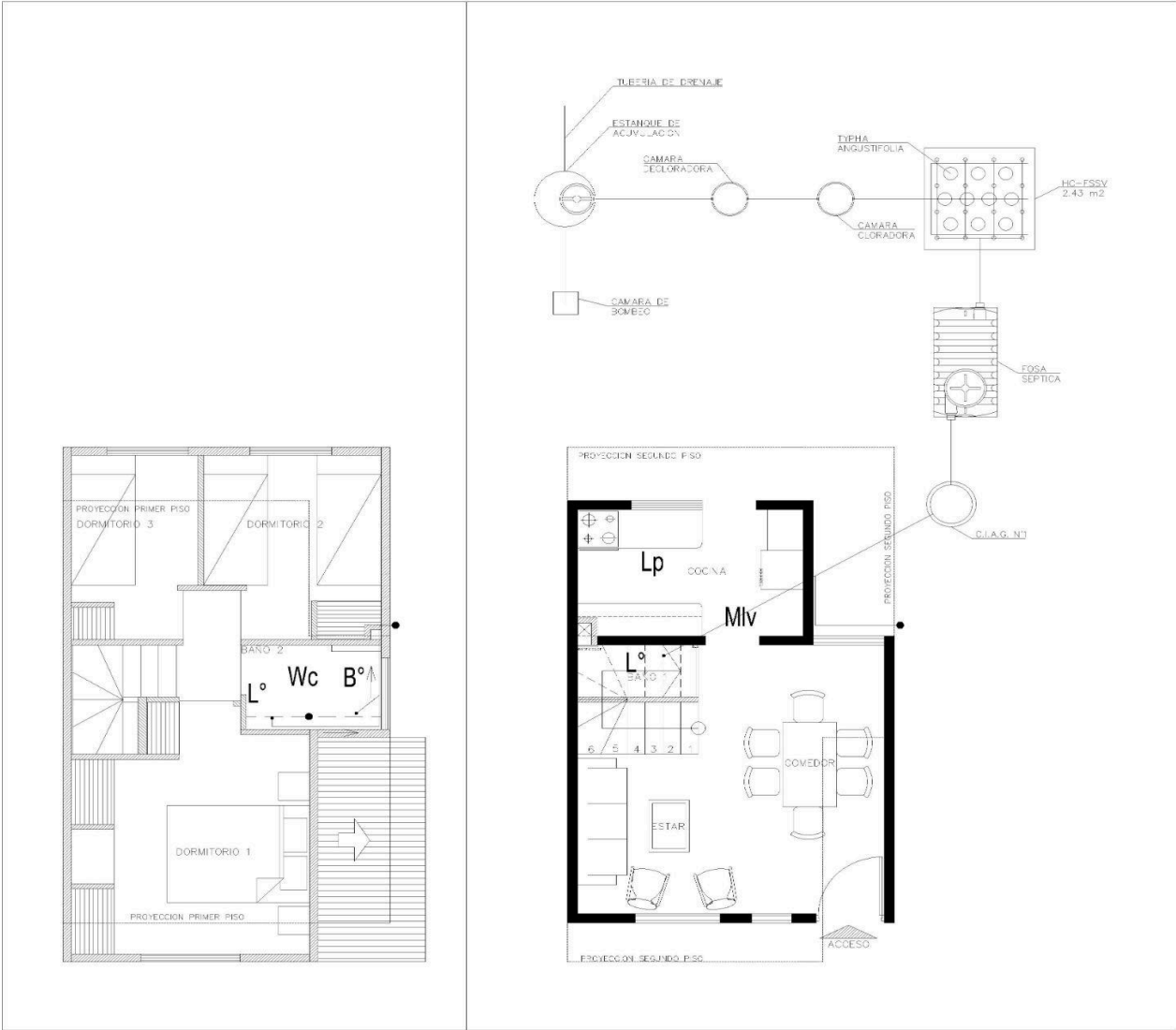
Planta HSSFH



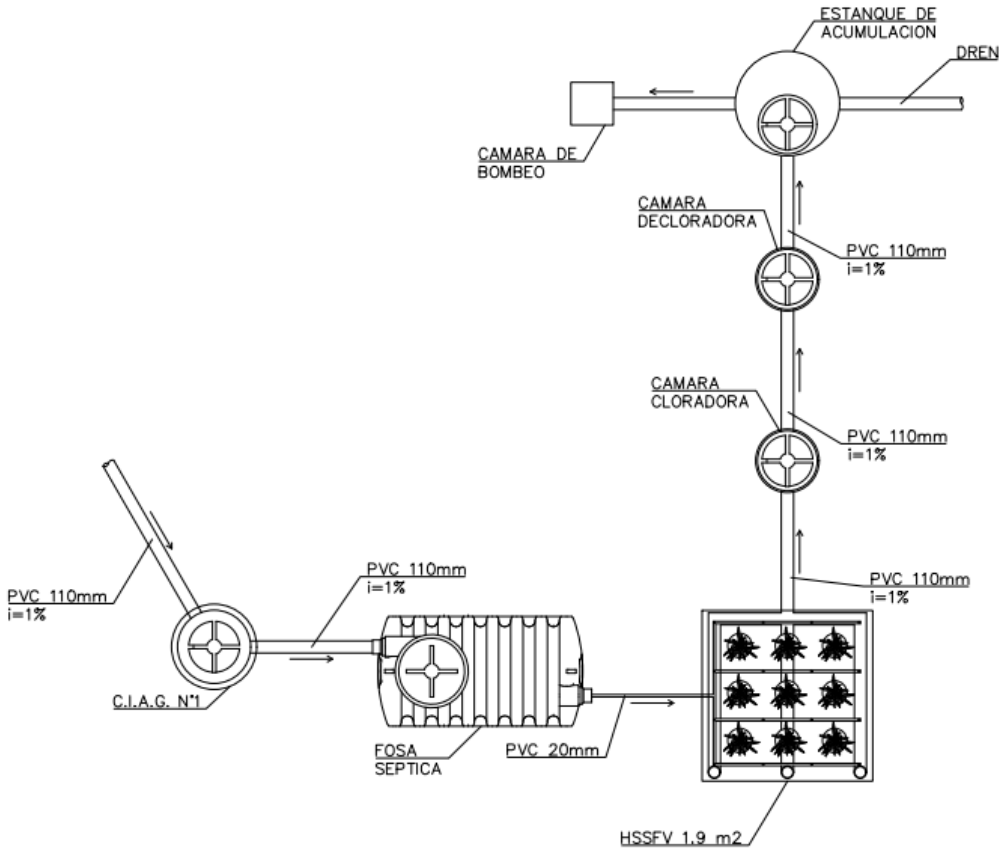
## Corte Longitudinal HSSFH



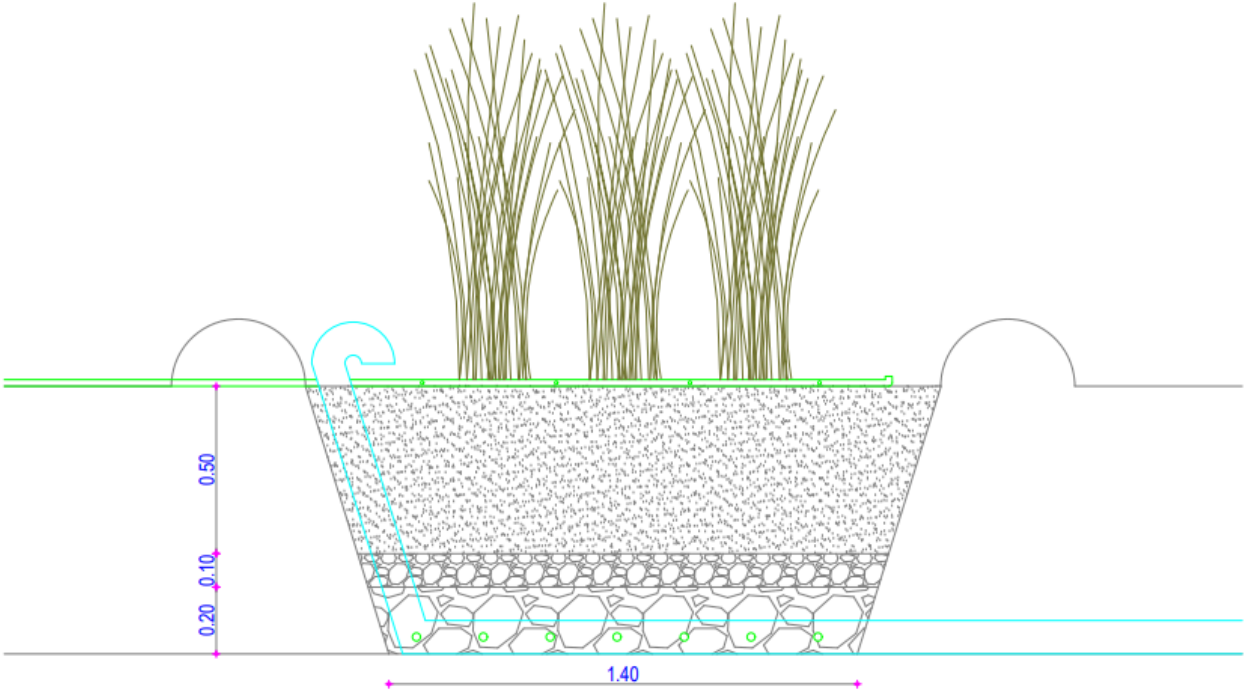
HSSFV:



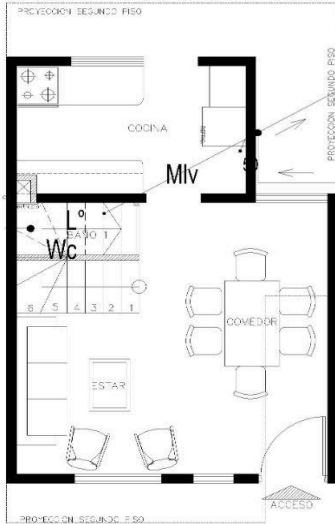
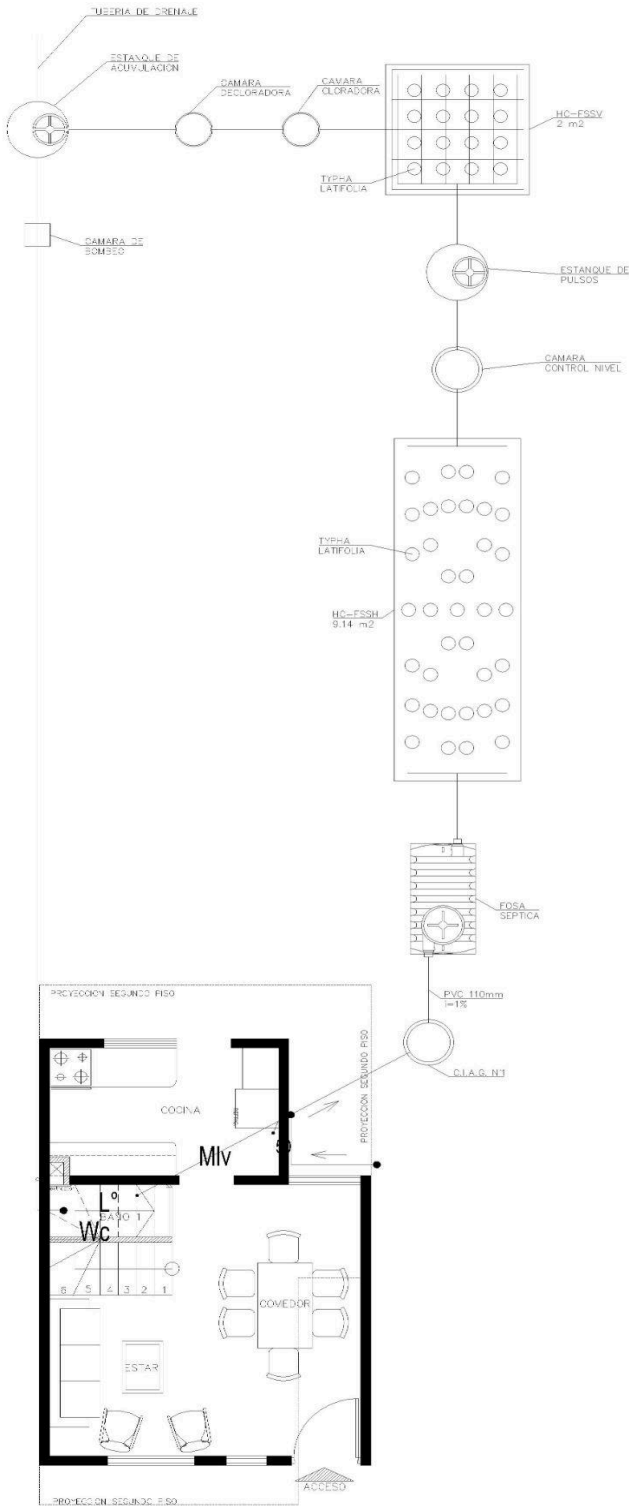
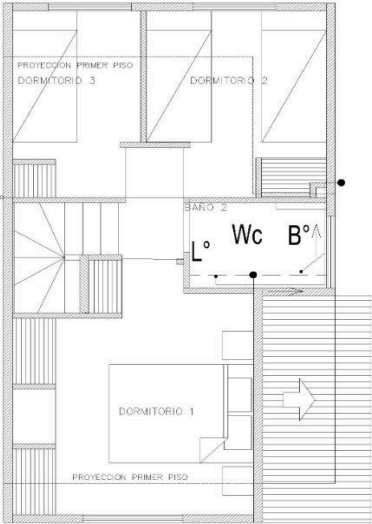
Planta HSSFV



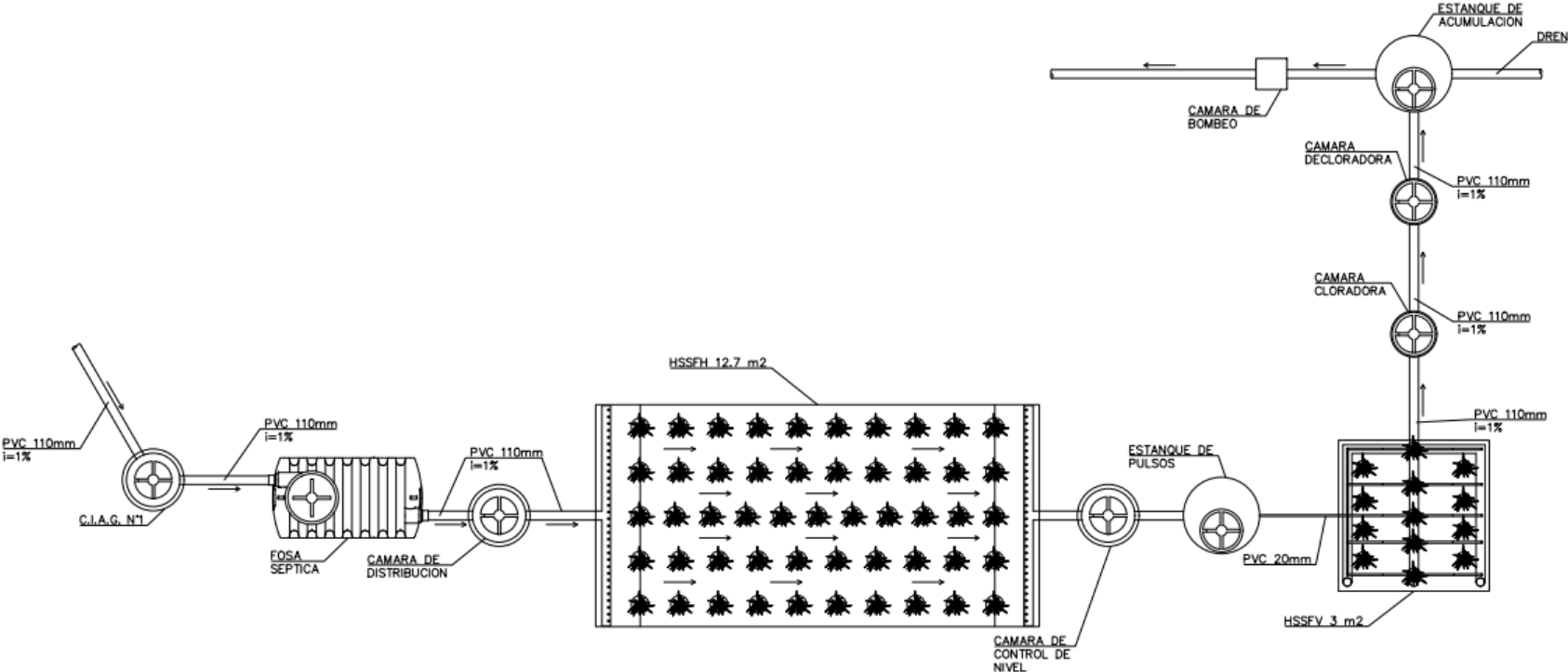
Corte HSSFV



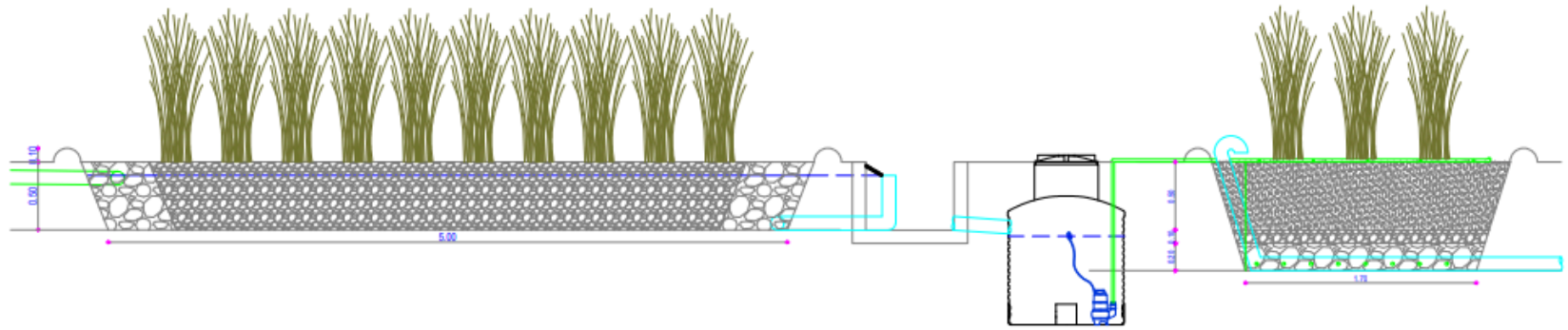
HC mixto:



Planta HC-mixto



Corte Longitudinal HC mixto



## Anexo B: Presupuestos detallados de Humedales Construidos

<b>HCFSSH</b>					
<b>Item</b>	<b>Partida</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>PU</b>	<b>Total</b>
<b>1</b>	<b>Obras Previas</b>				<b>647,991</b>
1.1	Limpieza	m2	23.06	1,238	28,537
1.2	Replanteo	m	10.00	6,471	64,705
1.3	Excavaciones Humedal	m3	12.28	7,104	87,246
1.4	Excavaciones Otros	m3	13.49	7,104	95,858
1.5	Excavación de zanjas	m3	13.64	1,040	14,186
1.6	Cama de arena	m3	4.45	21,900	97,466
1.7	Relleno de misma excavación	m3	19.06	5,100	97,227
1.8	Retiro de excedentes	m3	20.35	8,000	162,766
<b>2</b>	<b>Sistema de Recolección de Aguas Grises</b>				<b>101,824</b>
<b>2.1</b>	<b>Canalizaciones</b>	<b>gl</b>	<b>1.00</b>	<b>43,111</b>	<b>43,111</b>
2.1.1	PVC Sanitario Gris 110mm	ml	2.53	3,335	8,439
2.1.2	PVC Sanitario Gris 75mm	ml	7.96	3,053	24,305
2.1.3	PVC Sanitario Gris 50mm	ml	5.81	1,784	10,367
<b>2.2</b>	<b>Fittings</b>	<b>gl</b>	<b>1.00</b>	<b>20,999</b>	<b>20,999</b>
2.2.1	Codo PVC Sanitario Gris 50mm	un	3.00	1,294	3,883
2.2.2	Codo PVC Sanitario Gris 75mm	un	3.00	2,400	7,201
2.2.3	Tee PVC Sanitario Gris 75x50mm	un	1.00	2,865	2,865
2.2.4	Tee PVC Sanitario Gris 110x75mm	un	1.00	4,482	4,482
2.2.5	Reducción PVC Sanitario Gris 110x50mm	un	1.00	2,567	2,567
<b>2.3</b>	<b>Cámaras de inspección</b>	<b>un</b>	<b>1.00</b>	<b>37,715</b>	<b>37,715</b>
<b>3</b>	<b>Pretratamiento</b>				<b>171,494</b>
3.1	Fosa séptica	un	1.00	165,544	165,544
3.2	PVC Sanitario Gris 110mm	ml	1.50	3,967	5,950
<b>4</b>	<b>Humedal construido HSSFH</b>				<b>814,840</b>
<b>4.1</b>	<b>Sistema de Distribución</b>	<b>gl</b>	<b>1.00</b>	<b>112,937</b>	<b>112,937</b>
<b>4.1.1</b>	<b>Canalizaciones</b>		<b>1.00</b>	<b>22,190</b>	<b>22,190</b>

4.1.1					
.1	PVC Sanitario Gris 110mm	ml	2.72	3,335	9,072
4.1.1					
.2	PVC Sanitario Gris 110mm perforado	ml	2.76	4,753	13,118
<b>4.1.2</b>	<b>Fittings</b>	<b>gl</b>	<b>1.00</b>	<b>50,174</b>	<b>50,174</b>
4.1.2					
.1	Codo PVC Sanitario Gris 110mm	un	6.00	3,804	22,826
4.1.2					
.2	Codo 45° PVC Sanitario Gris 110x110mm	un	2.00	3,530	7,060
4.1.2					
.3	Tee PVC Sanitario Gris 110x110mm	un	2.00	6,207	12,414
4.3.2					
.1	Tapa PVC 110mm	un	4.00	1,969	7,874
<b>4.1.3</b>	<b>Cámara de distribución</b>	<b>un</b>	<b>1.00</b>	<b>40,573</b>	<b>40,573</b>
<b>4.2</b>	<b>Impermeabilización</b>	<b>gl</b>	<b>1.00</b>	<b>229,475</b>	<b>229,475</b>
4.2.1	Geotextil	m2	47.44	1,816	86,147
4.2.2	Montículo perimetral	ml	22.80	338	7,695
4.2.3	HDPE e=0.5mm	m2	23.72	5,719	135,633
<b>4.3</b>	<b>Sistema de Recogida</b>	<b>gl</b>	<b>1.00</b>	<b>52,402</b>	<b>52,402</b>
<b>4.3.1</b>	<b>Canalizaciones</b>	<b>gl</b>	<b>1.00</b>	<b>22,991</b>	<b>22,991</b>
4.3.1					
.1	PVC Sanitario Gris 110mm	ml	2.96	3,335	9,873
4.3.1					
.2	PVC Sanitario Gris 110mm perforado	ml	2.76	4,753	13,118
<b>4.3.2</b>	<b>Fittings</b>	<b>un</b>	<b>1.00</b>	<b>29,412</b>	<b>29,412</b>
4.3.2					
.1	Tapón PVC 110mm	un	4.00	2,347	9,389
4.3.2					
.2	Codo PVC Sanitario Gris 110x110mm	un	2.00	3,804	7,609
4.3.2					
.3	Tee PVC Sanitario Gris 110x110mm	un	2.00	6,207	12,414
<b>4.4</b>	<b>Medio Granular</b>	<b>m3</b>	<b>4.92</b>	<b>25,740</b>	<b>126,615</b>
4.4.1	Grava fina 3-12mm	m3	3.77	26,700	100,580
4.4.2	Grava gruesa 50-100mm	m3	1.15	22,600	26,035
<b>4.5</b>	<b>Cámara de control de nivel</b>	<b>un</b>	<b>1.00</b>	<b>128,476</b>	<b>128,476</b>
4.5.1	Cámara	un	1.00	81,713	81,713
4.5.2	Cadena	un	1.00	2,079	2,079
4.5.3	Tubo Flexible	un	2.00	22,342	44,684

<b>4.6</b>	<b>Vegetación</b>	<b>gl</b>	<b>1.00</b>	<b>163,582</b>	<b>163,582</b>
4.6.1	Typha Angustifolia	un	50.00	3,272	163,582
<b>5</b>	<b>Desinfección</b>				<b>192,837</b>
5.1	Cámara cloradora	un	1.00	78,766	78,766
5.2	Cámara descloradora	un	1.00	79,082	79,082
5.3	PVC Sanitario Gris 110mm	ml	10.49	3,335	34,988
<b>6</b>	<b>Sistema de acumulación y bombeo</b>				<b>322,815</b>
6.1	Bomba	un	2.00	82,212	164,424
6.2	Estanque de acumulación 500 lt	un	1.00	114,356	114,356
6.3	Control de presión	un	1.00	40,498	40,498
6.4	PVC Sanitario Gris 110mm perforado	ml	1.00	3,537	3,537
<b>7</b>	<b>Sistema de distribución de Aguas Reutilizadas</b>				<b>20,394</b>
<b>7.1</b>	<b>Canalizaciones</b>	<b>gl</b>	<b>1.00</b>	<b>18,616</b>	<b>18,616</b>
7.1.1	PPR 20mm	ml	25.43	732	18,616
<b>7.2</b>	<b>Fittings</b>	<b>gl</b>	<b>1.00</b>	<b>1,778</b>	<b>1,778</b>
7.2.1	Codo PPR 20mm	un	5.00	296	1,482
7.2.2	Tee PPR 20x20mm	un	1.00	296	296
	<b>Subtotal</b>				
	<b>Costo Directo</b>				<b>2,270,842</b>
	<b>Utilidad (10%)</b>				<b>227,084</b>
	<b>Gastos Generales (30%)</b>				<b>681,253</b>
	<b>Total Neto</b>				<b>3,179,178</b>
	<b>IVA (19%)</b>				<b>604,044</b>
	<b>Total Presupuesto</b>				<b>3,783,222</b>

<b>HCFSSV</b>					
<b>Item</b>	<b>Partida</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>PU</b>	<b>Total</b>
<b>1</b>	<b>Obras Previas</b>				<b>299,241</b>
1.1	Limpieza	m2	23.06	1,238	28,537
1.2	Replanteo	m	10.00	6,471	64,705
1.3	Excavaciones Humedal	m3	1.13	7,104	8,000
1.4	Excavaciones Otros	m3	8.83	7,104	62,752
1.5	Excavación de zanjas	m3	3.96	1,040	4,124
1.6	Cama de arena	m3	1.92	21,900	42,145
1.7	Relleno de misma excavación	m3	7.73	5,100	39,408
1.8	Retiro de excedentes	m3	6.20	8,000	49,570
<b>2</b>	<b>Sistema de Recolección de Aguas Grises</b>				<b>101,824</b>
<b>2.1</b>	<b>Canalizaciones</b>	<b>gl</b>	<b>1.00</b>	<b>43,111</b>	<b>43,111</b>
2.1.1	PVC Sanitario Gris 110mm	ml	2.53	3,335	8,439
2.1.2	PVC Sanitario Gris 75mm	ml	7.96	3,053	24,305
2.1.3	PVC Sanitario Gris 50mm	ml	5.81	1,784	10,367
<b>2.2</b>	<b>Fittings</b>	<b>gl</b>	<b>1.00</b>	<b>20,999</b>	<b>20,999</b>
2.2.1	Codo PVC Sanitario Gris 50mm	un	3.00	1,294	3,883
2.2.2	Codo PVC Sanitario Gris 75mm	un	3.00	2,400	7,201
2.2.3	Tee PVC Sanitario Gris 75x50mm	un	1.00	2,865	2,865
2.2.4	Tee PVC Sanitario Gris 110x75mm	un	1.00	4,482	4,482
2.2.5	Reducción PVC Sanitario Gris 110x50mm	un	1.00	2,567	2,567
<b>2.3</b>	<b>Cáramas de inspección</b>	<b>un</b>	<b>1.00</b>	<b>37,715</b>	<b>37,715</b>
<b>3</b>	<b>Pretratamiento</b>				<b>169,511</b>
3.1	Fosa séptica	un	1.00	165,544	165,544
3.2	PVC Sanitario Gris 110mm	ml	1.00	3,967	3,967
<b>4</b>	<b>Humedal construido HSSFV</b>				<b>396,479</b>
<b>4.1</b>	<b>Sistema de Distribución</b>	<b>gl</b>	<b>1.00</b>	<b>216,506</b>	<b>216,506</b>
<b>4.1.1</b>	<b>Canalizaciones</b>	<b>gl</b>	<b>1.00</b>	<b>7,013</b>	<b>7,013</b>
4.1.1.1	PVC Hidraulico 20mm	ml	3.20	553	1,768
4.1.1.2	PVC Hidraulico 20mm perforado	ml	4.80	1,093	5,245
<b>4.1.2</b>	<b>Fittings</b>	<b>gl</b>	<b>1.00</b>	<b>9,152</b>	<b>9,152</b>

4.1.2.1	Codo PVC Hidráulico 20mm	un	4.00	837	3,349
4.1.2.2	Tee PVC Hidráulico 20mm	un	3.00	910	2,729
4.1.2.3	Tapón PVC 20mm	un	4.00	768	3,073
<b>4.1.3</b>	<b>Bombeo de pulsos</b>	<b>gl</b>	<b>1.00</b>	<b>200,341</b>	<b>200,341</b>
4.1.3.1	Bomba de aguas residuales	un	2.00	60,144	120,287
4.1.3.2	Control de pulsos	un	1.00	39,556	39,556
4.1.3.3	Control de presión	un	1.00	40,498	40,498
<b>4.2</b>	<b>Impermeabilización</b>	<b>gl</b>	<b>1.00</b>	<b>67,938</b>	<b>67,938</b>
4.2.1	Geotextil	m2	21.72	1,126	24,469
4.2.2	Montículo perimetral	ml	6.24	338	2,106
4.2.3	HDPE e=0.5mm	m2	4.70	8,801	41,363
<b>4.3</b>	<b>Sistema de Recogida</b>	<b>gl</b>	<b>1.00</b>	<b>44,714</b>	<b>44,714</b>
<b>4.3.1</b>	<b>Canalizaciones</b>	<b>gl</b>	<b>1.00</b>	<b>18,321</b>	<b>18,321</b>
4.3.1	PVC Sanitario Gris 110mm perforado	ml	5.18	3,537	18,321
<b>4.3.2</b>	<b>Fittings</b>	<b>un</b>	<b>1.00</b>	<b>26,393</b>	<b>26,393</b>
4.3.2.2	Codo PVC Sanitario Gris 110x110mm	un	5.00	3,804	19,022
4.3.2.3	Cruz PVC Sanitario Gris 110x110mm	un	1.00	7,372	7,372
<b>4.4</b>	<b>Chimeneas de ventilación</b>	<b>gl</b>	<b>1.00</b>	<b>17,540</b>	<b>17,540</b>
4.4.1	PVC Sanitario Gris 110mm	ml	1.80	3,967	7,140
4.4.2	Gorro galvanizado ventilación 110mm	un	3.00	3,467	10,400
<b>4.5</b>	<b>Medio Granular</b>	<b>m3</b>	<b>0.93</b>	<b>25,160</b>	<b>23,383</b>
4.5.1	Arena gruesa	m3	0.74	25,800	19,182
4.5.2	Grava gruesa 50-100mm	m3	0.19	22,600	4,201
<b>4.6</b>	<b>Vegetación</b>	<b>gl</b>	<b>1.00</b>	<b>26,398</b>	<b>26,398</b>
4.6.1	Typha Angustifolia	un	8.00	3,300	26,398
<b>5</b>	<b>Desinfección</b>				<b>172,723</b>
5.1	Cámara cloradora	un	1.00	78,766	78,766
5.2	Cámara descloradora	un	1.00	79,082	79,082
5.3	PVC Sanitario Gris 110mm	ml	3.75	3,967	14,875
<b>6</b>	<b>Sistema de acumulación y bombeo</b>				<b>289,065</b>
6.1	Bomba	un	2.00	65,337	130,674
6.2	Estanque de acumulación 1000 lt	un	1.00	114,356	114,356
6.3	Control de presión	un	1.00	40,498	40,498
6.4	PVC Sanitario Gris 110mm perforado	ml	1.00	3,537	3,537

<b>7</b>	<b>Sistema de distribución de Aguas Reutilizadas</b>				<b>1,885</b>
<b>7.1</b>	<b>Canalizaciones</b>	<b>gl</b>	<b>1.00</b>	<b>1,589</b>	<b>1,589</b>
7.1.1	PPR 20mm	ml	2.17	732	1,589
<b>7.2</b>	<b>Fittings</b>	<b>gl</b>	<b>1.00</b>	<b>296</b>	<b>296</b>
7.2.1	Codo PPR 20mm	un	1.00	296	296
	<b>Subtotal</b>				
	<b>Costo Directo</b>				<b>1,430,728</b>
	<b>Utilidad (10%)</b>				<b>143,073</b>
	<b>Gastos Generales (30%)</b>				<b>429,219</b>
	<b>Total Neto</b>				<b>2,003,020</b>
	<b>IVA (19%)</b>				<b>380,574</b>
	<b>Total Presupuesto</b>				<b>2,383,594</b>

<b>HCFSSH + HCFSSV</b>					
<b>Item</b>	<b>Partida</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>PU</b>	<b>Total</b>
<b>1</b>	<b>Obras Previas</b>				<b>690,085</b>
1.1	Limpieza	m2	23.06	1,238	28,537
1.2	Replanteo	m	10.00	6,471	64,705
1.3	Excavaciones Humedal	m3	15.84	7,104	112,502
1.4	Excavaciones Otros	m3	14.00	7,104	99,477
1.5	Excavación de zanjas	m3	10.06	1,040	10,462
1.6	Cama de arena	m3	4.65	21,900	101,925
1.7	Relleno de misma excavación	m3	16.10	5,100	82,091
1.8	Retiro de excedentes	m3	23.80	8,000	190,387
<b>2</b>	<b>Sistema de Recolección de Aguas Grises</b>				<b>139,538</b>
<b>2.1</b>	<b>Canalizaciones</b>	<b>gl</b>	<b>1.00</b>	<b>43,111</b>	<b>43,111</b>
2.1.1	PVC Sanitario Gris 110mm	ml	2.53	3,335	8,439
2.1.2	PVC Sanitario Gris 75mm	ml	7.96	3,053	24,305
2.1.3	PVC Sanitario Gris 50mm	ml	5.81	1,784	10,367
<b>2.2</b>	<b>Fittings</b>	<b>gl</b>	<b>1.00</b>	<b>58,713</b>	<b>58,713</b>
2.2.1	Codo PVC Sanitario Gris 50mm	un	3.00	1,294	3,883
2.2.2	Codo PVC Sanitario Gris 75mm	un	3.00	2,400	7,201
2.2.3	Tee PVC Sanitario Gris 75x50mm	un	1.00	2,865	2,865
2.2.4	Tee PVC Sanitario Gris 110x75mm	un	1.00	4,482	4,482
2.2.5	Reducción PVC Sanitario Gris 110x50mm	un	1.00	2,567	2,567
<b>2.3</b>	<b>Cáramas de inspección</b>	<b>un</b>	<b>1.00</b>	<b>37,715</b>	<b>37,715</b>
<b>3</b>	<b>Pretratamiento</b>				<b>171,494</b>
3.1	Fosa séptica	un	1.00	165,544	165,544
	PVC Sanitario Gris 110mm	ml	1.50	3,967	5,950
<b>4</b>	<b>Humedal construido HSSFH</b>				<b>690,659</b>
<b>4.1</b>	<b>Sistema de Distribución</b>	<b>gl</b>	<b>1.00</b>	<b>72,024</b>	<b>72,024</b>
<b>4.1.1</b>	<b>Canalizaciones</b>		<b>1.00</b>	<b>9,894</b>	<b>9,894</b>
4.1.1.1	PVC Sanitario Gris 110mm	ml	1.00	3,335	3,335

4.1.1.2	PVC Sanitario Gris 110mm perforado	ml	1.38	4,753	6,559
<b>4.1.2</b>	<b>Fittings</b>	<b>gl</b>	<b>1.00</b>	<b>21,557</b>	<b>21,557</b>
4.1.2.1	Codo PVC Sanitario Gris 110mm	un	3.00	3,804	11,413
4.1.2.3	Tee PVC Sanitario Gris 110x110mm	un	1.00	6,207	6,207
4.3.2.1	Tapa PVC 110mm	un	2.00	1,969	3,937
<b>4.1.3</b>	<b>Cámara de distribución</b>	<b>un</b>	<b>1.00</b>	<b>40,573</b>	<b>40,573</b>
<b>4.2</b>	<b>Impermeabilización</b>	<b>gl</b>	<b>1.00</b>	<b>170,285</b>	<b>170,285</b>
4.2.1	Geotextil	m2	27.33	2,514	68,706
4.2.2	Montículo perimetral	ml	15.14	338	5,110
4.2.3	HDPE e=0.5mm	m2	20.85	4,627	96,470
<b>4.3</b>	<b>Sistema de Recogida</b>	<b>gl</b>	<b>1.00</b>	<b>22,897</b>	<b>22,897</b>
<b>4.3.1</b>	<b>Canalizaciones</b>	<b>gl</b>	<b>1.00</b>	<b>11,996</b>	<b>11,996</b>
4.3.1.1	PVC Sanitario Gris 110mm	ml	1.63	3,335	5,437
4.3.1.2	PVC Sanitario Gris 110mm perforado	ml	1.38	4,753	6,559
<b>4.3.2</b>	<b>Fittings</b>	<b>un</b>	<b>1.00</b>	<b>10,901</b>	<b>10,901</b>
4.3.2.1	Tapón PVC 110mm	un	2.00	2,347	4,694
4.3.2.3	Tee PVC Sanitario Gris 110x110mm	un	1.00	6,207	6,207
<b>4.4</b>	<b>Medio Granular</b>	<b>m3</b>	<b>6.35</b>	<b>25,887</b>	<b>164,390</b>
4.4.1	Grava fina 3-12mm	m3	5.09	26,700	135,914
4.4.2	Grava gruesa 50-100mm	m3	1.26	22,600	28,476
<b>4.5</b>	<b>Cámara de control de nivel</b>	<b>un</b>	<b>1.00</b>	<b>106,134</b>	<b>106,134</b>
4.5.1	Cámara	un	1.00	81,713	81,713
4.5.2	Cadena	un	1.00	2,079	2,079
4.5.3	Tubo Flexible	un	1.00	22,342	22,342
<b>4.6</b>	<b>Vegetación</b>	<b>gl</b>	<b>1.00</b>	<b>154,929</b>	<b>154,929</b>
4.6.1	Typha Angustifolia	un	51.00	3,038	154,929
<b>4</b>	<b>Humedal construido HSSFV</b>				<b>701,806</b>
<b>4.1</b>	<b>Sistema de Distribución</b>	<b>gl</b>	<b>1.00</b>	<b>352,164</b>	<b>352,164</b>
<b>4.1.1</b>	<b>Canalizaciones</b>	<b>gl</b>	<b>1.00</b>	<b>12,850</b>	<b>12,850</b>
4.1.1.1	PVC Hidraulico 20mm	ml	3.58	553	1,978
4.1.1.2	PVC Hidraulico 20mm perforado	ml	9.95	1,093	10,872
<b>4.1.2</b>	<b>Fittings</b>	<b>gl</b>	<b>1.00</b>	<b>12,508</b>	<b>12,508</b>
4.1.2.1	Codo PVC Hidráulico 20mm	un	4.00	837	3,349

4.1.2.2	Tee PVC Hidráulico 20mm	un	5.00	910	4,549
4.1.2.3	Tapón PVC 20mm	un	6.00	768	4,610
<b>4.1.3</b>	<b>Bombeo de pulsos</b>	<b>gl</b>	<b>1.00</b>	<b>326,806</b>	<b>326,806</b>
4.1.3.1	Bomba de aguas residuales	un	2.00	60,144	120,287
4.1.3.2	Control de pulsos	un	1.00	39,556	39,556
4.1.3.3	Control de presión	un	1.00	40,498	40,498
4.1.3.4	Estanque de pulsos	un	1.00	126,465	126,465
<b>4.2</b>	<b>Impermeabilización</b>	<b>gl</b>	<b>1.00</b>	<b>155,594</b>	<b>155,594</b>
4.2.1	Geotextil	m2	10.23	3,231	33,061
4.2.2	Montículo perimetral	ml	9.16	338	3,092
4.2.3	HDPE e=0.5mm	m2	8.60	13,896	119,441
<b>4.3</b>	<b>Sistema de Recogida</b>	<b>gl</b>	<b>1.00</b>	<b>81,721</b>	<b>81,721</b>
<b>4.3.1</b>	<b>Canalizaciones</b>	<b>gl</b>	<b>1.00</b>	<b>47,719</b>	<b>47,719</b>
4.3.1	PVC Sanitario Gris 110mm perforado	ml	10.04	4,753	47,719
<b>4.3.2</b>	<b>Fittings</b>	<b>un</b>	<b>1.00</b>	<b>34,002</b>	<b>34,002</b>
4.3.2.2	Codo PVC Sanitario Gris 110x110mm	un	7.00	3,804	26,631
4.3.2.3	Cruz PVC Sanitario Gris 110x110mm	un	1.00	7,372	7,372
<b>4.4</b>	<b>Chimeneas de ventilación</b>	<b>gl</b>	<b>1.00</b>	<b>29,234</b>	<b>29,234</b>
4.4.1	PVC Sanitario Gris 110mm	ml	3.00	3,967	11,900
4.4.2	Gorro galvanizado ventilación 110mm	un	5.00	3,467	17,334
<b>4.5</b>	<b>Medio Granular</b>	<b>m3</b>	<b>1.51</b>	<b>25,160</b>	<b>38,087</b>
4.5.1	Arena gruesa	m3	1.21	25,800	31,245
4.5.2	Grava gruesa 50-100mm	m3	0.30	22,600	6,842
<b>4.6</b>	<b>Vegetación</b>	<b>gl</b>	<b>1.00</b>	<b>45,006</b>	<b>45,006</b>
4.6.1	Typha Angustifolia	un	13.00	3,462	45,006
<b>5</b>	<b>Desinfección</b>				<b>170,237</b>
5.1	Cámara cloradora	un	1.00	78,766	78,766
5.2	Cámara descloradora	un	1.00	79,082	79,082
5.3	PVC Sanitario Gris 110mm	ml	3.49	3,550	12,388
<b>6</b>	<b>Sistema de acumulación y bombeo</b>				<b>357,828</b>
6.1	Bomba	un	2.00	91,420	182,839

6.2	Estanque de acumulación 500 lt	un	1.00	126,465	126,465
6.3	Control de presión	un	1.00	44,987	44,987
6.4	PVC Sanitario Gris 110mm perforado	ml	1.00	3,537	3,537
<b>7</b>	<b>Sistema de distribución de Aguas Reutilizadas</b>				<b>21,787</b>
<b>7.1</b>	<b>Canalizaciones</b>	<b>gl</b>	<b>1.00</b>	<b>20,899</b>	<b>20,899</b>
7.1.1	PPR 20mm	ml	28.55	732	20,899
<b>7.2</b>	<b>Fittings</b>	<b>gl</b>	<b>1.00</b>	<b>889</b>	<b>889</b>
7.2.1	Codo PPR 20mm	un	2.00	296	593
7.2.2	Tee PPR 20x20mm	un	1.00	296	296
	<b>Subtotal</b>				
	<b>Costo Directo</b>				<b>2,943,434</b>
	<b>Utilidad (10%)</b>				<b>294,343</b>
	<b>Gastos Generales</b>				<b>883,030</b>
	<b>Total Neto</b>				<b>4,120,808</b>
	<b>IVA (19%)</b>				<b>782,953</b>
	<b>Total Presupuesto</b>				<b>4,903,761</b>