

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL
SANTIAGO-CHILE**



**EVALUACIÓN TÉCNICO Y ECONÓMICO DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE
AGUAS GRISES EN UNA LOCALIDAD AFECTADA POR SEQUÍA DE LA V
REGIÓN.**

JAVIER IGNACIO LEYTON SOTO

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL QUÍMICO**

**PROFESORA GUÍA: DRA. PAULA GUERRA
PROFESOR CORREFERENTE: DR. EDUARDO LEIVA**

SEPTIEMBRE 2023

Resumen

Chile en los últimos años ha presenciado como el cambio climático ha afectado a gran parte de los recursos hídricos que tiene el país, por lo que es necesario una búsqueda de nuevas alternativas capaces de mitigar la escasez hídrica. Frente a esto, aparece la opción de reutilización de aguas grises para disminuir la demanda, mantener la oferta y beneficiar a un grupo de personas que necesite de esta oportunidad.

De esta manera, se buscó analizar la factibilidad técnica y económica de un conjunto de sistemas de tratamiento y distribución de aguas grises en una localidad de la quinta región, a fin de proporcionar soluciones de mitigación de sequía, donde se seleccionó alternativas para el tratamiento de las aguas grises, tomando en consideración las necesidades de la localidad afectada, desarrollar el estudio técnico del sistema del conjunto de tratamiento y distribución de aguas grises, capaz de otorgar beneficios y soluciones de mitigación de sequía y desarrollar la evaluación económica del proyecto, tomando en consideración el carácter social del estudio.

Para cumplir con este objetivo, se seleccionó el lugar ubicado en Lo Vásquez, Casablanca, y se realizó una encuesta y un taller FODA a una población de 16 casas. Se estableció que el agua a tratar correspondería solo a aguas provenientes de lavadora debido a la menor intervención que presenta y un sistema individual por casas dada las condiciones que presentaba el alcantarillado. También se seleccionó la alternativa de tratamiento, que consiste en un sistema de distribución de aguas grises con una etapa de filtración, un biofiltro y desinfección, el cual se seleccionó por los eficientes porcentajes de remoción que permiten estar por debajo de los límites máximos de la Ley 21.075 de Chile, además de presentar bajos costos de operación y mantenimiento.

En el diseño del tratamiento, se contabilizó el dimensionamiento de una bomba, seleccionando dos de ellas que cumplen con los requerimientos mínimos para que pueda ser operada. En cuanto al sistema de filtración y biofiltro, se realizaron los balances pertinentes, con el objetivo de obtener un agua con baja turbiedad y baja concentración de sólidos suspendidos y demanda bioquímica de oxígeno siendo capaz de ser utilizada para riego o limpieza.

En la evaluación económica se consideraron los factores sociales del proyecto, donde se obtuvo un CAPEX y un OPEX social en base anual de 21 mil y 4 mil dólares aproximados respectivamente. Teniendo en cuenta estos valores, se procedió a plantear los escenarios económicos con un flujo de caja puro y financiado para un consumo de agua proveniente de empresas Esval y otro para camiones aljibes y se utilizó el indicador de valor actual neto social para obtener un valor de -41 mil y -33 mil dólares aproximados para la empresa Esval y 132 y 8 mil dólares aproximados para los camiones aljibes. Considerando el contexto social, se evaluó si los casos presentaban sustentabilidad y se determinó que el

caso proveniente de Esval es más conveniente dado al impacto social-ambiental que presenta, a pesar de entregar un ahorro menor. Dado esto, el valor del indicador VANS corresponderá al valor mínimo que se debe pagar para que el proyecto sea ejecutado y si bien, existe un flujo de caja negativo, este seguirá considerándose rentable dado a los beneficios que se generar para mitigar la escasez hídrica.

Resolutivamente, a través de los estudios realizados, el sistema de tratamiento de aguas grises es viable dado a los cumplimientos técnicos que presenta y a los beneficios ambientales y sociales que entrega a la comunidad de estudio.

Abstract

Chile has witnessed in recent years how climate change has affected a significant portion of the country's water resources, making it necessary to explore new alternatives capable of mitigating water scarcity. In response to this, the option of reusing greywater emerges as a means to reduce demand, maintain supply, and benefit those who require this opportunity.

In this way, the feasibility, both technically and economically, of a set of greywater treatment and distribution systems in a locality in the fifth region was examined in order to provide drought mitigation solutions. Alternatives for greywater treatment were selected, taking into account the needs of the affected locality. The technical study of the greywater treatment and distribution system was developed to offer benefits and drought mitigation solutions, followed by an economic evaluation of the project, considering its social nature.

To achieve this objective, the location chosen was Lo Vásquez, Casablanca, and a survey and SWOT analysis were conducted with a population of 16 households. It was determined that only wastewater from washing machines would be treated due to its limited complexity, and an individual system was selected for each house due to sewerage system conditions. The chosen treatment alternative involves a greywater distribution system with filtration, a biofilter, and disinfection stages. This alternative was selected for its efficient removal rates, keeping below the maximum limits set by Chile's Law 21.075. Additionally, it boasts low operating and maintenance costs.

In the design of this treatment, pump sizing was considered, and two pumps meeting the minimum requirements for operation were selected. As for the filtration and biofilter system, relevant balances were performed to achieve water with low turbidity, low concentration of suspended solids, and biochemical oxygen demand, making it suitable for various applications as desired by the owner.

In the economic evaluation, social factors were considered. A social CAPEX and OPEX of approximately \$21,000 and \$4,000 USD, respectively, were obtained on an annual basis. Considering these values, economic scenarios were formulated with a pure and funded cash flow for water consumption from Esval companies and another for water trucks. The social net present value indicator resulted in approximately -\$41,000 and -\$33,000 USD for Esval and approximately \$132,000 and \$8,000 USD for the water trucks. Considering the social context, sustainability was evaluated, and it was determined that the case involving Esval is more favorable due to its social and environmental impact, despite offering lower savings. Therefore, the VANS indicator value corresponds to the minimum amount that must be paid for the project to be executed. Although there is a negative cash flow, it continues to be considered profitable due to the benefits it generates in mitigating water scarcity.

In conclusion, the greywater treatment system proves viable, supported by technical compliance and its positive environmental and social impact on the studied community.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi profesora guía Paula Guerra y al proyecto ANID FSEQ210038 del Fondo de Investigación Estratégico en sequía por darme la oportunidad de realizar un proyecto el cual busca un propósito sustentable capaz de entregar soluciones a un problema que hoy en día es difícil combatir como lo es la escasez hídrica. Este trabajo lo tome con la mejor motivación y espero que pueda ayudar a comunidades futuras, en donde agradezco a Christopher y Claudia de la población Lo Vásquez, quienes fueron fundamentales para poder desarrollar parte del trabajo y a quienes espero que dicho documento pueda entregarle un beneficio durante el tiempo.

También, quiero agradecer a mi Padre, a mi Madre y a mi hermano quienes fueron parte de todo mi proceso universitario, en donde me encontré con muchas alegrías como también muchas dificultades, que, con el apoyo familiar, constancia y esfuerzo, logro ser mucho más agradable dentro de la universidad. Adicionalmente, dar las gracias a mis abuelos, tíos y primos quienes siempre me preguntaron y estuvieron presente en esta etapa. De igual forma darle las gracias a mi perro, el Kira, quien llego en este último período de universidad y fue fundamental para brindarme alegrías en las noches que me encontraba realizando mi memoria.

Por otro lado, quiero dar un agradecimiento especial a toda la gente que conocí dentro y fuera de la universidad, ya que considero que han sido parte fundamental en cuanto a la formación como persona que soy y en como he aprendido de la vida por las instancias que he presenciado con todos ellos, quienes me han entregado apoyos incondicionales en los momentos tristes y celebraciones épicas en las instancias de felicidad. Si bien son muchas personas, quiero nombrar a quienes marcaron mi etapa universitaria; Mono, Ensalah, Gus, Lito, Piojo, Escuma, Tomi, Pabloque, Isa, Yosi, Catilla, Flopy, Paula, Vale, Anto, Sofi, Carla y a mi Team favorito SIC MUNDUS, muchas gracias de todo corazón.

Finalmente quiero dar menciones honrosas a cosas que me ayudaron a ser una persona más feliz y menos estresada. Primero a mi bicicleta, que ha sido mi medio de transporte durante los últimos 4 años y me ha dado la posibilidad de conocer aventuras y libertades que antes no me permitía hacer. Segundo a la música Techno que la conocí en esta etapa universitaria y aprendí a sentir y desconectarme a través de sus sonidos y fueron mi apego día a día para llegar a la universidad todas las mañanas que tenía clase, y finalmente a mi querido anime One Piece, que llevo más de 12 años viendo sus capítulos todos los domingos de cada semana y siempre me ha sacado una carcajada.

Índice

1.	Introducción	1
1.1.	Antecedentes de la sequía	1
1.2.	Oferta y demanda del agua	3
2.	Objetivos y alcances	6
2.1.	Objetivo General	6
2.2.	Objetivos específicos	6
2.3.	Alcance del proyecto	6
3.	Estado del arte	7
3.1.	Aguas grises.....	7
3.1.1.	Definición de aguas grises.....	7
3.1.2.	Composición de aguas grises	8
3.1.3.	Regulaciones y usos de agua gris	11
3.1.4.	Calidad de aguas grises.....	12
3.2.	Tratamiento de aguas grises	15
3.2.1.	Alternativas de procesos de tratamiento de agua gris	17
3.2.1.1.	Proceso de filtración	17
3.2.1.2.	Sistema de biofiltro	21
4.	Metodología	24
4.1.	Participación de la población.....	24
4.2.	Selección de tratamiento	26
4.3.	Diseño e indicadores socioeconómicos	27
5.	Resultados y Discusión	32
5.1.	Formulación de estrategia	32
5.1.1.	Análisis estratégico.....	32
5.1.2.	Análisis Interno.....	32
5.1.3.	Análisis Externo	33
5.1.4.	Estrategia del proyecto	34
5.2.	Encuesta social	36
5.3.	Selección de tratamiento	38
5.4.	Diseño del tratamiento de aguas grises.....	39
5.4.1.	Criterios de diseño.....	39
5.4.2.	Diagrama de flujo del proceso (PFD).....	40
5.4.3.	Descripción de flujo del proceso	41

5.4.4.	<i>Balance de materia</i>	41
5.4.5.	<i>Diseño de la bomba, sistema de filtración y biofiltro</i>	42
5.4.5.1.	<i>Bomba</i>	43
5.4.5.2.	<i>Sistema de filtración</i>	47
5.4.5.3.	<i>Biofiltro</i>	49
5.5.	<i>Estimación de inversiones y costos</i>	51
5.5.1.	<i>Estimación de las inversiones (CAPEX)</i>	51
5.5.2.	<i>Estimación de los costos de operación (OPEX)</i>	54
5.6.	<i>Evaluación económica</i>	56
5.6.1.	<i>Bases de la evaluación económica</i>	56
5.6.1.1.	<i>Estructura de ingresos</i>	57
5.6.2.	<i>Planteamiento de escenarios</i>	59
5.6.3.	<i>Flujos de caja</i>	59
5.6.4.	<i>Análisis de resultados</i>	60
6.	<i>Conclusiones y recomendaciones</i>	63
7.	<i>Referencias</i>	65
8.	<i>Anexos</i>	71

Lista de tablas

Tabla 1: Demanda hídrica en la región de Valparaíso.....	4
Tabla 2: Balance hídrico actual con proyección de 15 años sobre la demanda y oferta en m ³ /s ..	5
Tabla 3: Contaminantes más comunes de las fuentes originarias de agua gris.	8
Tabla 4: Rango de concentraciones que se encuentran los parámetros de aguas grises.	10
Tabla 5: Límites permitidos para usos Urbanos.	12
Tabla 6: Límites permitidos para riego áreas recreativas y de servicios.	13
Tabla 7: Límites permitidos para riego uso Ornamental.	13
Tabla 8: Normativas internacionales respecto al sector de América del sur y Centroamérica.	13
Tabla 9: Normativas internacionales respecto al sector de América del Norte, Europa, Asia y Oceanía	14
Tabla 10: Porcentajes de remoción utilizando un sistema de filtración de estudio 1	20
Tabla 11: Porcentajes de remoción utilizando un sistema de filtración de estudio 2	20
Tabla 12: Porcentajes de remoción utilizando un sistema de biofiltro estudio 3.	22
Tabla 13: Porcentajes de remoción utilizando sistemas de biofiltros con diferentes tiempos de retención estudio 4.	23
Tabla 14: Preguntas realizadas en la encuesta para los vecinos de la población de Lo Vásquez.....	25
Tabla 15: Consumo de agua por kilo de ropa de diferentes fuentes bibliográficas.	26
Tabla 16: Factores sociales de la mano de obra.	30
Tabla 17: Respuestas de encuesta realizada a la población de Lo Vásquez.	37
Tabla 18: Resultados de consumo de agua por lavado anual, mensual y por lavado en L. ...	38
Tabla 19: Calidad de aguas grises para el proyecto.....	40
Tabla 20: Porcentajes de remoción respecto a lo que entra en los sistemas de filtración y biofiltro	42
Tabla 21: Concentraciones iniciales y finales de los sistemas de filtración y biofiltro.	42
Tabla 22: Alturas de casa que consume más y menos agua de la lavadora.	43
Tabla 23: Presiones manométricas obtenidas de casa que consume más y menos agua de la lavadora.....	44
Tabla 24: Datos y cálculos de la tubería (en el sistema).	44
Tabla 25: Propiedades de la tubería a utilizar.	44
Tabla 26: Propiedades del flujo a tratar.	45
Tabla 27: kl asociado a cada accesorio y valor total.	46
Tabla 28: Resultados área y volumen del tambor.	48
Tabla 29: Tabla resumen dimensiones sistema de filtración.	49
Tabla 30: Dimensiones del biofiltro.	49
Tabla 31: CAPEX social del proyecto contabilizado por una casa (en dólares).	52
Tabla 32: CAPEX social del proyecto contabilizando las 16 casas en dólares.	53
Tabla 33: Datos correspondientes al sueldo del supervisor de las obras.	53
Tabla 34: Costos de permisos para sistemas de tratamiento.....	53
Tabla 35: Datos correspondientes al sueldo del capacitador.	54
Tabla 36: CAPEX social total del proyecto en dólares.	54

Tabla 37: Tarifas correspondientes al suministro de energía de Casablanca, región de Valparaíso.	55
Tabla 38: Costos de suministros con sus dosis periódicas de reposición.	55
Tabla 39: OPEX social anual del proyecto en el primer año contabilizado por una casa. ...	56
Tabla 40: OPEX social total del proyecto en dólares.	56
Tabla 41: Criterios para la evaluación económica.	56
Tabla 42: Tarifa consumo de agua en Casablanca con valor del consumo total de las casas de la población de Lo Vásquez.	58
Tabla 43: Tarifa consumo de agua por camiones aljibes.	58
Tabla 44: Resultados de indicadores en los flujos de caja para caso de consumo de agua proveniente de Esval.	59
Tabla 45: Resultados de indicadores en los flujos de caja para caso de consumo de agua proveniente de camiones aljibes.	60
Tabla 46: Resultados de Altura variando la velocidad y factor de fricción.	72
Tabla 47: Flujo de caja puro del proyecto escenario de consumo de agua proveniente de la empresa Esval del periodo 0 al 9.	73
Tabla 48: Flujo de caja puro del proyecto escenario de consumo de agua proveniente de la empresa Esval del periodo 10 al 20.	73
Tabla 49: Flujo de caja puro del proyecto escenario de consumo de agua proveniente de camiones aljibes del periodo 0 al 9.	74
Tabla 50: Flujo de caja puro del proyecto escenario de consumo de agua proveniente de camiones aljibes del periodo 10 al 20.	74
Tabla 51: Flujo de caja financiado del proyecto escenario de consumo de agua proveniente de la empresa Esval del periodo 0 al 9.	75
Tabla 52: Flujo de caja financiado del proyecto escenario de consumo de agua proveniente de la empresa Esval del periodo 10 al 20.	75
Tabla 53: Flujo de caja financiado del proyecto escenario de consumo de agua proveniente de camiones aljibes del periodo 0 al 9.	76
Tabla 54: Flujo de caja financiado del proyecto escenario de consumo de agua proveniente de camiones aljibes del periodo 10 al 20.	76

Lista de figuras

Figura 1: Gráfico sobre la evaluación de la precipitación anual en Chile.	1
Figura 2: Disponibilidad del agua en Chile	2
Figura 3: Gráfico sobre la distribución de la demanda consuntiva en el año 2015.	4
Figura 4: Estimación de las aguas grises generadas producidas por día	7
Figura 5: Zonas del proceso de Filtración	18
Figura 6: Mecanismos de transporte del sistema de filtración	19
Figura 7: Representación de biofiltro Flujo Horizontal y vertical.	22
Figura 8: Mapa Conceptual de la metodología realizada en el proyecto.	24
Figura 9: Mapa de la población Lo Vásquez.	36
Figura 10: PFD del proceso propuesto para casas que ocupan la lavadora con frecuencia cada cuatro o cinco días.	40
Figura 11: PFD del proceso propuesto para casas que ocupan la lavadora con frecuencia cada uno, dos o tres días.	40
Figura 12: Curva del sistema, Curvas de la bomba y puntos de operación para casas con más y menos consumo de agua. El proveedor de la bomba 1 corresponde a BestFlow y su modelo es RS 20/12Z, mientras que el de la bomba 2 es de aiguapres y su modelo es Jolly Pump 12.	47
Figura 13: Gráfico de Moody, con sus respectivas intercepciones para obtener el coeficiente de fricción.	71

Nomenclatura

Símbolo	Significado	Unidades
SST	Sólidos suspendidos totales	mg/L
CF	Coliformes Fecales	UFC/100 mL
DQO	Demanda química de oxígeno	mg/L
DBO ₅	Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L
SSV	Sólidos suspendidos volátiles	mg/L
NT	Nitrógeno total	mg/L
FT	Fósforo total	mg/L
HLR	Razón de carga hidráulica	m/d
VANS	Valor Actual Neto Social	-
CAUE	Costo Anual Uniforme Equivalente	-
TIR	Tasa Interna de Retorno	-
PRC	Período de Recuperación del Capital	-

1. Introducción

Se presentará el contexto de la escasez hídrica que ocurre en el país y los principales puntos que se ven alterados a raíz de esta problemática.

1.1. Antecedentes de la sequía

Desde los últimos 50 años el agua cada vez se va considerando como un recurso cada vez más escaso para la humanidad (Santibáñez, 2016). Es por esto que el escenario de los recursos hídricos a nivel mundial ha repercutido de tal manera, que la disponibilidad de este ha mantenido a las entidades gubernamentales y privados al tanto, generando un problema global que se ha profundizado en el último tiempo (Ángel et al., 2019). En efecto, la tendencia a que el agua siga en un estado crítico se basa principalmente en el crecimiento demográfico, desarrollo socioeconómico y cambios en los patrones de consumo, en donde continentes como Asia y América del norte son pioneras en los niveles de extracción del agua per cápita (UNESCO, 2023).

Chile, por su lado, se encuentra en un nivel de estrés hídrico alto colocándolo como uno de los países más afectado en esta condición en Latinoamérica (Hofste et al., 2019). Esto se puede ver reflejado en el país hace más de una década, debido a los diferentes aspectos que dan paso a una sequía en grandes proporciones, principalmente por los déficits de precipitaciones que están dentro del 20 al 44%, además de una disminución en los niveles de los embalses y de aguas subterráneas (Blanco, 2022). De hecho, la precipitación anual en Chile en el año 2021 tuvo una baja del 43% en promedio, convirtiéndose en el segundo año más seco desde el 1961. Adicionalmente, la precipitación total anual en el país está disminuyendo a razón de un 4% por década durante los últimos 61 años y 8% si se consideran los últimos 41 años. Esto se puede ver reflejado en la Figura 1 de evolución de la precipitación anual en Chile (Gutiérrez, 2022).

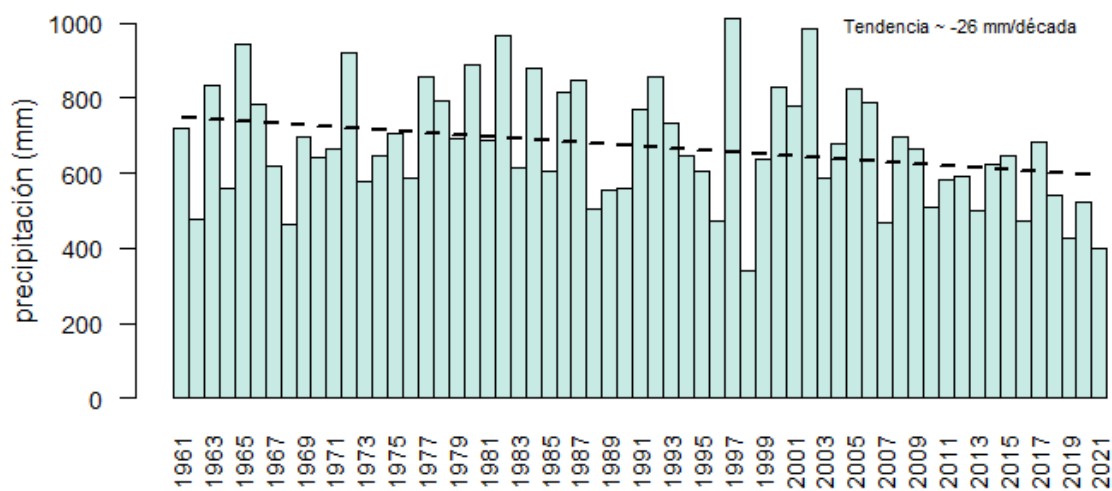


Figura 1: Gráfico sobre la evaluación de la precipitación anual en Chile (Gutiérrez, 2022).

Por otro lado, podemos dar cuenta que el país cuenta con un total aproximado de 51.000 m³ de recursos hídricos por persona al año, un valor muy superior al umbral de desarrollo sostenible de 2.000 m³ por persona al año, sin embargo, la disponibilidad de agua y número de habitantes no es equitativa, ya que desde la región de O'Higgins hacia el sur, el umbral del desarrollo sostenible se supera holgadamente ya que esta zona geográfica comprende un 35% de la población total del país, por lo que la mayor parte de los habitantes se encuentra distribuidos en espacios que sufren escasez hídrica (refiérase a las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta, Atacama, Coquimbo, Valparaíso y la Metropolitana.(Leiva et al., 2020)). En la Figura 2 se denota lo anteriormente comentado.

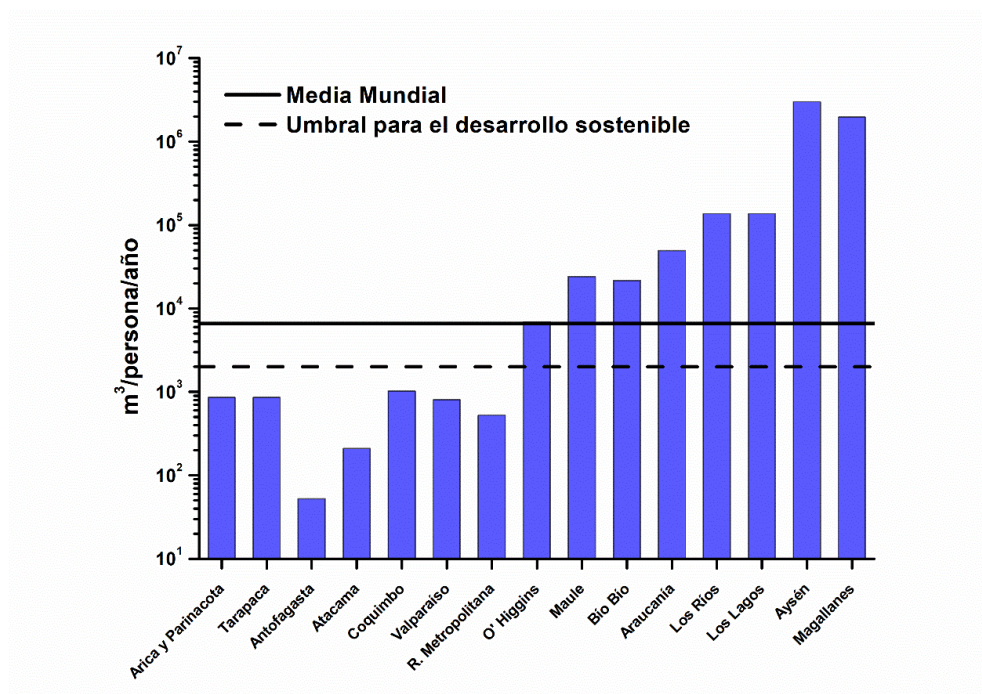


Figura 2: Disponibilidad del agua en Chile. Adaptado de (MOP, 2011) .

La situación del agua en Chile es un desafío que va al alza, el cual es necesario hacer frente para mitigar la escasez hídrica del país. Es por esto que el sistema de naciones unidas en Chile busca realizar metas para el año 2030, a fin de reconfortar las medidas que hoy en día se están realizando. Dentro de estas metas encontramos la actualización del marco legal del derecho humano al agua y saneamiento, fortalecimiento en los sistemas de cuencas por medio del manejo integrado, sistemas informativos para la toma de decisiones promoviendo la participación ciudadana, invertir en infraestructuras no convencionales que sean capaces de incluir soluciones basadas en la naturaleza y sensibilizar a la ciudadanía a través de tecnologías innovadoras en ahorro y uso eficiente del agua, siendo este último punto esencial para la integración de temas hídricos y una gestión hídrica sostenible, ya que puede dar paso a una cultura responsable y comprometida en la búsqueda de soluciones a la escasez (Sistema de las Naciones Unidas, 2021).

1.2. Oferta y demanda del agua

Durante los últimos 30 años la demanda de agua se ha duplicado en relación a sus valores, dado al crecimiento económico y a los mayores niveles de desarrollo que se han alcanzado, lo que genera una expansión de este recurso que en términos globales pareciera volverse más escaso. (Ministerio del Interior y Seguridad Pública, 2015).

Hoy en día, es necesario desarrollar nuevas culturas sobre el tratado del agua con la realización de un marco legal capaz de hacer frente a las problemáticas que se sobreponen en el país (Macpherson & O'Donnell, 2015). Por ejemplo, el uso de los recursos hídricos ha presentado una alta productividad en las zonas donde se concentra la escasez hídrica, siendo la matriz productiva la agricultura y la minería. En efecto, se espera que la demanda del agua tenga un aumento a largo plazo, donde, además, existe una proyección que para el año 2050, haya un incremento entre un 20 y 30% con respecto al nivel actual (Leiva et al., 2020). De esta forma, las demandas del agua van tomando efecto no solo en la disponibilidad de ésta, sino también, en el aumento en los niveles de vulneración de las poblaciones (aluviones, sequías) lo que implica que se debe actuar directamente con una educación y cultura del agua, permitiendo desafiar de manera más integra los efectos del cambio climático y escasez hídrica (Baeza & Torres, 2020)

Ahora, en términos cuantitativos, la demanda hídrica total tiene un valor aproximado de $3,8 \cdot 10^{11} \text{ m}^3/\text{año}$ a nivel nacional y este se divide principalmente en los usuarios y tipo de uso, siendo estos los consuntivos que corresponden al consumo de agua para cualquier actividad, los no consuntivos que son aquellos que permiten emplear agua sin consumirla para luego restituirla y evapotranspirativa, que nace directamente de la evaporación de agua proveniente desde el suelo o de superficies vegetales vivas o muertas (Baeza & Torres, 2020; Bravo, 2016). A través de estos datos, y considerando las estimaciones de la demanda actual y proyecciones futuras realizadas en el año 2015 por el ministerio de obras públicas, es posible ver las evaluaciones que se tienen por región. En Valparaíso, por ejemplo, se pueden ver las proyecciones de la demanda agrícola (consuntivo), la cual tiene un aumento del 16% entre los años 2015 y 2040, mientras que la demanda industrial aumentaría en un 26% al año 2030. Esto es posible denotarlo en la Tabla 1 del resumen de demanda hídrica de la región de Valparaíso (Hídrica consultores & Aquaterra, 2017)

Tabla 1: Demanda hídrica en la región de Valparaíso (Hídrica consultores & Aquaterra, 2017).

Demanda Consuntiva	2015	2030	2040
Agua Potable Urbana	102.003	112.158	117.727
Agua Potable Rural	10.766	12.707	12.495
Agrícola	672.337	736.452	779.568
Pecuario	3.378	5.320	6.521
Minero	47.571	48.169	42.604
Industrial	16.554	19.302	20.911
Generación eléctrica	221.370	169.880	174.115
Total	1.073.979	1.103.489	1.153.939

Adicionalmente se presenta en la Figura 3, de la distribución de la demanda consuntiva del año 2015, donde es posible observar que el sector agrícola ocupa más del 60% del agua (Hídrica consultores & Aquaterra, 2017).

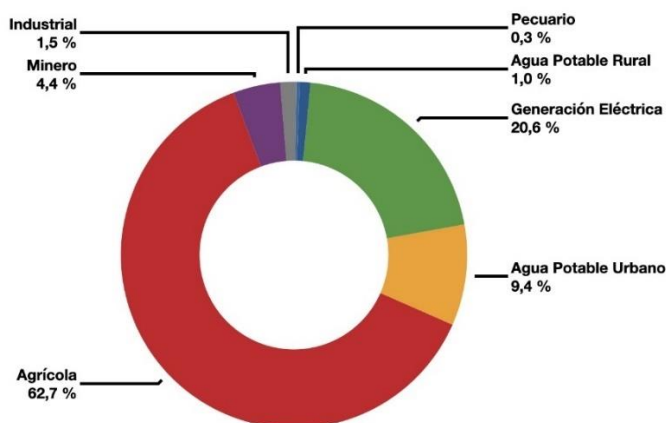


Figura 3: Gráfico sobre la distribución de la demanda consuntiva en el año 2015 (Hídrica consultores & Aquaterra, 2017).

Cabe destacar que el sector agrícola es la actividad que requiere del riego, por lo que, al existir un aumento de demanda, la relevancia que se necesita para el riego también aumenta. En este caso, Valparaíso se proyecta con una alta necesidad de buscar alternativas de riego para disminuir la demanda de agricultura. De hecho, casi la totalidad de las regiones se proyecta con un aumento de demanda de esta actividad y en el mejor de los casos esta se mantendrá, a fin de que la producción no baje ya que es una de las actividades más importantes del país. Este aumento se ve reflejado principalmente por las mayores superficies agrícolas que se estiman al ser plantadas (regiones con menor actividad agrícola) o por los grados actuales de tecnificación en el riego (regiones con mayor actividad agrícola) (Hídrica consultores & Aquaterra, 2017).

En cuanto a la oferta, el país presenta 101 cuencas hidrográficas, 1.251 ríos y 12.784 cuerpos de agua, correspondientes a lagos y lagunas y 24.114 glaciares. Adicionalmente se tiene una precipitación promedio a nivel país de 1.525 mm/año. Es posible dar cuenta de que Chile es un país privilegiado en cuanto a materia de recursos hídricos, sin embargo, como se mencionó en el punto anterior, los valores presentados son desiguales en términos regionales, afectando principalmente al sector centro norte y norte de país (Baeza & Torres, 2020). De hecho, se registra un déficit en la oferta y demanda entre las regiones de Arica y Parinacota y la Región Metropolitana que se espera que alrededor de 15 años más siga aumentando, tal como se puede apreciar en la Tabla 2 (Ministerio del Interior y Seguridad Pública, 2015).

Tabla 2: Balance hídrico actual con proyección de 15 años sobre la demanda y oferta en m³/s (Ministerio del Interior y Seguridad Pública, 2015)..

Región	Demanda actual m ³ /s	Oferta actual m ³ /s	Balance actual m ³ /s	Demanda 15 años m ³ /s	Oferta 15 años m ³ /s	Balance 15 años m ³ /s
XV-I	16,7	11,9	-7,4	26,3	11,9	-17,0
II	23,0	0,9	-22,0	34,8	0,9	-33,8
III	16,7	1,9	-14,8	22,4	1,9	-20,5
IV	35,0	22,2	-12,8	41,8	21,1	-20,7
V	55,5	40,7	-27,4	64,2	36,6	-38,7
RM	116,3	103,0	-35,6	124,9	92,7	-51,4
VI	113,5	205,0	38,7	119,1	184,5	18,7
VII	177,1	767,0	442,5	184,5	690,3	383,6
VIII	148,0	1.638,0	1.249,1	246,0	1.474,2	1.033,3
IX	25,5	1.041,0	767,3	38,3	936,9	675,4
XIV-X	12,0	5.155,0	3.905,8	17,9	4.639,5	3.508,1
XI	24,9	10.134,0	8.284,9	27,0	10134,0	8.282,9
XII	8,4	10.124,0	8.394,6	15,7	10.124,0	8.387,2
Total País	772,6	29.244,6	22.962,7	962,8	28.348,5	22.107,1

A través de los factores entregados de los recursos hídricos, la demanda y oferta del agua, es necesario dar una solución en cuanto al uso del agua y como esta puede ser utilizada de manera más eficiente frente a las problemáticas que encontramos dentro del país. Para esto, podemos disminuir la demanda del agua, dándole una reutilización a las aguas que provienen del uso doméstico de las personas (no considera aguas negras). Dicha reutilización puede ser, a través de un tratamiento que puede dar las necesidades que requiera un hogar, una población e incluso una región dependiendo de las limitaciones del proyecto.

De esta forma se buscará en este trabajo analizar la factibilidad técnica y económica de un sistema de tratamiento capaz de entregar un agua que pueda ser utilizada para usos que sean permitidos dentro del marco legal como lo es el riego o la limpieza, donde será necesario determinar una alternativa de tratamiento, un diseño capaz de cumplir con los criterios de los equipos seleccionados y una evaluación económica que sea rentable tanto financiera como socialmente.

2. *Objetivos y alcances*

A continuación, se presentará el objetivo general del trabajo con sus respectivos objetivos específicos y alcance del proyecto.

2.1. *Objetivo General*

Analizar la factibilidad técnica y económica de un conjunto de sistemas de tratamiento y distribución de aguas grises en una localidad de la quinta región, a fin de proporcionar soluciones de mitigación de sequía.

2.2. *Objetivos específicos*

- Seleccionar alternativas para el tratamiento de las aguas grises, tomando en consideración las necesidades de la localidad afectada.
- Desarrollar el estudio técnico del sistema del conjunto de tratamiento y distribución de aguas grises, capaz de otorgar beneficios y soluciones de mitigación de sequía.
- Desarrollar la evaluación económica del proyecto, tomando en consideración el carácter social del estudio.

2.3. *Alcance del proyecto*

Este trabajo se realizó mediante un estudio técnico y económico para comprobar la factibilidad de implementar un conjunto de sistemas en una localidad de la V Región que presenta problemas de escasez hídrica. El proyecto se basó en la reutilización de aguas grises de lavadora con la colaboración de la población de 16 casas ubicadas en Lo Vásquez, comuna de Casablanca, quienes participaron paralelamente en el proyecto, facilitando recursos como planos de alcantarillado y encuestas realizadas por ellos con el fin de diseñar el sistema de tratamiento que sea capaz de tratar las aguas y poder ser reutilizadas para la conveniencia propia de cada una de las familias. Cabe destacar que el tratamiento de aguas grises se evaluó a través de la normativa chilena, Ley 21.075, la cual determina los parámetros que el agua debe tener para que pueda ser reutilizada.

3. Estado del arte

En este apartado se explorará el estado del arte respectivo a los tratamientos de aguas grises a fin de tener un análisis exhaustivo que permita contextualizar y comprender las investigaciones previas relacionadas al tema.

3.1. Aguas grises

Para comprender los tratamientos de aguas grises, se dará una descripción del agua gris con sus principales características y funcionalidades que se les puede dar dentro del rubro como tipo de agua.

3.1.1. Definición de aguas grises

La definición de aguas grises varía según el autor, sin embargo, la mayoría concuerda en que son aguas residuales domésticas provenientes de lavadoras, lavamanos, duchas y tinas cuyo nivel de contaminación permite su reutilización con un menor grado de tratamiento en relación a las aguas negras, que provienen de inodoros y urinarios (Eriksson et al., 2002). Algunas definiciones también excluyen las aguas del lavaplatos de las aguas grises, debido a su alta concentración de aceites y grasas (Morel & Diener, 2006). Dentro de estas aguas encontramos dos subdivisiones, las aguas claras y oscuras, siendo la primera las aguas provenientes de duchas y lavamanos que presentan una menor carga en cuanto a materia orgánica y la segunda correspondiente a las de lavadoras y cocina, teniendo un porcentaje mayor en el contenido orgánico (Leiva et al., 2020).

Estas aguas por lo general se constituyen entre el 50 al 70% del total de las aguas que provienen del hogar (AIDIS, 2017; Leiva et al., 2020). En la Figura 4 observamos la cantidad de agua producida por día, donde es posible denotar que las tinas y duchas aportan el mayor porcentaje, mientras que el lavamanos es el que menos genera. Cabe señalar que el estudio fue realizado contabilizando a una familia de cuatro personas.



Figura 4: Estimación de las aguas grises generadas producidas por día (AIDIS, 2017).

3.1.2. Composición de aguas grises

Las composiciones del agua gris dependen del origen, la calidad de agua que se tenga en el sector o por el funcionamiento de las personas en la casa, ya sea por los productos de limpieza ocupado o por la cantidad de gente en que vive dentro de la vivienda (Leiva et al., 2020), sin embargo, dentro de sus principales compuestos encontramos sustancias ácidas y alcalinas, sólidos suspendidos totales (pelos, sobras de comida, pelusas, etc.), grasas, aceites, productos químicos y sintéticos y organismos patógenos (Rakesh et al., 2020). Dependiendo de los componentes que posee el agua, hay casos en donde esta puede aportar nutrientes a las plantas, no obstante, es importante considerar la calidad en la que se encuentra el agua, ya que todas las plantas requieren de cantidades y distintos tipos de nutrientes y al existir una composición muy elevada del componente, puede causar severos daños a la flora (Al-Zou'by et al., 2017).

De esta manera es importante conocer y entender las diferentes composiciones de aguas grises que hay en las distintas fuentes que lo generan, por ende, se presenta la Tabla 3, correspondiente a los contaminantes que se presentan más a menudo en los recipientes que lo originan (Stevens, 2021).

Tabla 3: Contaminantes más comunes de las fuentes originarias de agua gris (Stevens, 2021).

Fuente de agua gris	Contaminantes más comunes
Lavadora	Sólidos suspendidos, material orgánico, aceite y grasa, cloro, sodio, nitratos y fosfatos del detergente, aumento de la salinidad, niveles altos de turbiedad, pH
Cocina (Lavavajillas y lavaplatos)	Material orgánico y sólidos en suspensión, bacterias, aumento de salinidad, pH, grasas y aceites del detergente
Lavamanos y ducha	Bacterias, altos niveles de turbiedad, materia orgánica y sólidos en suspensión, aceite y grasa, residuos de jabón y detergente.

Considerando las fuentes de agua gris más comunes, es indispensable conocer los parámetros con los que se mide la calidad del agua gris, por lo que a continuación se describirá cada uno de ellos.

- **Turbiedad:** Proviene por la acumulación de partículas en suspensión o coloides que, al encontrarse suspendidas, el agua pierde nitidez, dejándolo con un tono más oscuros (Huanacuni, 2021). Corresponde al indicador con más aceptación por parte de los usuarios que lo utilizan ya sea en agua potable o reutilización. Una turbiedad baja mantiene una apariencia clara y translúcida mientras que una alta turbiedad es de apariencia opaca y brumosa (Torres, 2017). Se mide en NTU.

- Demanda Química de Oxígeno (DQO): Cuantifica el oxígeno equivalente de la materia orgánica que está presente en las aguas residuales susceptible a ser oxidada químicamente (Franco, 2007). Un mayor valor de DQO, es sinónimo de tener un agua mucho más contaminada (Huanacuni, 2021). Se mide en mg/l.
- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅): Cuantifica cuanto oxígeno pueden consumir las bacterias (aeróbicas o anaeróbicas), hongos y plancton durante el proceso en donde las sustancias orgánicas se degeneran en la oxidación bioquímica (Huanacuni, 2021). Se mide en mg/l.
- Sólidos suspendidos totales (SST): Indicador principal de sólidos cuando estos presentan diámetros mayores a 1 μm (dependiendo del método a utilizar, los diámetros pueden llegar a los 0,45 μm). A partir de estos sólidos es como se va produciendo la turbiedad (Torres, 2017). Pueden ser arcillas coloidales o partículas orgánicas que dificultan el proceso de sedimentación (Franco, 2007). Se mide en mg/l.
- Nitrógeno total: Se encarga de darle el crecimiento a las plantas y microorganismos (Franco, 2007). Este compuesto por nitrógeno orgánico, amoníaco, nitrito y nitrato (Tchobanoglous et al., 2003). Se mide en mg/l.
- Fósforo total: Elemento perteneciente al grupo no metálico. Cumple funciones similares a los del nitrógeno. Un alto nivel de fosfato en las aguas puede provocar eutrofización y proliferación en estas, causándoles la muerte (Franco, 2007). Se mide en mg/l.
- Tensioactivos: Compuestos orgánicos que pueden cambiar la tensión superficial o interfacial de un sistema. Interfieren en el intercambio de gas en los cuerpos de agua, generando espuma. Dentro de los productos que los presentan se encuentran los artículos de limpieza personal, detergentes y fármacos (Morillo et al., 2019).
- Coliformes totales: Indica la presencia de patógenos en las aguas residuales (Tchobanoglous et al., 2003). Son bacterias de forma bacilar que producen ácido y gas a partir de la fermentación de lactosa. son oxidasas negativas y presentan actividad enzimática β -galactosidasa. Entre las más comunes encontramos la *Escherichia coli*, *Citrobacter*, *Enterobacter* y *Klebsiella* (Larrea et al., 2012).

- Coliformes fecales: Corresponde a bacterias que provienen del tracto intestinal de un mamífero. Cuando esta se encuentra presente en el agua, se considera contaminación fecal con una alta probabilidad de patógenos (Franco, 2007). La *Escherichia coli* es el indicador más frecuente dentro de la contaminación fecal (Larrea et al., 2012).
- pH: Mide la acidez o la alcalinidad que tiene una solución. Un pH 7 corresponde a un valor neutro. Cuando el valor es mayor a 7 corresponde a alcalinidad mientras que menor a 7 a acidez. El pH debe estar entre el rango de 6,5 a 8,5. Si hay un bajo pH, puede provocar toxicidad en los suelos como corrosión en tuberías de disposición (Torres, 2017).

Estos parámetros por lo general comprenden un rango que fluctúa dependiendo de la fuente en que se genera el agua gris y por las costumbres que realizan las personas, no obstante, para tener una idea clara de ellos, se presenta la Tabla 4 con sus valores típicos (Magaña, 2016).

Tabla 4: Rango de concentraciones que se encuentran los parámetros de aguas grises (Magaña, 2016).

Parámetro	Unidad	Rango en aguas grises
Sólidos suspendidos	mg/l	45-330
Turbiedad	NTU	22-200
DBO	mg/l	90-290
Nitrato	mg/l	< 0,1-0,8
Nitrógeno	mg/l	2,1-31,5
Fósforo	mg/l	0,6-27,3
pH	-	6,6-8,7
Sulfato	mg/l	7,9-110
Sodio	mg/l	29-230
Coliformes	Ufc/100 ml	$2,6 \cdot 10^4$ - $9,5 \cdot 10^5$

En el caso de los coliformes, el rango se encuentra mayoritariamente en fuentes generadoras como la lavadora, debido a que la ropa puede entrar en contacto con estos patógenos. Si bien en la mayoría de los casos, las aguas grises no contienen coliformes fecales, si pueden contener contaminantes microbiológicos y químicos que deben ser controlados (Magaña, 2016).

3.1.3. Regulaciones y usos de agua gris

A través de los componentes que presentan estas aguas grises, existe la posibilidad de que estas puedan ser reutilizadas para fines no potables, ya que el potencial para realizar un tratamiento entrega la oportunidad de mitigar y enfrentar las problemáticas que se encuentran en las zonas de escasez hídrica, e incluso, disminuir la demanda de agua dulce (Leiva et al., 2020). Por ejemplo, la reutilización de agua gris podría funcionar para riego recreativo y jardines o para descargas de inodoro, permitiendo que las presiones de las fuentes de aguas potable disminuyan (Huanacuni, 2021).

Para llevar a cabo la reutilización de aguas, es necesario considerar las regulaciones y leyes del país con el fin de determinar de qué manera esta agua puede ser tratada y que uso se le puede dar en relación a las necesidades que se presenten, ya que existen riesgos de salud si esta no es tratada como se debe, por lo que al estar expuesto a la presencia de microorganismos patógenos o a un control de pH o a los tensioactivos, el riego puede aumentar aún más (Maimon & Gross, 2018). De hecho, la calidad del agua gris no procesada no cumple con ningún parámetro a nivel global lo que genera preocupación para ciertos evaluadores epidemiológicos que buscan controlar esta problemática.

En este caso, Chile está siendo regulada a través de la Ley 21.075 que específicamente se encarga de la recolección, reutilización y disposición de las aguas grises, no obstante, esta Ley aún no entra en vigencia en su totalidad, debido a los reglamentos que aún no logran darle la acreditación que necesita (Leiva et al., 2020).

Dentro de las disposiciones generales de la ley se establece como se deben regir las condiciones sanitarias para la reutilización de aguas grises, el diseño que debe contemplar y las condiciones de operación que tiene que existir. Dentro de esta ley, además, se encuentran los usos más comunes donde puede ser destinada el agua gris, siendo estos (Ministerio de Salud, 2018):

- Urbanos: Principalmente para riego de jardines de hogares u otros servicios cerrados y descarga de inodoros.
- Riego áreas recreativas y de servicios: Riego de áreas verdes, tales como parques, campos de deportes, entre otras. Está al acceso del público.
- Riego ornamental: En este caso, también es para áreas verdes y jardines, sin embargo, debe ser con fines decorativos, debido a que no se permite acceso para algún asistente.

- **Industriales:** Destinada para procesos industriales sin contabilizar a las empresas que elaboran productos alimenticios, de refrigeración y condensados evaporativos.

Por consiguiente, de la misma manera que se encuentran los usos más adecuados, también se encuentran los usos que no están permitidos en donde estos se centran en el cultivo de vegetales y frutos que crecen del suelo y que tienen la opción de ser consumidos de manera cruda. También se limita para el uso del consumo humano y el riego por aspersión o artefacto que permita esparcir el agua gris en partículas de aerosol (Ministerio de Salud, 2018).

Sin embargo, en marzo del año 2023 se buscó modificar la Ley con respecto a la regularización de la recolección, reutilización y disposición de aguas grises con el fin de fomentar la reutilización de estas aguas en la agricultura. Esta modificación se debe principalmente a la sequía prolongada que se ha expuesto en el sector silvoagropecuario en los últimos 12 años. Dado esto, dentro de esta Ley se encontraría un nuevo uso destinado al silvoagropecuario que incluye el riego de cultivos agrícolas, donde se consideran especies arbóreas o arbustivas frutales, cultivos industriales, viveros, de plantas leñosas, semillas o cereales (Boric et al., 2023).

3.1.4. Calidad de aguas grises

Tomando la línea de que Chile está sujeta a la ley 21.075, se define la calidad de agua gris tratada para los diferentes usos correspondientes a los presentados anteriormente en el punto 3.1.2. De esta forma, se presentan las Tablas 5, 6 y 7 con los límites máximos que se pueden alcanzar en los parámetros considerados por el artículo 38 de la Ley. Cabe destacar que estos parámetros serán los factores a considerar en la evaluación técnica.

Tabla 5: Límites permitidos para usos Urbanos (Ministerio de Salud, 2018).

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

Tabla 6: Límites permitidos para riego áreas recreativas y de servicios (Ministerio de Salud, 2018).

Parámetro	Unidad	Límite máximo	
		Riego Superficial	Riego Subsuperficial
DBO ₅	mg/l	30	240
SST	mg/l	30	140
CF	UFC/100 ml	200	1000
Turbiedad	UNT	$0,5 \leq X \leq 2$	-
Cloro libre residual	mg/l	20	-

Tabla 7: Límites permitidos para riego uso Ornamental (Ministerio de Salud, 2018).

Parámetro	Unidad	Límite máximo
DBO ₅	mg/l	70
SST	mg/l	70
CF	UFC/100 ml	1000
Turbiedad	UNT	30

Ahora, considerando los estándares de la norma chilena, se presentarán las normativas internacionales en las Tablas 8 y 9, la primera perteneciente al sector de América del sur y Centro América y la segunda a América del norte, Asia, Oceanía y Europa.

Tabla 8: Normativas internacionales respecto al sector de América del sur y Centroamérica (Leiva et al., 2020).

Parámetro	Unidad	Colombia	Uruguay	Honduras	Costa Rica
DBO ₅	mg/l	40	5	50	50
SST	mg/l	500	700	100	50
CF	UFC/100 ml	2	20	10	30
Turbiedad	UNT	5	50	-	-
Cloro libre residual	mg/l	0,4	-	-	1

Tabla 9: Normativas internacionales respecto al sector de América del Norte, Europa, Asia y Oceanía (ElSayed, 2018; Leiva et al., 2020; Li et al., 2009b)

Parámetro	Unidad	China	Italia	España	Chipre	USA	Canadá	Australia	Japón	Alemania
DBO ₅	mg/l	<6	<20	-	<15	10	20	20	20	5
SST	mg/l	-	<10	<20	<15	-	20	30	-	-
CF	UFC/100 ml	< 3/100	<100	<100	<100	-	20	1	-	<10
Turbiedad	UNT	<5	-	<10	-	-	5	2	-	-
Cloro libre residual	mg/l	>1	-	-	-	1	>0,5	0,5	-	-

3.2. Tratamiento de aguas grises

Las aguas grises al no ser tratadas conllevan a la contaminación de suelos, fuentes de aguas subterráneas y daño a los cultivos, por lo que su tratamiento es necesario, debido a que además de cubrir las problemáticas presentadas, también contrarresta el impacto negativo del medio ambiente y las enfermedades que pueden resultar al estar expuesto a estas aguas sin su procedimiento (Katukiza et al., 2015). Frente a esto, los sistemas de tratamiento a aguas grises deben cumplir con todas estas regulaciones para resguardar la salud de las personas y lograr una gestión eficiente frente al medio ambiente (Morel & Diener, 2006).

El tratamiento de aguas grises se puede efectuar en un hogar, en un condominio o en un sector de una comuna. Dependiendo de la necesidad y gestiones de las personas es como el tratamiento puede ser empleado, debido a que existen diferentes tipos de tratamientos específicos para las diferentes calidades de aguas grises (Katukiza et al., 2015). En términos generales los tratamientos se dividen en físicos, químicos y biológicos y en cualquiera de ellos se logran buenos porcentajes de remoción de materia orgánica, aunque, a través de revisiones bibliográficas, el tratamiento de aguas grises necesita de un tamizado, aireación y filtración; componentes sustanciales para lograr niveles altos de eficiencia en cuanto a la calidad del agua (Rakesh et al., 2020). Dentro de los tratamientos más utilizados encontramos:

- **Sedimentación:** Eliminación de los sólidos suspendidos orgánicos en donde primero se concentran y son sedimentados a través de la gravedad (Ardilla, 2013). Se utiliza como tratamiento primario y remueve una parte de los microorganismos dado a la fijación que tienen hacia las partículas. Es posible aumentar los porcentajes de remoción si el proceso se le induce a la agitación o se le adiciona coagulante (Franco, 2007).
- **Filtración:** Evita que los sólidos en suspensión e impurezas en las aguas puedan pasar a los tratamientos posteriores. Principalmente se utilizan como primer tratamiento dentro de un sistema de reutilización (Ardilla, 2013). Este proceso incluye normalmente un cribado, adsorción y biodegradación (Rakesh et al., 2020). Además, los sistemas de filtración más utilizados para eliminar las partículas de suspensión son grava, gravilla, arena, sílice, hidroantracita, carbón activado entre otros (Ardilla, 2013).
- **Biofiltro:** Purifican el agua a partir de procesos naturales. Son humedales artificiales diseñados para maximizar la remoción de contaminantes de las aguas contaminadas (Cruz, 2013). Se caracterizan por ser sistemas por el cual el agua pasa por un flujo gravitacional a través de las plantas y medios granulares que

eliminan la materia orgánica dado al crecimiento de microorganismos. Al ser procesos naturales, su consumo es mínimo y requieren de poca mantención (Maimon & Gross, 2018). Es importante prevenir que el filtro no se obstruya para evitar que los sólidos suspendidos desprendan olores y para que el agua no se estanque (Vigueras et al., 2013). Dentro de los contaminantes que son removidos de manera eficiente se encuentra DBO, turbiedad, CF, Fósforo total, Nitrógeno total entre otros (World Health Organization, 2006).

- **Membrana de Microfiltración/Ultrafiltración:** La microfiltración corresponde a dos unidades de membrana microporosa de fibra hueca, en donde la luz puede pasar entre los 0,1 y 10 μm y 15 m^2 de superficie unitaria mientras que en la ultrafiltración la membrana es espiral y la circulación del agua es tangencial con respecto al posicionamiento que tenga la membrana (Alonso & Riesco, 2001). Los poros pueden llegar entre los 0,001 hasta 0,1 μm (J. Díaz & Ramírez, 2016). Ambos tratamientos entregan una buena eliminación en los SST, turbidez y microorganismos patógenos, sin embargo, es limitada en cuanto a los compuestos orgánicos disueltos (Li et al., 2009a). También son sensibles a las incrustaciones y obstrucciones y presentan altos costos de operación y mantenimiento (Maimon & Gross, 2018).
- **Reactor biológico de membrana:** Tratamiento muy similar al de lodos activados, ya que utiliza la degradación microbiana, pero combinada con el método de membrana (microfiltración o ultrafiltración), ya que estas permiten filtrar y separar los contaminantes del agua dejando el lecho bacteriano en el reactor mientras el agua pasa por las membranas entregándole un alto nivel de pureza (J. Díaz & Ramírez, 2016). En cuanto a los porcentajes de remoción, presenta muy buena eliminación de material orgánico, SST, turbidez y microorganismos patógenos, aunque, sus costos de inversión y operación son muy altos y tiene un funcionamiento muy complejo por lo que es necesario un profesional (Asesoría Técnica Parlamentaria, 2018).
- **Coagulación/Floculación:** Tratamiento que neutraliza las cargas electrostáticas de las partículas coloidales para que ocurra una reacción de atracción entre las partículas formando microflóculos. La floculación en parte es la unión de los microflóculos, por lo que, al haber más lazos entre estos, el flóculo será más grande y se volverá más denso que el agua, lo que permite que exista sedimentación por efecto de la gravedad. Para que el proceso resulte de manera correcta, es necesario verificar que las dosis de coagulantes sean las correctas, que la alcalinidad y pH del agua estén dentro de los rangos (J. Díaz & Ramírez, 2016).

- **Desinfección:** Tratamiento que destruye selectivamente a los organismos que causan enfermedades (Otero, 2007), siendo estos los microorganismos patógenos que siguen vivos después de un proceso de tratamiento (Ardilla, 2013). Los métodos más utilizados para llevar a cabo la desinfección corresponden a agentes químicos como el cloro y el hipoclorito de sodio, agentes físicos como la luz y el calor, medios mecánicos como procesos de tamizado o desarenadores (tratamientos físicos) y radiación como la electromagnética (Otero, 2007). En general, los microorganismos suelen ser eliminados en los medios mecánicos, sin embargo, dependiendo del objetivo específico que se desee llegar, es como se deberá aplicar la desinfección al agua tratada (Burgos, 2014).

Para cumplir con el objetivo del trabajo, se indagó en un tratamiento óptimo para tratar las aguas grises del sector a estudiar. Se tomó como base la ley 21.075 del Ministerio de Obras Públicas que permite tener las concentraciones límites permitidas para que el agua pueda ser reutilizada. Es necesario que las aguas tengan una caracterización acorde a lo requerido, por lo que es de suma importancia considerar bases bibliográficas que cumplen con las características del proyecto.

3.2.1. Alternativas de procesos de tratamiento de agua gris

A partir de los tratamientos descritos, se profundizará en los que requieren un menor costo de operación y valor económico.

3.2.1.1. Proceso de filtración

Como se mencionó anteriormente, este tratamiento busca la remoción de las partículas suspendidas y coloidales presentes en el agua que van pasando a través de un medio poroso, en donde se tiene como medios filtrantes principales la grava, gravilla, arena, sílice, hidroantracita, carbón activado entre otros (Ardilla, 2013).

Un filtro se compone de un medio filtrante que busca la retención de los sólidos y una zona de soporte en donde el sistema buscara recoger el agua filtrada de tal forma que, al momento de lavar el filtro, el agua y el aire puedan distribuirse de manera uniforme. En cuanto al proceso de filtración este consta de tres etapas. La primera es donde la zona de transición se desplaza en el sentido del flujo del agua. Luego viene la altura de la zona de saturación que aumenta y finalmente la altura de la zona no usada que disminuye. De manera paralela, empiezan a encontrarse pérdidas de carga a medida que el filtro empieza a saturarse. El ciclo de filtración dará su término cuando la zona de transición llega a la salida del lecho. Se presenta la Figura correspondiente a las zonas del proceso descrito (Pérez, 2011).

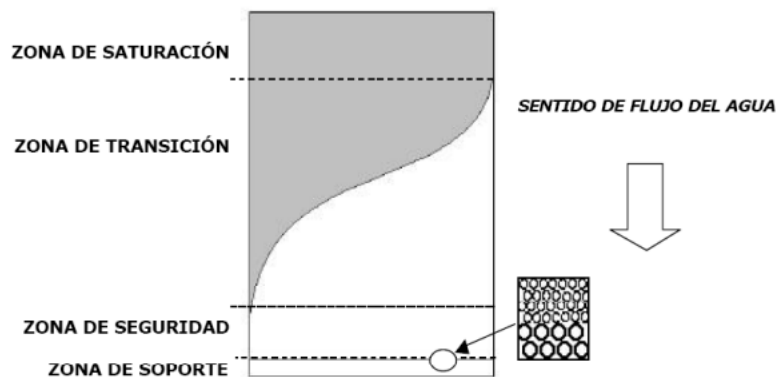


Figura 5: Zonas del proceso de Filtración (Pérez, 2011).

En cuanto a los mecanismos de transporte (o eliminación de partículas) utilizados en el medio de la filtración se encuentra el impacto inercial, la interceptación, la sedimentación y la difusión, los cuales serán descritos a continuación (Escobar, 2005):

- **Impacto Inercial:** En la etapa de escurrimiento, la corriente de agua diverge con los granos del medio filtrante de tal manera que los sólidos suspendidos colisionan con los granos.
- **Intercepción:** Las partículas se mueven a lo largo de las líneas de corriente y como estas partículas tienen densidades similares al agua, son removidas de la suspensión cuando las líneas de la corriente se encuentran a una distancia menor a la del radio de las partículas.
- **Sedimentación:** Los sólidos se asientan en el medio filtrante al interior del lecho por efecto de la gravedad.
- **Difusión:** Cuando las partículas son lo suficientemente pequeñas, estas presentan un movimiento errático cuando están suspendidas en el medio líquido. Se le conoce como movimiento Browniano y las partículas son afectadas por la fuerza de arrastre y de inercia por ellas mismas, por lo que la intensidad del movimiento de difusión es inversamente proporcional al tamaño de las partículas.

En la Figura 6 se representan los mecanismos anteriormente mencionados (Escobar, 2005).

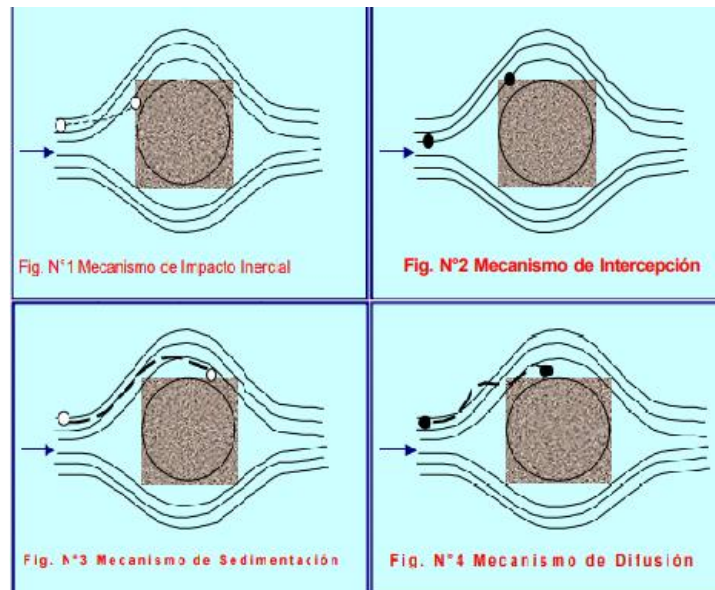


Figura 6: Mecanismos de transporte del sistema de filtración (Escobar, 2005).

Por otro lado, los sistemas de filtración pueden clasificarse en filtración lenta o rápida dependiendo de su tasa de filtración, que corresponde a la velocidad con que el flujo pasa a través del filtro (Torres, 2017). Dependiendo del caudal y el área del sistema es como se puede dar la filtración lenta o rápida.

En el caso de la filtración lenta, los rangos de velocidades por los que se mueve son entre los 0,042 y 0,3 $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$. Generalmente se utiliza arena fina para garantizar mejores retenciones de sólidos (Torres, 2017). Están diseñados para que el agua fluya lentamente y tiene la particularidad que se forma una capa biológica porosa, que favorece la adsorción de microorganismos (Pérez, 2011). Dentro de las ventajas que tiene el filtro es que presenta este mecanismo biológico que es efectivo y, además, reduce la turbidez en gran porcentaje (Torres, 2017). Por otro lado, también presenta bajo costo económico y su operación y control no son complejas (Ardilla, 2013). Sin embargo, se le deben hacer mantenciones para evitar el desarrollo de plancton, el cual puede producir estancamiento superficial (Pérez, 2011).

Con respecto a la filtración rápida, este usa tasas que van desde los 4,17 a 19,8 $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$. Al tener una mayor velocidad, se requiere de diámetros de arena mayores para no provocar altas caídas de presión. En general se busca que exista un área superficial más grande a fin de que se entre en contacto completo con la corriente (los caudales tienden a ser elevados). En estos filtros la mantención se realiza removiendo los contaminantes a través del retrolavado, proceso que escurre agua en contra de la gravedad para eliminar los contaminantes concentrados (Torres, 2017).

A través de diversos estudios, se han implementado diferentes tipos de sistemas de filtración capaces de remover los contaminantes de manera eficiente. En la Tabla 10 se presentan los porcentajes de remoción que hay a través de un sistema de tratamiento utilizando filtro de arena. Este trabajo buscaba identificar los diferentes sistemas de tratamiento para seleccionar uno de ellos y verificar que cumpliera con la premisa de tener bajos costos de mantención y operación. En este caso se presentan directamente los de sistema de filtración que fueron estudiados en dos sectores de Jordania y otro sector no mencionado, en ellas no se menciona el tipo de agua utilizado.

Por otro lado, la Tabla 11 también presenta porcentajes de remoción de un sistema de filtración por capas con flujo hidráulico con material filtrante grueso al más fino utilizando agua de lavadora. En el trabajo, además, se realizaron dos tratamientos adicionales, correspondiente a una multicámara horizontal con material filtrante, una con y otra sin inyección de oxígeno. Ambos tratamientos también utilizaban agua de lavadoras para la experimentación y los medios filtrantes utilizados eran grava, arena, cuarcita y carbón activado para todos los tratamientos estudiados.

Tabla 10: Porcentajes de remoción utilizando un sistema de filtración de estudio 1 (M. Díaz et al., 2021).

Parámetros	Remoción % sector 1	Remoción % sector 2	Remoción % sector 3
Turbiedad, NTU	-	-	66%
CF, UFC/100ml	-	10-10 ²	-
Aceites y grasas mg/l	-	70%	-
SS, mg/l	-	50-80%	58%
DQO, mg/l	80%	-	-
DBO ₅ , mg/l	90%	50-80%	-

Tabla 11: Porcentajes de remoción utilizando un sistema de filtración de estudio 2 (Huanacuni, 2021).

Parámetros	Agua cruda	Agua tratada	%remoción
Temperatura	10,1	8,4	-
pH	9,48	7,89	-
Conductividad	1.722	2.059	-19,6
Turbidez	321	31,3	90,2
SST	1,7	0	100
DBO	343	88	74,3
DQO	835	186	70,9

3.2.1.2. Sistema de biofiltro

Tal como se mencionó previamente, este proceso trata las aguas contaminadas a través de sistemas de microorganismos. Principalmente su función radica en que estos medios absorben y adsorben las sustancias contaminantes, favoreciendo la implantación de microorganismos que son capaces de biodegradarlas en compuestos como el CO_2 , N_2 y H_2O (Garzón et al., 2012). En general este tratamiento busca tener similitudes con los humedales (pantanos), a fin de maximizar la remoción de los contaminantes que se encuentran en las aguas contaminadas (Brikké et al., 2006).

La composición que lleva el biofiltro en general depende de las características del agua a tratar, no obstante, se utilizan principalmente medios filtrantes porosos o granulares como lo son la arena o la antracita, entre otros. Este sistema elimina los contaminantes mediante una sola operación, donde se desarrollan procesos físico y bio-químicos que permiten la formación de una capa biológica sobre la superficie del lecho, capaz de retener las partículas suspendidas y microorganismos patógenos, eliminando el material que no se considera deseable. Esta formación de la biocapa se produce principalmente por la baja tasa de filtración que tienen estos biofiltros, ya que la estructura del medio es adecuada para que los medios se adhieran y crezcan (Ruiz, 2004).

Cuando el agua pasa por el medio filtrante, ocurren mecanismos naturales dentro del biofiltro, los cuales son la filtración lenta y pasiva, la absorción, adsorción e intercambio iónico y la biodegradación. Dependiendo de la carga orgánica que presente el agua es como se permitirá el equilibrio entre el crecimiento y decrecimiento de la biomasa. Si esta es controlada, la biodegradación de los contaminantes será pasiva, sin formación de lodos biológicos (Garzón et al., 2012). Entre los tipos de biofiltros más utilizados, se encuentran los de flujo superficial y subsuperficial horizontal y vertical. Ambos biofiltros actúan con el mismo principio biológico.

Los biofiltros de flujo superficial son sistemas el flujo de agua actúa como un pantano donde la vegetación esta inundada hasta profundidades con rangos de 10 a los 50 cm. Generalmente el flujo de esta agua es continuo y esta se va tratando mediante los tallos y raíces que tiene esta vegetación. Estos biofiltros tienden a tener una apariencia similar a los humedales naturales, por lo que se necesita de espacio grandes (Herrera & Rey, 2018)

En cuanto a los biofiltros de flujo subsuperficial consisten en dos o más compartimientos que tendrán revestimiento impermeable y tienen profundidades que oscilan entre los 40 a 80 cm. Se rellena con el medio filtrante, tales como la grava o piedra con una granulometría acorde al sistema.

La corriente se reparte por la tubería e ira saliendo por las zonas situadas del biofiltro que se estimen convenientes, esto con el fin de que el agua llegue a la zona de grava. Luego de que el agua pase por el biofiltro con una distribución uniforme y un tiempo de retención óptimo, a través de una tubería perforada que se sitúa en el fondo, el agua irá siendo recogida. En cuanto a las ventajas que este biofiltro presente se encuentran la no exposición del agua en el medio evitando problemas de insectos y necesita de una pequeña área para su construcción (Herrera & Rey, 2018). En la Figura 7 se ve una representación de los biofiltros subsuperficiales horizontal y vertical.



Figura 7: Representación de biofiltro Flujo Horizontal y vertical (Herrera & Rey, 2018).

Considerando los estudios que se han realizado de biofiltros para tratamiento de aguas grises donde se han arrojado buenos resultados, se presenta a continuación la Tablas 12 y la Tabla 13 de estos sistemas. En la primera tabla se presenta un trabajo realizado con un sistema de tres biofiltros utilizando medios filtrantes de fibra de agave aireados y no aireados. El agua utilizada para este tratamiento correspondía a agua residual que ya tenía un proceso de pretratamiento incluido y se mantenía almacenado en un tanque de polietileno. En el diseño experimental se consideró la aireación, el número de platos de la columna de filtración y la razón del tiempo hidráulico (HLR).

En cuanto a la segunda tabla, este corresponde a un biofiltro con 4 diferentes unidades de lecho filtrante de grava y de diferentes granulometrías con tiempo de retención hidráulica y condiciones anaerobias y aerobias. La experimentación se realizó durante 60 días, utilizando agua residual tratada en un biorreactor de lodos activados con aireación extendida.

Tabla 12: Porcentajes de remoción utilizando un sistema de biofiltro estudio 3 (Vigueras et al., 2013).

Parámetro	Biofiltros aireados	Biofiltros no aireados
DBO ₅	92%	90,1%
CF	99,95%	99,56%
SST	91,9%	93,4%
Turbiedad	-	-

Tabla 13: Porcentajes de remoción utilizando sistemas de biofiltros con diferentes tiempos de retención estudio 4 (Rodríguez, 2014).

Parámetro	Unidad	Remoción% 6 horas	Remoción% 10 horas	Remoción% 12 horas
DQO	mg/l	54,76	50,00	94,74
SST	mg/l	67,57	96,36	94,87
SSV	mg/l	63,64	96,36	93,10
CF	Ufc/100 ml	69,57	66,67	93,73
Turbiedad	UNT	50,00	68,12	67,74
FT	mg/l	71,90	25,00	65,42
NT	mg/l	76,86	22,17	77,15

Es posible que una combinación de estos tratamientos en pequeña escala permita una reutilización de aguas grises, capaz de entregar los parámetros de contaminantes por debajo de los rangos máximos permitidos, por ende, se plantea la situación de poder desarrollar el proyecto con estos equipos, sin embargo, es necesario desarrollar diversos estudios para rectificar la viabilidad de este.

4. Metodología

Para abordar en detalle la metodología de la memoria, se conformaron tres secciones para mostrar el desarrollo de cada proceso. A continuación, se presenta en la Figura 8 un mapa conceptual de las secciones y las actividades realizadas en la metodología.

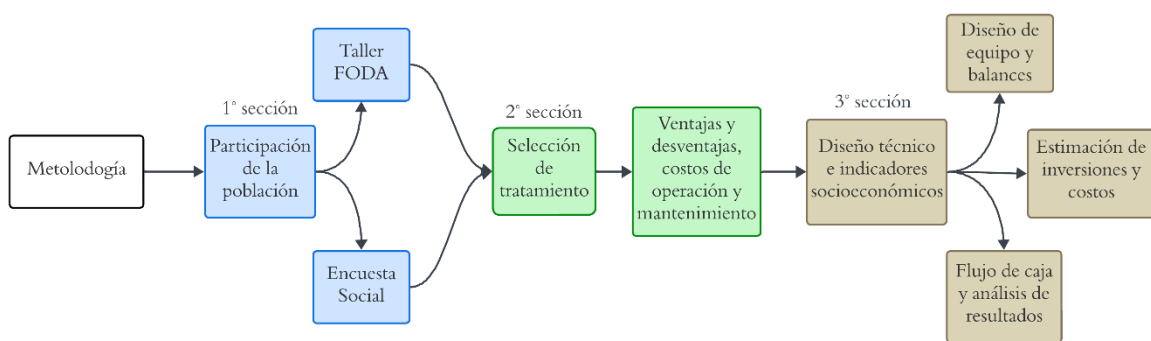


Figura 8: Mapa Conceptual de la metodología realizada en el proyecto.

4.1. Participación de la población

En primera instancia se eligió una región acorde a lo que el proyecto requería. A partir de la información recopilada y estudiada se tuvo como elección la región de Valparaíso, ya que hoy en día 37 de las 38 comunas del sector se encuentran bajo la escasez hídrica, siendo las más afectadas, las localidades de Casablanca, Petorca y Peñuelas (Bianchi, 2022). Frente a esto, el enfoque fue directamente en uno de estos tres sectores, logrando coincidir con una población de 16 casas ubicadas en Lo Vázquez, comuna de Casablanca quienes mostraron interés en participar y entregar información pertinente para las limitaciones del proyecto

Se realizaron dos trabajos; en el primero se realizó la estrategia del proyecto, mediante un taller de análisis FODA, en donde participaron tres residentes de la población y se debatieron los principales aspectos frente a la realización de un sistema de aguas grises, mientras que en el segundo trabajo, se elaboró una encuesta a fin de entregar los parámetros que permitirán elegir el tratamiento de aguas grises y un posterior diseño de este a partir del caudal de entrada de aguas grises que tenga cada vivienda de la población. A continuación, se presenta cada trabajo con su descripción más a fondo.

- Taller FODA

El taller se realizó mediante una reunión remota online, en la cual se debatieron los puntos principales del análisis FODA, los que fueron analizados a partir de un punto de vista personal en el que los vecinos de la población entregaron su opinión y consideraron que factores había que mantener, eliminar y añadir.

Para llevar a cabo lo anteriormente mencionado, se elaboró una presentación para los participantes del taller, en que se explicó la definición, las características, los objetivos y los puntos a identificar, siendo estos las fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas del proyecto. Dentro de este taller se dio el espacio para que cada vecino pudiese hacer las preguntas necesarias con respecto al tema y adicionalmente entregar el punto de vista en relación a los conceptos añadidos dentro de la presentación.

De cada uno de los puntos presentados se modificaron las opciones entregadas para que el trabajo tuviese un carácter legítimo y tuviese las bases necesarias para poder ver la viabilidad del proyecto.

- Encuesta

Se elaboró con la ayuda de Javiera Silva, Ingeniera Civil Química e Ingeniera de proyectos para considerar los aspectos primordiales y enfatizar directamente en la información que se necesitaba recaudar, esto con el fin de determinar la cantidad de agua que se reutiliza por casa. Para obtener este valor, se utilizaron como parámetros principales los kilos, la frecuencia de uso y la carga que utiliza la lavadora por lavado.

La encuesta fue elaborada en formato online y se mantuvo abierta durante tres semanas para recibir todas las respuestas posibles. Las preguntas eran de carácter cerrada y con rangos definidos para evitar posibles respuestas inconclusas y/o sin respuesta. En la Tabla 14 se presentan las preguntas realizadas a los vecinos de Lo Vásquez.

Tabla 14: Preguntas realizadas en la encuesta para los vecinos de la población de Lo Vásquez.

Preguntas de la Encuesta
¿Cuántos kilos tiene su lavadora?
¿Cada cuantos días utilizas la lavadora?
¿Utiliza una carga completa en la lavadora cada vez que lava?
Si la pregunta anterior fue no, indique la carga utilizada
¿Cuántas personas residen en el hogar?
¿Cuántos litros de agua cree usted que se desperdicia en su hogar debido al lavado de ropa? (Considere un lavado de su lavadora)
Tomando en consideración que se implementa un sistema de tratamiento de aguas grises en su hogar ¿De qué manera aplicaría esta agua reutilizada?

Para determinar el consumo de agua de cada casa se utilizó la ecuación de la bibliografía (Pakula & Stamminger, 2010), la cual se presenta a continuación:

$$C_w = n_w \cdot C_{\frac{w}{wc}} \quad (1)$$

Donde C_w corresponde al consumo de agua por lavado en la lavadora, n_w al número anual de ciclos del lavado por vivienda y $C_{w/wc}$ el consumo de agua por ciclo de lavado.

Para obtener el valor de consumo de agua por ciclo de lavado se utilizaron tres referencias bibliográficas las cuales determinaban este consumo de agua por kilo de ropa. En la Tabla 15 se muestran los valores.

Tabla 15: Consumo de agua por kilo de ropa de diferentes fuentes bibliográficas.

Autor	Litros / kg de ropa
(Pakula & Stamminger, 2010)	12
(Kim et al., 2015)	15 (USA) y 9 (Europa)
(Stamminger & Schmitz, 2016)	7,5 y 6,7 (Europa)

En la Ecuación 1 se adiciono un factor de seguridad multiplicativo de 1,1 debido a la incertidumbre de los valores que se obtuvo a partir de la encuesta y las referencias bibliográficas. Este valor se escogió de manera empírica, sin embargo, se debe principalmente a la tolerancia al riesgo moderado y a la variabilidad en los datos, ya que, en el primero caso, al aumentar un 10% los resultados, se construye un margen moderado que de cierta forma controla algunas incertidumbres y en cuanto a la variabilidad, los datos pueden variar debido a factores de imprevistos o inesperados por lo que al considerar este 10% ayuda a compensar y garantizar cálculos mas robustos.

4.2. Selección de tratamiento

En esta sección, abordamos el proceso de selección del tratamiento de aguas grises a partir de los datos obtenidos de la sección anterior y el marco teórico. Estos se recopilarán, estudiarán y analizarán para ver la opción más viable para la población.

La elección del tratamiento adecuado fue un proceso que consideró múltiples factores, incluidas las ventajas y desventajas de diversas opciones de tratamiento. Cada alternativa fue evaluada en función de su idoneidad para el contexto de la comunidad, así como su capacidad para abordar la escasez hídrica y lograr porcentajes óptimos de remoción de contaminantes, permitiendo la reutilización segura del agua tratada.

Uno de los criterios en la selección del tratamiento fue el análisis de los costos de operación y mantenimiento asociados a cada sistema. Se consideraron aspectos como la inversión inicial, los requerimientos de energía, la cantidad y tipo de productos químicos necesarios y la necesidad de supervisión y mantenimiento regular. Esta evaluación financiera no sólo aseguraba la viabilidad a largo plazo del sistema elegido, sino que también garantizaba que los beneficios ambientales y sociales superaran las implicaciones económicas.

Una vez comparado todas las opciones de tratamiento, se determinó el sistema capaz de tener un equilibrio con todos los requerimientos necesarios para que los vecinos de Lo Vásquez tengan la oportunidad de utilizar el agua de este tratamiento para su servicio.

4.3. Diseño e indicadores socioeconómicos

Finalmente, la última sección a desarrollar se refirió al diseño técnico del tratamiento de aguas grises con sus respectivas estimaciones de costos, tomando en consideración, además, los indicadores socioeconómicos que ayudarán al proceso de evaluación económica.

Para implementar el diseño del sistema técnico se necesitó de referencias bibliográficas de metodologías de trabajo para poder estimar la calidad de las aguas grises, las cuales fueron obtenidas a partir de un porcentaje ponderado. El criterio de ponderación se basó en la similitud del sistema de reutilización con el proyecto, es decir, el trabajo que utilizó el sistema de reutilización con aguas de lavadora presentará una mayor ponderación que el caso utilizado con aguas compuestas de duchas y lavadoras, mientras que la reutilización de duchas al tener menor similitud tendrá una ponderación menor. Estas metodologías corresponden a “*aguas grises como recurso hídrico no convencional: evaluación de alternativas de tratamiento de aguas segregadas y compuestas*” (Soza, 2023) , “*Biofilters as effective pathogen barriers for greywater reuse*” (Jung et al., 2019) y “*Tratamiento y reutilización de aguas grises con aplicación a caso en Chile*” (Franco, 2007), donde estos contemplaban reutilización de aguas de lavadora, aguas compuestas de duchas y lavadora y solamente de duchas respectivamente. El promedio se calculó a partir de la siguiente ecuación.

$$\bar{X}_w = \frac{w_1X_1 + w_2X_2 + \cdots + w_nX_n}{w_1 + w_2 + \cdots w_n} \quad (2)$$

Donde $w_{1,2,n}$ corresponden a los pesos a ponderar y $X_{1,2,n}$ a los datos a utilizar.

En cuanto a los cálculos para obtener la concentración final de cada sistema, se utilizó la ecuación de porcentaje de remoción, la cual se expresa de la siguiente forma.

$$R_{sistema}(\%) = \frac{C_i - C_f}{C_i} \cdot 100 \quad (3)$$

$$C_f = C_i \cdot \left(1 - \frac{R_{sistema}}{100}\right) \quad (4)$$

Una vez obtenido estos parámetros se procedió a diseñar la bomba a utilizar, el sistema de filtración y el biofiltro. Para llevar a cabo esto, se utilizaron las siguientes ecuaciones:

- Mediante un balance de energía mecánica (con pérdidas por fricción) se obtuvo la altura del sistema, en donde, además, fue necesario considerar las pérdidas de carga que existían. La Ecuación queda expresada de la siguiente forma (Çengel & Cimbala, 2012).

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + H - \sum h_L = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \quad (5)$$

Donde $P_{1,2}$ corresponden a las presiones del flujo en el sistema, $V_{1,2}$, a las velocidades del flujo, $z_{1,2}$ a la altura de referencia del sistema, h_L a las pérdidas de carga y H a la altura del sistema.

- Ecuación de presión de fluido, correspondiente a:

$$P_1 = \rho gh \quad (6)$$

En el que ρ , es la densidad del fluido, g a la aceleración de gravedad y h a la altura del sistema

- En cuanto a las pérdidas de carga, estas se determinan a partir de la ecuación;

$$h_{l,total} = \left(f \cdot \frac{L}{D} + \sum K_L\right) \frac{v^2}{2g} \quad (7)$$

Siendo f el coeficiente de fricción, L la longitud de la tubería, D el diámetro interno de la tubería v , la velocidad y g la aceleración de gravedad.

- Número de Reynolds, el cual se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{\rho \cdot D \cdot v}{\mu} \quad (8)$$

Donde ρ es la densidad del fluido, D el diámetro interno de la tubería, v la velocidad del fluido y μ la viscosidad dinámica del fluido.

- Para determinar la selección de bombas a utilizar, se graficó la curva del sistema utilizando el rango de caudal que se eligió anteriormente. Estos valores como dependen de la velocidad, fue necesario también ir variando el número de Reynolds y por consiguiente su factor de fricción y altura de sistema, por lo que se utilizó la ecuación de Colebrook correspondiente a una relación implícita del factor de Darcy (Çengel & Cimbala, 2012) para determinar estos valores. A continuación, se presenta la ecuación.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} \cong -1,8 \cdot \log \left[\frac{6,9}{Re} + \left(\frac{\varepsilon}{D} \right)^{1,11} \right] \quad (9)$$

- Ecuación del área del cilindro, para el cálculo de las dimensiones del sistema de filtración.

$$A = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h + 2 \cdot \pi \cdot r^2 \quad (10)$$

- Ecuación del volumen del cilindro, para el cálculo de las dimensiones del sistema de filtración.

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (11)$$

- Con el área obtenida y tomando en consideración el caudal obtenido por la bomba, es posible obtener la velocidad de filtración con la que el equipo funcionará. Esto a través de la siguiente fórmula.

$$A = \frac{Q}{V_f} \rightarrow V_f = \frac{Q}{A} \quad (12)$$

Donde V_f es la velocidad de filtración, Q el caudal utilizado y A , al área del sistema de filtración.

En cuanto a la estimación respecto a la inversión y costos, se utilizaron criterios sociales para determinar valores que tuviesen relación al proyecto social, dentro de ellos encontramos:

- Precios sociales: Para la realización de las inversiones es necesario considerar los beneficios en cuanto a los precios que se presentan dentro del proyecto los cuales se destacan (Ministerio de Desarrollo Social, 2017):
 - Terreno: No existe una corrección para este tipo de casos, sin embargo, al tratarse del patio de los vecinos de lo Vásquez, el costo no influye dentro de la inversión.
 - Insumos nacionales: Se descuenta el IVA y otros impuestos que pueden presentarse. En este caso, para los materiales a costear se descontó el IVA de todos los productos que indicaban que iba con este impuesto asociado.
 - Maquinaria y equipos nacionales: Del mismo modo que los insumos nacionales, se debe descontar el IVA y otros impuestos. Se aplicó el mismo descuento para los equipos a utilizar.
- Factor de corrección: Se aplica en este caso a la mano de obra que instalará el sistema de reutilización de aguas grises. Este factor corresponde al precio social de la mano de obra sobre el precio mercado de mano de obra. Actualmente los parámetros nacionales vigentes corresponden a (Ministerio de Desarrollo Social y Familia, 2023):

Tabla 16: Factores sociales de la mano de obra.

Precio social	Valor factor
Calificada (MOC)	0,97
Semi – Calificada (MOSC)	0,95
No calificada (MONC)	0,91

Para efectos del trabajo, el factor a considerar será de un personal de mano de obra semi calificado, ya que es necesario que tenga cierto tipo de conocimiento frente al sistema que debe construir, sin embargo, no es necesario que sea calificado debido a que su construcción no es de dimensiones industriales y tampoco conlleva a un riesgo alto.

Finalmente, se utilizaron los indicadores económicos para la evaluación económica, en donde se desarrolló el flujo de caja con el valor actual neto social (VANS), el costo anual uniforme equivalente (CAUE), la tasa interna de retorno social (TIRS) y el periodo de recuperación de capital (PRC). Las ecuaciones de estos indicadores son las siguientes (IACC, 2019; Ministerio de Desarrollo Social y Familia, 2023):

Para el caso del VANS, este se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$VANS = -I_0 + \sum_{t=0}^n \frac{BN_t}{(1+r)^t} \quad (13)$$

Donde BN, corresponde a los beneficios sociales netos, t representa al horizonte de evaluación y r a la tasa de descuento.

Mientras que el CAUE, se genera de la siguiente forma:

$$CAUE = VANS \cdot \left(\frac{(1+r)^t \cdot i}{(1+r)^t - 1} \right) \quad (14)$$

Siendo VANS, el valor actual neto social, t al horizonte de evaluación y r a la tasa de descuento.

En el caso de la TIRS, la ecuación es igual a la Ecuación 13, solo que se reemplaza la tasa de descuento por la TIR. Quedando expresada como:

$$VANS = \sum_{t=0}^n \frac{BN_t}{(1+TIR)^t} = 0 \quad (15)$$

El PRC no presenta ecuación, sin embargo, para obtener su valor se debe contar el número de periodos que toma igualar los flujos de caja acumulado.

Una vez realizado el flujo de caja correspondiente al trabajo realizado, se analizó el caso más optimo y se entregó un resultado final sobre la factibilidad del proyecto.

5. Resultados y Discusión

5.1. Formulación de estrategia

Se realizó un Taller FODA con el fin de generar una estrategia para el proyecto de tratamiento de aguas grises que permita establecer las bases iniciales de cómo será el sistema de tratamiento y bajo qué condiciones debe ser operada.

5.1.1. Análisis estratégico

Se dividirá en un análisis interno donde se identificarán las fortalezas y debilidades que puede presentar el proyecto y un análisis externo que describirá las oportunidades y amenazas que se pueden exhibir. A partir de los análisis presentados se definirá la forma en cómo se abordará el proyecto tomando en consideración los puntos añadidos por la población Lo Vásquez.

5.1.2. Análisis Interno

En cuanto a las Fortalezas levantadas en el taller, a continuación, se presentan los principales aspectos que se deben considerar para verificar y respaldar un buen resultado en el sistema de distribución de aguas grises.

- Cuidado del agua: Al llevar a cabo un sistema de distribución de aguas grises, existe una gran posibilidad de conservación del agua, ya que estas aguas podrían ser reutilizadas para un uso cotidiano, ya sea para limpiar o regar u otra necesidad que sea destinada por el usuario.
- Viabilidad del sistema: Se contribuye a una sostenibilidad ambiental, reduciendo la explotación de recursos en donde se puede obtener agua.
- Huella de carbono: Al tratar las aguas grises de una vivienda o sector, la energía utilizada disminuye, debido a que las aguas que se utilizan para riego u otra necesidad ya no vienen de un sector que no sea directamente de la localidad, por lo que la huella de carbono asociada al agua se reduciría.
- Menor costo en la reutilización: La utilización de un sistema de aguas grises, reduce la opción de compra para utilizar el agua en labores cotidianas de la casa, por lo que las cuentas del agua debiesen ser menores.
- Apoyo/interés de la localidad: Al existir una motivación e incentivo por parte de la localidad trabajada, mejora las opciones de oportunidades del proyecto, generando.

Ahora, respecto a las debilidades levantadas, se darán a conocer los atributos que son perjudiciales para que el proyecto no sea viable.

- **Inversión inicial:** Se debe considerar que un sistema de tratamiento de aguas grises puede presentar modificaciones en cuanto al tamaño, instalaciones o equipos por lo que su costo inicial puede ser elevado.
- **Mantenimiento:** Dependiendo del tratamiento que se les realice a las aguas grises, se puede requerir de un mantenimiento para garantizar que no haya fallas dentro del proceso por lo que habría un aumento en cuanto a los costos operativos.
- **Riesgos para la salud/uso:** Es necesario que la localidad tenga conocimientos con respecto a la reutilización de las aguas grises y que usos se les puede dar, dado que estas aguas no son para uso de consumo ni para ciertos tipos de plantas, por ende, el no conocimiento puede provocar daños a la flora como a la salud humana.
- **Opciones de reutilización:** El sistema de alcantarillado de la población limita las opciones de fuentes donde se origina el agua gris, debido a que las casas juntan estas aguas con las aguas negras, por ende, la capacidad de producción del sistema de tratamiento sería menor.

5.1.3. *Análisis Externo*

Dentro de las oportunidades levantadas a considerar, se presentan los puntos que pueden beneficiar el proyecto.

- **Innovación tecnológica:** Un sistema de distribución de aguas grises entrega oportunidades en términos de innovación y desarrollo de tecnologías nuevas, permitiendo abrir campo en el tratamiento de aguas.
- **Colaboración entre los sectores:** Como existe un interés por parte de la población, se pueden generar ayuda entre otros sectores para incentivar el desarrollo de esta tecnología. Incluso, se pueden dar opciones de colaboración con organizaciones no gubernamentales o empresas para financiar, implementar y promover el proyecto.
- **Sensibilización y conciencia pública:** Al promover el uso responsable del agua y demostrar los beneficios de la reutilización del agua gris, se pueden fomentar cambios positivos en los hábitos y comportamientos de consumos.

Por otro lado, se muestran las amenazas levantadas en el taller que representan los aspectos negativos que limitan el rendimiento de este proyecto

- Ley 21.075: Si bien se establece una regulación con respecto a la gestión de agua protegiendo los derechos del usuario, esta da limitaciones con respecto al acceso al agua imponiendo barreras de implementación al sistema de distribución de aguas grises. Esto podría repercutir en torno a la legalidad de la implementación.
- Falta de Recursos: Es necesario contar con aportes de inversionistas para desarrollar el sistema de distribución de aguas grises. Si no están los recursos necesarios, pueden existir dificultades para llevar a cabo el proyecto.

5.1.4. Estrategia del proyecto

A partir de los análisis internos y externos anteriormente realizados, se determina que el proyecto de un sistema de tratamiento de aguas grises presenta las ventajas necesarias para que este pueda ser realizado, ya que los conceptos asociados a la tecnología, innovación y sustentabilidad son necesarios en la actualidad para enfrentar la escasez hídrica que sufre el país, y más en específico a la quinta región. Frente a esto y considerando el taller realizado con la gente de la población de Lo Vásquez se tomaron las bases necesarias para estipular que parámetros se deben considerar para implementar este sistema.

En primer lugar, la reutilización de aguas grises permitiría que los vecinos de la población puedan darle un uso de manera cotidiana, entregándole beneficios en términos de costos y de oportunidad, pero siendo conscientes que estas prácticas deben ser generadas de manera responsable y con el conocimiento respectivo. Es por esto mismo que se deben generar espacios de conversación para educar y concientizar a los vecinos de tal manera que el uso de esta implementación de sistema de aguas grises no sea un problema y logre ser un rendimiento favorable.

En cuanto al sistema a elaborar, este debe tener las mejores condiciones, un costo económico y una mantención que sea acorde a la posibilidad que los mismos vecinos puedan efectuarla, debido a que existen bajos recursos dentro de la comunidad lo que genera dificultades a la hora de elaborar un tratamiento más costoso y con dimensiones que necesitan de mano de obra especializada. Ahora, si el proyecto es efectuado a partir de una fuente de financiamiento, se debe buscar la ayuda de programas gubernamentales que estén dispuestos a apoyar este beneficio para la comuna, explicando las ganancias que puede traer para la comunidad y por consiguiente a la región.

Es de suma importancia que se proporcionen instancias de conversaciones para obtener aportes por parte del gobierno. Por ejemplo, dentro de las alternativas que

existen, en el año 2023 la CORFO buscó financiar proyectos dentro de la región de Valparaíso que estén enfocados en la sustentabilidad y seguridad del recurso hídrico capaces de reducir la huella hídrica a través de tecnologías que puedan optimizar el recurso del agua financiando hasta un 85% del costo total del proyecto con un monto máximo de 120 millones de pesos (CORFO, 2023). En el mismo año también, pero en una escala más reducida el Fondo Nacional para Organizaciones de usuarios de aguas (FOUA) financió proyectos para pequeños productores que buscan fortalecer su capacidad de gestión tanto la agricultura y en el desarrollo rural como también soluciones asociadas a la escasez hídrica relativas al riego. Su financiamiento era de hasta 6 millones de pesos y se orientaba a usuarios de aguas y comunidades agrícolas (Comisión nacional de Riego, 2023). Ambos financiamientos podrían aportar significativamente al proyecto dado el enfoque que tiene.

Por otro lado, se debe considerar la forma y cuáles serán las fuentes de aguas grises que se utilizarán para ser tratadas. Para este caso, implementar un tratamiento para todas las aguas grises de la vivienda, es necesario un costo asociado mayor que no todos los vecinos pueden optar, ya que el sistema de alcantarillado que contempla la población junta las aguas negras con las aguas grises, por ende, se debería construir un nuevo sistema de alcantarillado que separe las aguas negras de las aguas grises para reutilizar todas las aguas. Es por esto que se decidió que para este proyecto la utilización de aguas grises vendría directamente de las aguas provenientes de la lavadora, dado que la manipulación del canal de salida de aguas grises que proporciona este electrodoméstico es más manipulable, entregando un acceso directo hacia el tratamiento de aguas a elaborar.

Por consiguiente, el sistema puede tomar dos caminos, una construcción de manera individual por casa o centralizado de la comunidad. Para este caso se resolvió que la opción más viable viene dada por un conjunto de sistemas de tratamiento por hogar, porque al levantar un sistema centralizado se necesita de una capacidad de tratamiento mucho más alta que una de manera individual y en este caso como la reutilización de aguas grises viene dada solo por aguas de lavadora, la cantidad de agua a reutilizar será mucho menor. Adicionalmente los residentes de la población manifestaron que al tener un sistema de distribución individual les permitiría darles más opciones de uso al momento de tener un sistema de aguas de manera individual

Es necesario que este sistema pueda reutilizar las aguas de tal forma que la regulación de la ley 21.075 no limite sus usos, por lo que el diseño de este tratamiento tendrá que considerar la calidad de agua gris tratada para los diferentes usos que los vecinos quieran darle.

5.2. Encuesta social

La encuesta social fue realizada a 16 familias correspondiente a cada casa de la población Lo Vásquez, ubicada en Casablanca, en donde se realizaron las preguntas de la Tabla 14, encontradas en el punto 4 *metodología*. Una vez obtenida todas las respuestas, se analizó cada una de ellas para determinar que valores serían necesarios para abordar el proyecto. En la Figura 9 se presenta el mapa de la población, el cual se localiza en el cuadro azul.



Figura 9: Mapa de la población Lo Vásquez.

Los resultados obtenidos de la encuesta realizada a los vecinos de Lo Vásquez se presentan en la Tabla 17, donde se pueden observar las 16 respuestas que equivale a cada casa de la comunidad.

Tabla 17: Respuestas de encuesta realizada a la población de Lo Vásquez.

Casa	Kilos de lavadora	Frecuencia uso lavadora	Carga completa	Personas en casa	Aplicación tratamiento
1	10 y 15	3	Mitad	3	No comestible
2	10 y 15	3	Si	4	Comestible
3	> 10	3	Si	1	Comestible
4	10 y 15	5	Mitad	3	No comestible
5	10 y 15	3	Mitad	4	Comestible
6	> 10	4	Si	6	Comestible
7	10 y 15	2	Si	2	No comestible
8	10 y 15	2	Si	2	No comestible
9	10 y 15	3	Si	4	No comestible
10	10 y 15	2	Si	1	Comestible
11	10 y 15	2	Mitad	4	Comestible
12	> 10	4	Mitad	7	Comestible
13	10 y 15	2	Mitad	4	Comestible
14	10 y 15	2	Mitad	2	Comestible
15	10 y 15	1	Mitad	2	Comestible
16	> 10	2	Si	1	No comestible

A partir de los resultados obtenidos de la encuesta realizada por los vecinos de Lo Vásquez, se puede obtener el consumo de agua utilizado en la lavadora a partir de los kilos de lavadora de cada casa, la frecuencia de uso y la carga con la que se utiliza la lavadora. Cabe destacar que se estableció que el agua a reutilizar corresponderá al ciclo completo de lavadora y no se dividirá por etapas por términos de simplicidad en cuanto al tratamiento a utilizar.

En relación al consumo de agua por kilo de ropa se obtuvo una mediana correspondiente a 9 litros por kg de ropa. Este valor se utilizará ya que reduce la discrepancia de valores que existen en cada fuente bibliográfica buscada, entregando una estimación más representativa independiente de los factores que pueda tener cada lavadora. Ahora, utilizando la Ecuación 1 y el valor de consumo por ciclo, se obtienen los siguientes resultados de consumo de agua de lavadora en las viviendas encuestadas.

Tabla 18: Resultados de consumo de agua por lavado anual, mensual y por lavado en L.

Casa encuestada	Consumo agua por lavado anual, L	Consumo agua por lavado mensual, L	Consumo agua por lavado, L
1	7.227	594	59
2	15.659	1.287	129
3	6.023	495	50
4	4.336	356	59
5	7.829	644	64
6	8.130	668	45
7	19.874	1.634	109
8	19.874	1.634	109
9	15.659	1.287	129
10	18.068	1.485	99
11	11.744	965	64
12	4.065	334	45
13	11.744	965	64
14	9.037	817	54
15	19.874	1.634	54
16	4.517	371	25

5.3. Selección de tratamiento

A raíz de la encuesta la gente manifestó en un 38% que utilizaría el agua para riego de usos no comestibles, mientras que el otro 62% corresponde a riego de plantas comestibles. Frente a esto, y considerando la ley 21.075 de Chile, utilizar el agua reutilizada para plantas comestibles no es viable dado a los problemas legales que podrían considerarse por parte del proyecto. No obstante, se tomó en consideración que el sistema de reutilización tenía que obtener muy buenos porcentajes de remoción para evitar riesgos de enfermedades y poder ser utilizada para la actividad de agricultura, ya que gran parte de los habitantes de la población ejercen esta labor. Para esto se consideraron los sistemas planteados en el punto 3.2 *tratamiento de aguas grises* y se analizaron en base a las ventajas y desventajas que podrían existir. Por un lado, se eliminaron todas las opciones que dependían de un costo muy elevado tanto de operación y mantención, por lo que las opciones se redujeron al sistema de filtración y biofiltro. De igual manera y considerando que ambos procesos requieren de una inversión similar, no requieren de una cantidad excesiva de energía y de productos químicos, se decidió verificar los porcentajes de remoción que poseen estos sistemas en la bibliografía estudiada. Los dos procesos presentan buenos porcentajes de remoción, sin embargo, al utilizar solo uno de estos equipos para el tratamiento de reutilización, este no lograría los requerimientos mínimos para ser reutilizada para las opciones que

desean los vecinos. Por ende, se tomó la decisión de utilizar un tratamiento combinado que tenga estos dos procesos a fin de cumplir con estos requerimientos. Para eliminar posibles concentraciones de coliformes fecales se utilizará una etapa de desinfección con tabletas de hipoclorito de sodio. No obstante, es necesario realizar un estudio técnico y económico para comprobar su factibilidad

5.4. Diseño del tratamiento de aguas grises

En este apartado se presentarán los principales puntos de diseño para el proceso de reutilización de aguas grises a partir de la alternativa seleccionada correspondiente a un sistema de filtración y un biofiltro.

5.4.1. Criterios de diseño

Para abordar el proceso propuesto del sistema de aguas grises, es necesario considerar los siguientes criterios, los cuales son:

- **Modalidad del sistema:** El agua gris proveniente de la lavadora se almacenará en un estanque con un sensor de nivel tipo flotador horizontal para cuando este alcance su capacidad máxima de agua por casa, la bomba se encienda y pueda transportar el agua hacia al sistema de tratamiento.
- **Caudal a tratar:** Su valor es de $0,4 \text{ m}^3/\text{h}$ y será constante e igual para todas las casas, ya que, a partir del diseño de la bomba, el valor es considerado óptimo para su funcionamiento y, además, puede abordar la capacidad máxima de todos los sistemas elaborados sin que estos colapsen (tomando en consideración el diseño del sistema de filtración, biofiltro y tuberías utilizadas en cada casa).
- **Disponibilidad energética:** Corresponderá a la energía proveniente por cada casa, en donde se requerirá solo la energía que proviene de la bomba, la cual tiene una potencia asociada de 245 y 275 W (para las casas que tienen menos y más cantidad de agua a tratar respectivamente).
- **Calidad del agua gris:** Utilizando la Ecuación 2, se obtuvieron los valores de los parámetros que se utilizarán para evaluar nuestro sistema de tratamiento y corroborar si son aptos para reutilizar el agua, tomando en consideración los límites determinados por la ley 21.075 de Chile. A continuación, se presentan los valores que se utilizarán.

Tabla 19: Calidad de aguas grises para el proyecto (Franco, 2007; Jung et al., 2019; Soza, 2023).

Parámetro	Promedio ponderado de la concentración	Unidad
DBO ₅	145,6	mg/L
SST	162,4	mg/L
Turbiedad	80,5	UNT
CF	8	UFC/100ml

5.4.2. Diagrama de flujo del proceso (PFD)

A continuación, se presentan los diagramas de flujos propuestos para los vecinos de la población, Lo Vásquez, en donde dependiendo de la frecuencia de uso que tengan en la lavadora, es el sistema que se ocupara.

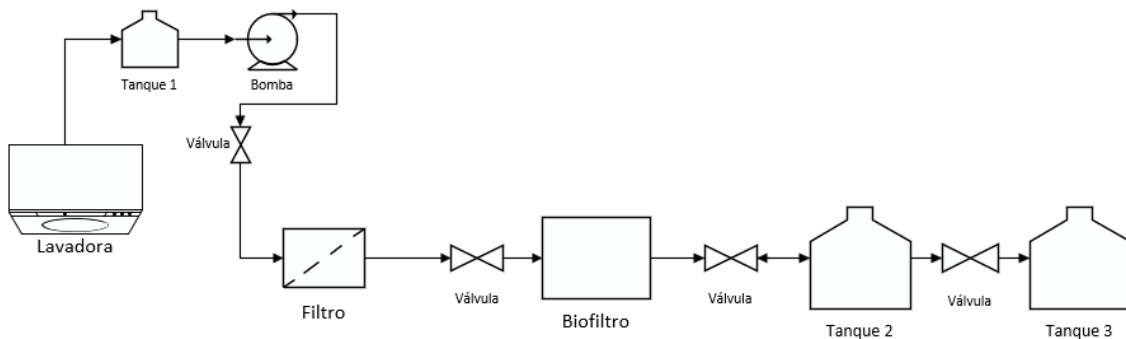


Figura 10: PFD del proceso propuesto para casas que ocupan la lavadora con frecuencia cada cuatro o cinco días.

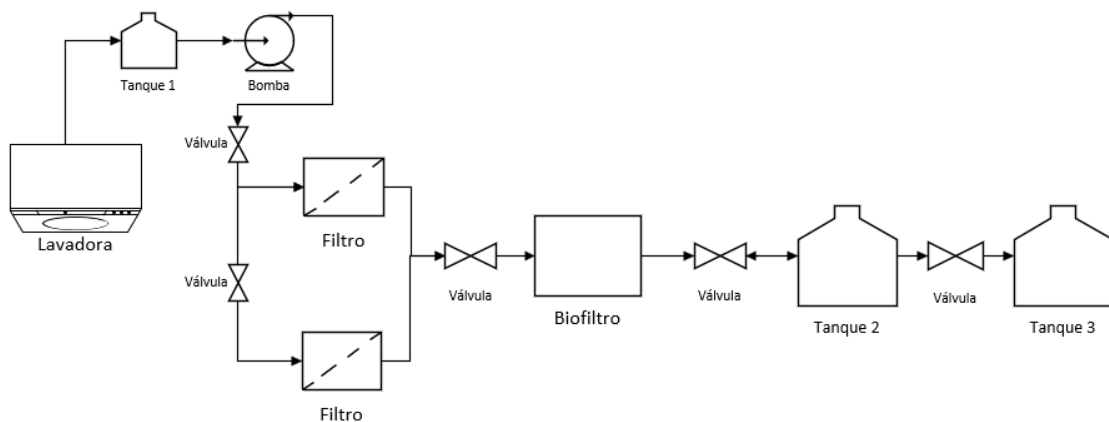


Figura 11: PFD del proceso propuesto para casas que ocupan la lavadora con frecuencia cada uno, dos o tres días.

En la Figura 10, se observa un sistema lineal con una columna de filtración, y un biofiltro mientras que en la Figura 11, se presentan dos columnas de filtración y un biofiltro. Esta diferenciación recurre para las casas que utilizan la lavadora con una frecuencia de 1 a 3 días, ya que la columna estará con una mayor demanda y en caso de que se necesite de una mantención, el sistema pueda seguir siendo operado, mientras al filtro se le realizan las correcciones necesarias.

5.4.3. Descripción de flujo del proceso

El agua proveniente de la lavadora se conectará a través de unas tuberías de PVC a lo largo de tres metros para llegar a un recipiente de PVC, en donde esta se almacenará en el Tanque 1 de polietileno hasta que la lavadora haya expulsado toda el agua del ciclo. Una vez que toda el agua se encuentre en el recipiente, el sensor de nivel tipo flotador horizontal dará la señal para que la bomba empiece a operar y se de inicio al ciclo de tratamiento donde el agua gris pasará por una tubería de PVC de medio metro, se conectará con la bomba e impulsará el agua gris un metro hacia arriba para luego avanzar por 1,35 m de tuberías hasta llegar al tratamiento de filtración de arena y grava que eliminará principalmente la materia suspendida, además de disminuir la turbidez y remover un porcentaje estimado de DBO₅ y DQO (mismo porcentaje de remoción para ambos). A medida que el agua se va filtrando, esta irá en dirección hacia el biofiltro, el cual está compuesto por 3 etapas, uno de arena, de grava y de carbón activado. En estas etapas, sobre el lecho filtrante estarán incorporadas plantas que se alimentarán de los nutrientes que proporcionan estas aguas grises, tales como los detergentes, mientras que el material filtrante seguirá removiendo porcentajes de sólidos suspendidos, DBO₅ y DQO que no hayan sido removidos en el tratamiento de filtración de arena grava. El tiempo de retención de estas aguas variará dependiendo del sistema que tenga cada casa, sin embargo, tiene una estimación de entre 3 a 5 días.

Una vez finalizada la etapa del biofiltro, el agua pasará por una tubería de PVC inclinada de medio metro al Tanque 2 de polietileno en donde habrá una dosificación de hipoclorito de sodio a través de una tableta. El agua se mantendrá en el tanque durante 30 min para que la tableta logre entrar en contacto con el agua y pueda eliminar los microorganismos patógenos contaminantes. De esta manera el agua bajará sus concentraciones y podrá estar lista para su reutilización, siendo llevada al Tanque 3 de polietileno en donde podrá ser almacenada y utilizada para el uso que el residente estime conveniente. Las propiedades del tanque son adecuadas para el almacenamiento ya que no libera sustancias tóxicas y le entrega seguridad dado su dureza.

5.4.4. Balance de materia

Tomando en consideración la calidad de los parámetros descrita en los criterios de diseño del punto 6.1 *Criterios de diseño*, podemos realizar los balances correspondientes hacia al sistema de filtración y biofiltro, con el fin de obtener las concentraciones finales de los parámetros en las condiciones adecuadas para su reutilización. Para determinar estas concentraciones, se utilizó el porcentaje de remoción que tienen estos procesos, los cuales fueron seleccionados a partir de referencias bibliográficas, en donde se consideró un promedio ponderado a partir de las similitudes que tenían estos trabajos con respecto al sistema elaborado. Se utilizó

la Ecuación 2 para determinar estos valores. Se presenta la Tabla 20 con los parámetros considerados para determinar sus concentraciones y los promedios ponderados de ambos sistemas.

Tabla 20: Porcentajes de remoción respecto a lo que entra en los sistemas de filtración (Al-Zou'by et al., 2017; M. A. Díaz et al., 2021; Huanacuni, 2021; Palmer & Corpus, 2018) y biofiltro (Rodríguez, 2014; Tejedor et al., 2020; Viguera et al., 2013)

Parámetro	Promedio ponderado de porcentaje de remoción del sistema de filtración %	Promedio ponderado de porcentaje de remoción del sistema de biofiltro %
DBO ₅	83,7	92,2
SST	73,4	91,0
Turbiedad	78,6	67,7

Ahora, utilizando la Ecuación 4 es posible obtener en la Tabla 21 las concentraciones finales para los sistemas de filtración y biofiltro. Cabe mencionar que la concentración final de los parámetros de la filtración será la concentración inicial del biofiltro.

Tabla 21: Concentraciones iniciales y finales de los sistemas de filtración y biofiltro.

Parámetro	Concentración inicial	Concentración final del tratamiento de filtración	Concentración final del tratamiento de biofiltro	Unidad
DBO ₅	145,6	23,7	1,8	mg/L
SST	162,4	43,2	3,9	mg/L
Turbiedad	80,5	17,2	5,6	NTU

5.4.5. Diseño de la bomba, sistema de filtración y biofiltro

Para diseñar el tratamiento de aguas grises se tuvo que dimensionar la vivienda y el espacio que había en el jardín. Para esto se utilizó Google Earth y se estimó que desde el sector donde se ubica la lavadora hacia los materiales y equipos, se tiene una distancia de 3 metros, por lo que se requiere de una tubería y accesorios para conectar el sistema con la lavadora. A continuación, se presenta el diseño de los siguientes equipos.

5.4.5.1. Bomba

Para diseñar la bomba, y determinar cuál es la opción a utilizar, es necesario realizar un balance de energía al sistema que se compone del estanque a la bomba y de la bomba hacia la columna de filtración. Se considerarán los siguientes criterios para el balance de energía.

- Tanto V_1 como V_2 tendrán valores igual a 0, ya que el tanque y la columna presentan dimensiones mucho mayores que en el caso de la tubería por la que pasa el fluido por lo que al ser un valor ínfimo, este no se considerará dentro de la ecuación.
- z_1 se encuentra a la misma altura de la bomba, por ende, tendrá un valor igual a 0, mientras que z_2 esta a 1 metro sobre la bomba.
- El valor de P_1 se encuentra en un tanque cerrado por lo que se deberá calcular la presión que el flujo ejerce sobre este, mientras que P_2 se encuentra en la columna que está abierto a la atmósfera, por ende, tendrá el valor de 1 bar.

Utilizando estos criterios, la Ecuación 5 y despejando la variable H, la ecuación queda de la siguiente forma.

$$H = z_2 + \frac{\Delta P}{\rho g} + \sum h_L \quad (16)$$

Primero calcularemos P_1 . Este valor fue calculado a partir de la casa que contiene más agua y con menos agua, arrojando dos resultados. Para ambos casos se utilizó la Ecuación 6, en donde el parámetro determinante para esta ecuación corresponde a la altura, ya que al haber una mayor cantidad de agua la presión que se ejerce es mucho mayor que en el de menor agua. Por ende, se calcularon las alturas de ambos casos, las cuales fueron calculados a partir del área del estanque y el volumen que contiene cada recipiente. De esta forma se obtienen las siguientes alturas.

Tabla 22: Alturas de casa que consume más y menos agua de la lavadora.

h Recipiente con más agua, m	0,43
h Recipiente con menos agua, m	0,084

Una vez obtenidas las alturas, se procede a utilizar la Ecuación 6, arrojando los siguientes resultados.

Tabla 23: Presiones manométricas obtenidas de casa que consume más y menos agua de la lavadora.

P ₁ Casa con más consumo de agua, Pa	3997.9
P ₁ Casa con menos consumo de agua, Pa	628,4

Cabe destacar que el valor de la altura que se coloca en la Ecuación 6, presenta una diferencia de 0,02 m debido a que es necesario que exista un mínimo de nivel a la salida de agua del estanque para que la bomba al momento de succionar no aspire aire y cavite.

Utilizando la Ecuación 7, se podrá obtener el valor de pérdida de carga, sin embargo, antes de obtener este valor, es necesario establecer las propiedades y cálculos de la tubería que se utilizarán para resolver este parámetro. Se presenta a continuación las Tablas 24 y 25, la primera correspondiente a los datos y cálculo de los parámetros a utilizar considerando los límites de la tubería y la segunda, a las propiedades que tienen dicha tubería.

Tabla 24: Datos y cálculos de la tubería (en el sistema).

Distancia del sistema	2,35	m
Distancia máx. de 1 tubería	3	m
N° tuberías	1	-
Velocidad máxima	5	m/s
Velocidad mínima	0,6	m/s
Q máximo	2,77	m ³ /h
Q mínimo	0,33	m ³ /h
Diámetro externo tubería	0,02	m
Diámetro interno tubería	0,014	m
Área tubería	0,0002	m ²
Valores a utilizar		
Velocidad a utilizar	0,7	m/s
Q a utilizar	0,4	m ³ /h

Tabla 25: Propiedades de la tubería a utilizar.

Tipo	Diámetro interno [mm]	Rugosidad absoluta [mm]	Rugosidad relativa
PVC	14	0,0015	0,0001

En relación a la Tabla 24, podemos dar cuenta que las velocidades permitidas de la tubería se encuentran entre los 5 a 0,6 m/s y, en efecto, caudales que varían entre los 2,77 y 0,33 m³/h. Tomando en consideración que la cantidad de agua que se almacena por cada casa en el estanque es bajo, es necesario tomar un rango óptimo para la elección de caudal, por lo que se determinó que los valores de caudales no superen los 0,45 m³/h para darle continuidad a la bomba y en efecto esta tuviese una eficiencia mecánica con un porcentaje acorde a lo establecido en la literatura. Cabe destacar que se eligió el valor mínimo para todas las casas ya que como solo se utiliza agua de la lavadora, el consumo proveniente de este no permite que las velocidades sean altas y, en consecuencia, los caudales tampoco de tal forma que, al trabajar con este tipo de parámetros, es más eficiente que sean constantes.

Por consiguiente, se decidió tomar un valor medio del rango utilizado, dejándolo como punto de operación. Estos valores son los que se encuentran en la Tabla 24, no obstante, es necesario comprobar si la bomba a utilizar califica para los parámetros seleccionados.

Ahora, se procede a usar la Ecuación 8, correspondiente al número de Reynolds. Para esto se utilizaron valores correspondientes a las propiedades del flujo que se presentan en la Tabla 26.

Tabla 26: Propiedades del flujo a tratar.

ρ	1000	kg/m ³
v	0,7	m/s
μ	0,0001	Pa · s

Utilizando la ecuación 8, el valor del número de Reynolds tendrá un valor de:

$$Re = \frac{1000 \cdot 0,014 \cdot 0,7}{0,0001} = 1 \cdot 10^4 \quad (17)$$

Ahora, usando el diagrama de Moody, es posible obtener el factor de fricción. Este se encontrará en Anexo A. Su valor corresponde a:

$$f = 0,031 \quad (18)$$

Por otro lado, las pérdidas de carga de accesorios se obtuvieron a partir de la bibliografía (Çengel & Cimbala, 2012), donde se determinó el K_L para cada uno de los accesorios que son parte del sistema. Se presenta la Tabla 27 donde se puede apreciar el valor y la sumatoria total de estas pérdidas de carga.

Tabla 27: kl asociado a cada accesorio y valor total.

Accesorio	Cantidad	kl
Válvulas de compuerta	1	0,2
Tee	1	2
Codo 90°	3	0,9
Reductor	1	0,1
Total	5	

Una vez obtenido todos estos valores, podemos determinar el valor de h_l , utilizando la Ecuación 7:

$$h_{l,total} = \left(0,031 \cdot \frac{2,35}{0,014} + 5 \right) \frac{0,7^2}{2 \cdot 9,8} = 0,26 \text{ m} \quad (19)$$

Se procede a determinar la altura del sistema para el caso que utiliza una presión con menos agua y con más agua, utilizando la Ecuación 6, quedando como resultado.

$$H = 1 + \frac{101325 - 3998}{1000 \cdot 9,8} + 0,3 = 11,19 \text{ m} \quad (20)$$

$$H = 1 + \frac{101325 - 628}{1000 \cdot 9,8} + 0,3 = 11,53 \text{ m} \quad (21)$$

Como se mencionó anteriormente, estas alturas corresponderán a nuestros puntos de operación. Como se puede observar, si bien las alturas son parecidas, se elegirá una bomba para cada caso, debido a que las curvas de las bombas tienen una variación prolongada cuando se trata de caudales que están por debajo de 1 m³/h y sus alturas oscilan entre los 10 m a 15 m.

Se procede a graficar el caudal en función de la altura del sistema. Con respecto a las curvas de las bombas, se utilizaron dos bombas encontradas en el comercio, las cuales operaban con un bajo caudal y contenían sus fichas técnicas para elaborar dichas curvas. A continuación, se presenta la Figura 12 con los puntos indicados. Los valores de cada velocidad, factor y altura presentes en el gráfico se presentarán en el Anexo B correspondiente.

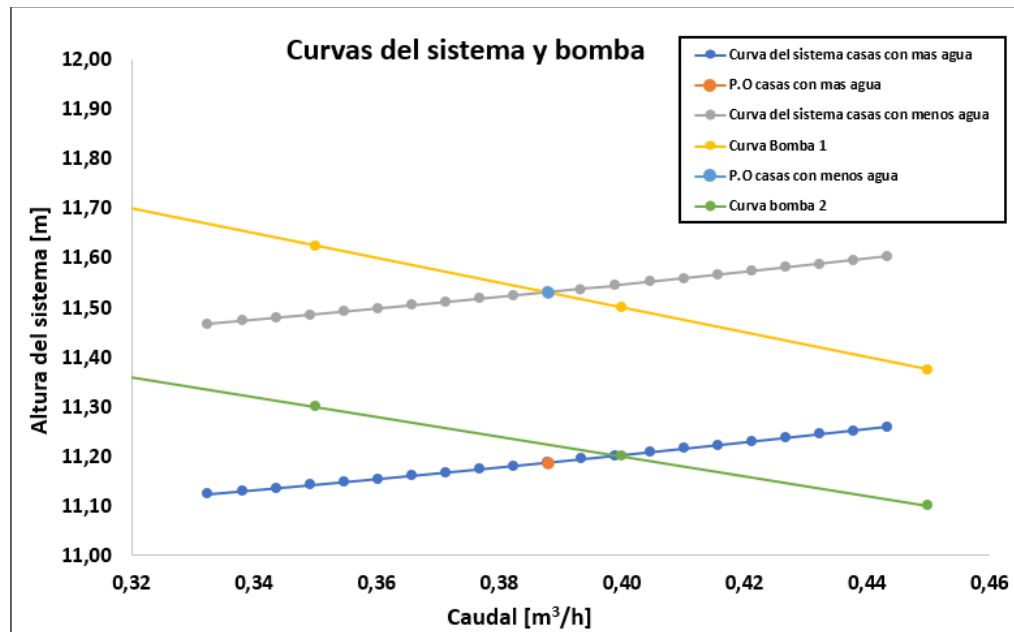


Figura 12: Curva del sistema, Curvas de la bomba y puntos de operación para casas con más y menos consumo de agua. El proveedor de la bomba 1 corresponde a BestFlow y su modelo es RS 20/12Z (Bestflow, 2020) , mientras que el de la bomba 2 es de aiguapres y su modelo es Jolly Pump 12 (Aiguapres, 2021).

Se puede observar que la bomba 1 pasa por el punto de operación que se escogió, cumpliendo con los requisitos que se necesitan para que esta pueda operar, mientras que la bomba 2 si bien no pasa directamente por el punto de operación seleccionado, este está muy cercano a estarlo, por lo que se determinó que de igual forma correspondería a la bomba a utilizar para las casas que utilizan más agua, ya que la búsqueda de bombas fue mediante dos criterios a considerar, siendo estos su caudal máximo y su valor en el mercado, y en este caso, el precio en el comercio es óptimo para poder trabajarlo en un sistema que requiera de un bajo costo.

Ahora, tomando en cuenta las bombas seleccionadas, estas corresponden del tipo de aumentadoras de presión a escala domiciliaria (de superficie) y en ambos casos sus fichas técnicas no presentan curvas de NPSH requerido, por lo que no es necesario calcular este valor ya que el fenómeno de cavitación no es tan común en este tipo de bombas.

5.4.5.2. Sistema de filtración

El proceso de filtración corresponde a la primera etapa del sistema de tratamiento para la reutilización de aguas grises. Para dimensionarlo, se detallará en función de las demandas que se deben realizar para que el equipo funcione de manera correcta.

Cabe destacar que los valores determinados serán iguales para todas las casas y que el caudal con el que entra al sistema corresponde al calculado por el dimensionamiento de la bomba y diámetros de la tubería.

En primer lugar, para las dimensiones de la columna de filtración fue necesario considerar el consumo de agua por lavadora que tiene cada casa. Para efectos del trabajo, se consideró solo la casa con mayor cantidad de agua, ya que es el caso en donde el dimensionamiento tiene los mayores requerimientos. Esta casa tiene un total de 117 litros por lavado, por lo que la columna de filtración debe tener como mínimo un valor mayor a los 117 litros. Frente a esto, se buscó un tanque que tuviese las condiciones para funcionar como equipo de filtración y cumpliera con el volumen mínimo solicitado. Las dimensiones del tanque cilíndrico encontrado corresponden en este caso a 0,85 m x 0,50 m, y en efecto, al aplicar la Ecuación 10 y 11, del área y volumen del cilindro respectivamente es posible comprobar si el tanque cilíndrico cumple con las condiciones mínimas para ser utilizado como sistema de filtración. Los valores del tambor que se obtienen son los siguientes:

Tabla 28: Resultados área y volumen del tambor.

A	1,73	m ²
V	0,167	m ³

Como el volumen del tanque es mayor que el volumen del consumo de agua, el dimensionamiento de este podría funcionar en buenas condiciones.

Ahora, para obtener la velocidad de filtración se utiliza la Ecuación 12. El valor obtenido es de 0,22 m/h y corresponde a un valor de un sistema de filtración lenta, que concuerda con la información bibliográfica estudiada. Estos filtros tratan caudales de bajas proporciones, poseen altas eficiencias de remoción y sus costos de operación y manejo son fáciles de entender y capacitar (Ardilla, 2013).

En cuanto a las alturas de la arena y grava, se utilizó un valor proporcional correspondiente a la experimentación que utilizo los mismos métodos filtrantes ocupados en el sistema (Soza, 2023), entregando una altura de arena y grava de 0,35 m 0,10 m respectivamente. Destacar que las dimensiones de los diámetros de la arena y grava corresponderán al de la experimentación realizada.

Finalmente se presenta la Tabla 29, correspondiente al resumen de los valores del dimensionamiento de la columna de filtración a utilizar en el sistema de tratamiento.

Tabla 29: Tabla resumen dimensiones sistema de filtración.

Parámetros del sistema de filtración	Unidad	Valor
Velocidad de filtración	m/h	0,22
Área del recipiente	m ²	1,73
Altura del sistema de filtración	m	0,85
Altura de la arena	m	0,35
Altura de la grava	m	0,10
Diámetro del sistema de filtración	m	0,50

5.4.5.3. Biofiltro

Este sistema corresponde a la segunda etapa luego de que el agua haya pasado por el sistema de filtración.

En cuanto a las dimensiones de largo, ancho y profundidad, se tomó un valor proporcional de un trabajo, tomando en consideración el consumo de agua de los habitantes de la población. En este caso, se consideraron los siguientes valores (Cruz, 2013):

Tabla 30: Dimensiones del biofiltro.

Largo, m	1,5
Ancho, m	0,4
Profundidad, m	0,4

Al calcular el volumen a partir de las dimensiones presentadas, este arroja un valor de 0,24 m³, valor muy superior a la cantidad máxima de consumo de agua que se tiene en las casas que corresponde a 0,13 m³. Sin embargo, se debe considerar el tiempo de retención y la frecuencia de lavado de los habitantes para que el biofiltro pueda soportar la carga de agua de cada casa. Estudios indican que el tiempo varía entre los 3 a 5 días, por lo que para evitar que exista la sobrecarga hacia el biofiltro, es necesario que el tiempo de retención sea de 3 días máximo (Brikké et al., 2006). Ahora, considerando el Artículo 17 de la Ley 21.075, el tiempo que puede permanecer el agua gris dentro de un sistema de tratamiento es de 24 horas, valor que cumple con las referencias bibliográficas y evita la sobrecarga del biofiltro (Ministerio de Salud, 2018).

Sin embargo, es necesario contar con capacitaciones para los vecinos de Lo Vásquez para explicar el proceso por el que pasa el biofiltro, ya que, esté al contener una capa biológica en donde viven microorganismos, deben

permanecer con una constante alimentación, si no, morirán y la eficiencia del biofiltro decaerá sin cumplir con los porcentajes de remoción esperados. De esta manera, se aconseja que los vecinos cambian su frecuencia de lavado a menores días, de tal forma que los microorganismos no pierdan su actividad metabólica.

Ahora, los elementos filtrantes a utilizar corresponderán a grava, arena y carbón activado de 50, 25 y 50 mm respectivamente, los cuales estarán en tres secciones diferentes. En la primera sección se encontrará la grava con un espacio de 0,25 m de largo, luego viene la arena que utilizara 1 metro de largo, mientras que el carbón activado ocupara los otros 0,25 m de largo.

Adicionalmente, se debe considerar una pendiente que puede variar entre los 0,1 a 1% para que el agua pueda escurrir dentro del biofiltro y esta no quede estancada. En este caso se consideró un valor medio de 0,5% de pendiente ya que corresponde al valor usual (Cruz, 2013).

Otro factor importante a considerar en el biofiltro son los procedimientos de mantención que se deben realizar y que tipo de operación debe recibir para su funcionamiento.

En cuanto a su mantenimiento, se debe tener en cuenta que los biofiltros requieren de poco gasto, es más, dicha mantención recae directamente en las familias que adquieren el sistema. Sin embargo, es simple y no necesita de herramientas específicas para poder mantenerla. Este proceso utiliza plantas, las cuales deben ser podadas a medida que vayan creciendo de tal manera que cuando estas se poden, las plantas puedan absorber más nutrientes y vuelvan a su etapa de crecimiento. Es de suma importancia que los productos a utilizar para la limpieza del biofiltro no sean nocivos para las plantas. La utilización de químicos y jabones no biodegradables pueden perjudicar al sistema considerablemente (Buenfil, 2015).

La acumulación de sólidos también es un fenómeno que ocurre en este tipo de sistemas el cual es fundamental para evitar saturación en el biofiltro. En general, las bibliográficas estudiadas explican que no hay un tiempo de mantención específico para cambiar el material filtrante, no obstante, cuando el agua empieza a desbordar por la parte superior del filtro en vez de fluir por la salida predeterminada que tiene, es un indicio de que se debe cambiar el material por otro con igual o las mismas características. Esto puede ocurrir a partir de los tres meses o incluso más si las cargas orgánicas del agua no son muy elevadas (Cruz, 2013).

A partir de lo anterior, es posible determinar que el biofiltro no puede sustentarse solo y requiere de un monitoreo regular y mantenciones periódicas para mantener el rendimiento del equipo. En efecto, al cumplir con estos requisitos, los microorganismos dentro del biofiltro seguirán teniendo la capacidad de descomponer y eliminar los contaminantes y el agua tratada que salga del sistema cumplirá con las concentraciones señaladas.

5.5. Estimación de inversiones y costos

La evaluación económica del proyecto es de carácter social, por ende, es necesario considerar ciertos aspectos distintos a un proyecto privado con fines de lucro. En el caso de las inversiones y costos de operación podremos dar cuenta de algunos precios sociales y factores de correcciones sociales que permitirán al momento de la realización de flujos de cajas tener un valor estimativo real al proyecto presentado.

5.5.1. Estimación de las inversiones (CAPEX)

Para la realización del Capex, es necesario considerar los siguientes puntos:

- Se utilizó la información del servicio de impuestos internos para obtener la vida útil y la depreciación acelerada de los materiales a utilizar dentro de las inversiones. Para los materiales que tienen menos de 3 años de vida útil, estos no se consideran dentro de un valor de anotación (SII, 2003).
- El estudio de inversión se realizará por implementos y equipos que se necesitan por casas, por lo que el valor final de la inversión debe ser multiplicado por las 16 casas de la población, aun sabiendo que no todas las casas presentarán el mismo sistema y la misma cantidad de elementos a utilizar, por ende, el valor final corresponderá a un aproximado que puede ser menor (debido a que la inversión se realizó con las casas que necesitan el sistema de reutilización con más materiales).
- La moneda a utilizar es el dólar ya que es la más utilizada a nivel mundial y en instrumentos de inversión. También es óptima de usar dado a la rentabilidad y menor riesgo que presenta. El valor a utilizar en la conversión de dólar a peso chileno es de \$851,94.

A continuación, se presenta la Tabla 31 en donde se ve el CAPEX social del proyecto con los elementos anteriormente mencionados.

Tabla 31: CAPEX social del proyecto contabilizado por una casa (en dólares).

Artículo	Cantidad	Valor Unitario	Valor total	Vida Útil	Depreciación acelerada
Tubos de PVC 20 mm	4	\$1,67	\$6,67	30	10
Tee 20 mm	2	\$0,48	\$0,97	30	10
Reductor	2	\$0,41	\$0,83	30	10
Codos 20 mm	6	\$0,29	\$1,72	30	10
Válvulas de compuerta	6	\$19,63	\$117,78	10	3
Bomba de superficie	1	\$73,86	\$73,86	10	3
Dosificador de cloro	1	\$5,93	\$5,93	-	-
Sensor de nivel	1	\$8,87	\$8,87	-	-
Ladrillo fiscal Linares	100	\$0,30	\$29,58	50	16
Cemento	2	\$2,74	\$5,48	20	6
Bidones de arena	21	\$0,93	\$19,47	-	-
Bidones de grava	4	\$0,91	\$3,63	-	-
Tambor filtración	5	\$52,27	\$261,34	30	10
Sacos de carbón	4	\$2,35	\$9,40	-	-
Alambre menea	1	\$25,72	\$25,72	20	6
Implementos de construcción	1	\$79,16	\$79,16	5	1
Mano de obra	1	\$536,02	\$536,02	-	-
Total	162	\$811,51	\$1.186,40		

Al observar la Tabla 31, se pueden ver los costos asociados a la inversión con una suma total de \$1.186,40 dólares por casa. En la Tabla 32 se presenta la tabla resumen con la inversión por casa y su inversión total por las 16 casas asociadas que participan dentro del proyecto.

Tabla 32: CAPEX social del proyecto contabilizando las 16 casas en dólares.

Inversión total por casa	\$1.186,40
Inversión total por 16 casas	\$18.982,40

Adicionalmente, dentro de la inversión total por las 16 casas, es necesario considerar algunos valores que estarán presentes para la seguridad y el cumplimiento de la construcción del sistema de tratamiento. Estos valores corresponden al del supervisor de las obras, el capacitador y las licencias para construir. Cabe destacar que solo se necesitará de un supervisor y un capacitador para las 16 casas de la población, por lo que este valor no tendrá un factor multiplicativo en el valor final, mientras que en el caso del permiso que se debe solicitar para la construcción, este tampoco tendrá un factor asociado a las casas ya que su valor total está determinado para un número que ya engloba a la totalidad de las casas.

En el caso del supervisor de las obras, este se encargará de verificar el cumplimiento de la construcción del sistema de tratamiento, donde podrá dar órdenes y ver si se están cumpliendo los tiempos del trabajo empleado. Se necesitará del factor social de mano de obra, siendo clasificada en la posición de calificada. De esta manera se presenta la Tabla 33 con el sueldo del supervisor, el factor y el sueldo ajustado del supervisor.

Tabla 33: Datos correspondientes al sueldo del supervisor de las obras.

Sueldo supervisor mano de obra	\$564,23
Factor mano de obra calificada	0,97
Sueldo ajustado	\$536,02

En cuanto a los permisos, es necesario solicitar a la SEREMI de salud la aprobación del proyecto de un tratamiento para una propiedad. Esta resolución buscará que se cumpla con las instalaciones regularizadas. Dentro de las opciones más cercanas al proyecto propuesto se encuentra la “aprobación de proyectos de agua potable o aguas servidas domesticas particular”, siendo en este caso el agua gris como el potencial de agua servida doméstica para el proyecto. Los costos del trámite se encuentran en la Tabla 34.

Tabla 34: Costos de permisos para sistemas de tratamiento.

Hasta 35 personas	\$59,98
Por capacidad para cada 25 personas adicionales	\$24,06
Arancel máximo	\$970,14

Observando la Tabla 34, se costeará solo el valor de las 35 personas más el arancel (se tomará como valor máximo) ya que en este caso la aprobación lo toma como un sistema centralizado y no se tiene información para sistemas individuales. No obstante, se tomará un valor referencial que englobará las 16 casas de la población. De esta manera el valor final anual corresponderá a la suma de \$1.030,12 dólares.

Por otro lado, las capacitaciones serán impartidas por una persona capaz de entregar la información necesaria para que la población pueda conocer el sistema de tratamiento, su funcionamiento y como darle mantención en los cambios de arena y grava en el proceso de filtración y biofiltro. Como se mencionó anteriormente, solo se necesitará de un capacitador para la entrega de información para los vecinos, y será solo durante los primeros dos meses con capacitaciones semanales. Esta labor será parte del factor social de mano de obra, siendo clasificada en la posición de calificada. De esta manera se presenta la Tabla 35 con el sueldo que recibiría la persona, el factor correspondiente y el valor final anual.

Tabla 35: Datos correspondientes al sueldo del capacitador.

Sueldo capacitador	\$488,27
Factor mano de obra calificada	0,97
Sueldo ajustado	\$473,62
Sueldo total a pagar	\$947,24

De esta manera, se presenta en la Tabla 36 los valores que se consideran parte de la inversión final, el valor final contabilizado por las 16 casas y el CAPEX social total del proyecto.

Tabla 36: CAPEX social total del proyecto en dólares.

Supervisor	\$536,02
Capacitador	\$947,24
Permisos	\$1.030,12
CAPEX de las 16 casas	\$18.982,40
CAPEX social total	\$21.495,77

5.5.2. Estimación de los costos de operación (OPEX)

En el caso del OPEX, los costos se establecerán anualmente y de manera fija, es decir, es independiente de la cantidad de agua que se almacene para su posterior reutilización. Dependiendo del costo, este puede tener un cargo mensual, cuatrimestral y anual. En el caso de que sea en los primeros dos mencionados, es necesario cuadrar estos valores para que alcancen el año.

Entre los gastos mensuales, se tiene el consumo de energía que proviene directamente del uso de la bomba, Este valor se calcula a partir de la potencia que utiliza la bomba por hora, por la cantidad de horas utilizadas y los días que estará en funcionamiento. Las tarifas utilizadas corresponden a los suministros de la V región, comuna de Casablanca. Los valores utilizados se encuentran en la Tabla 37 (Chilquinta Distribución, 2023)

Tabla 37: Tarifas correspondientes al suministro de energía de Casablanca, región de Valparaíso.

Cargo fijo	\$1,55
Cargo por tramo 1	\$0,04
Valor mensual por utilizar la bomba	\$2,86
Valor anual a pagar por utilizar la bomba	\$34,32

Cabe destacar que el valor de tramo 1 corresponde a equipos que utilizan una cantidad menor o igual a 200 kWh.

Ahora, en cuanto a los costos anuales encontramos el mantenimiento que se debe realizar para el sistema de reutilización de aguas grises dentro de una casa. Este valor vendrá a través del documento de filtraciones lentas en donde especifican que los costos de mantenimiento tendrán un valor correspondiente al 10% de la inversión, siendo en este caso el valor entregado del CAPEX social (Rojas, 2000).

El último costo a considerar serán los suministros que se deben comprar durante el año para que el sistema de tratamiento no quede sin funcionamiento. Para determinar cuándo comprar las dosis, se utilizaron datos bibliográficos. En el caso de la arena y la grava no se especifica exactamente cada cuanto tiempo se debía realizar el cambio, por lo que se decidió que fuera cuatrimestralmente para que la renovación no fuera tan prolongada. A continuación, se presenta una Tabla 38 con los suministros y las dosis.

Tabla 38: Costos de suministros con sus dosis periódicas de reposición.

Suministros		Dosis
Tabletas de cloro	\$76,74	Anual
Arena	\$3,71	Cuatrimstral
Grava	\$3,63	Cuatrimstral
Carbón	\$2,35	Anual
Total anual	\$86,42	

Finalmente se presenta la Tabla 39 con el resumen de los costos fijos finales anuales de cada dato considerados dentro del OPEX.

Tabla 39: OPEX social anual del proyecto en el primer año contabilizado por una casa.

Costos fijos	Valor	Valor anual total
Mantenimiento	\$118,64	\$118,64
Consumo de energía	\$2,86	\$34,32
Suministros	\$86,42	\$86,82
Total		\$239,39

En la Tabla 39 podemos ver los costos asociados a los costos de operación con su suma total de \$239,39 dólares anual. Ahora, para obtener el valor final, este debe ser multiplicado por el total de casas que participan en el proyecto, sin embargo, y como se mencionó anteriormente, los valores de capacitaciones y permisos no se multiplicarán por el factor de las 16 casas, por ende, el valor final será menor. En la Tabla 40 se presentan los valores finales de los costos de operación.

Tabla 40: OPEX social total del proyecto en dólares.

Costo de operación total por casa	\$239,39
Costo de operación total por 16 casas	\$3.830,19

5.6. Evaluación económica

En el próximo análisis, se profundizará en la evaluación económica del proyecto, donde se examinarán los costos, beneficios y flujos de caja a fin de determinar la viabilidad financiera a largo plazo

5.6.1. Bases de la evaluación económica

Para determinar la evaluación económica del proyecto es necesario conocer las bases mínimas para entender cómo se realizó el trabajo. De esta forma, se expone la Tabla 41 en donde se indican algunos criterios a considerar.

Tabla 41: Criterios para la evaluación económica.

Vida útil o horizonte de evaluación del proyecto	20 años
Tasa de descuento	6%
Moneda a utilizar	Dólar (\$)

El horizonte de evaluación corresponde a 20 años ya que a partir de la bibliografía de (Sapag et al., 2014), es necesario considerar una vida útil posible de prever y en este caso tomando en consideración los valores entregados por el SII de los activos fijos, el valor estimado a 20 años está dentro del margen para construir un flujo de caja con ese número de años.

En cuanto a la tasa de descuento, en el informe de precios sociales del año 2023, se presenta este valor vigente para el período, siendo este de un 6%.

Finalmente, la moneda a utilizar corresponderá al dólar ya que como se mencionó anteriormente es la más utilizada a nivel mundial lo que permite darle más rentabilidad. También, al ser utilizada en las transacciones internacionales la moneda toma un peso más estable y fuerte frente a otras monedas internacionales.

5.6.1.1. Estructura de ingresos

El ingreso asociado a este proyecto se presenta principalmente como un beneficio cualitativo, es decir, no se presentan valores de ingreso monetario que se verán reflejados a largo plazo, por lo que si proyectamos en un horizonte de evaluación los 20 años que se utilizarán, el valor en los flujos de caja tenderá a ser negativo.

Esto se debe principalmente a que el proyecto busca reducir el impacto social, ambiental y de sostenibilidad hacia el recurso del agua de tal manera que al combatir la escasez hídrica a partir del tratamiento de aguas grises diseñado, se irá evitando el uso de agua potable y a su vez se reducirán las presiones de fuentes de agua dulce, dándole un beneficio de ahorro a la población e incluso a los sectores aledaños entregándole una oportunidad para entidades que requieren de la utilización de agua potable.

No obstante, la población a medida que genera esta agua reutilizada puede darle usos cotidianos tales como limpieza, riego ornamental o directamente en su producción de agricultura que hoy en día, sin el sistema de tratamiento, son realizados de igual forma, por lo que el beneficio cuantitativo se ve reflejado en la reducción de la cuenta del consumo de agua por casa, ya que existe un ahorro monetario por parte de la población, el cual se denota mensualmente en la cuenta del agua (de la empresa Esval)

Para determinar este valor, se utilizó el cargo fijo del cliente por mes más el consumo variable de agua potable (en m³) en horario no punta por casa considerando la frecuencia de uso de la lavadora y la disposición con tratamiento de aguas servidas correspondiente a aportes de financiamiento por capacidad. En la Tabla 42 se ven reflejado los valores mencionados anteriormente y su respectivo valor total anual (considerando las 16 casas de la localidad) (Esval S.A, 2022).

Tabla 42: Tarifa consumo de agua en Casablanca con valor del consumo total de las casas de la población de Lo Vásquez.

Ingreso	Cargo fijo (\$/mes)	Consumo variable de agua potable no punta (\$/m³)	Disposición con tratamiento de aguas servidas (\$/m³)	Valor total anual
Consumo de agua	\$1,58	\$1,13	\$0,25	\$557,92

El valor total anual correspondiente al que se indica en la Tabla 41, se verá reflejado en el flujo de caja durante el horizonte de evaluación del proyecto. Es importante mencionar que, el valor del dinero cambia con el tiempo, por ende, se realizó una proyección en los últimos 10 años del consumo de agua en las cuentas de Esval, generando una tendencia del 3% aproximadamente, lo que implica que cada año se le agregara este porcentaje al valor total anual que corresponda.

Por otro lado, también se consideró otro caso, en donde el beneficio de ahorro viene dado por el mismo consumo de agua, pero, el proveedor de esta agua ya no corresponde a la empresa Esval, si no, a los camiones aljibes que venden agua potable por metro cubico. En este caso, se tomó un valor máximo de \$20,77 dólares por metro cubico (Fragkou et al., 2022), y esta elección de precio se debe a que se da la posibilidad de que el proyecto sea resistente ante la incertidumbre del mercado, lo que hace difícil predecir con certeza su precio futuro debido a las variantes que tiene. Considerando lo anterior, se presenta la Tabla 43 con el valor por metro cubico y el valor total anual.

Tabla 43: Tarifa consumo de agua por camiones aljibes

Ingreso	Precio por metro cubico	Valor total anual
Consumo de agua por camiones aljibes	\$20,77	\$3.485,25

Este valor total anual también se verá reflejado en el flujo de caja de otro escenario propuesto. Como en este caso, el valor del dinero también se ve modificado en el tiempo, se realizó una proyección utilizando un precio del año 2015 y otro del 2022 y realizando una línea de tendencia, se obtuvo un aumento del 3% anualmente, por lo que para cada año se le adicionara este porcentaje.

5.6.2. Planteamiento de escenarios

El planteamiento propuesto en este proyecto social se verá reflejado con el indicador de valor actual neto social (VANS) que busca estimar el valor actual de los flujos del proyecto, con el método de costo anual uniforme equivalente (CAUE), correspondiente al costo anual del proyecto, la tasa interna social de retorno (TIRS) que es aquella en donde la tasa social de descuento hace que el VANS sea igual a cero y el período de recuperación de capital o Payback que determina la rapidez con que se recupera la inversión realizada del proyecto. Todos estos indicadores serán analizados en base a los criterios y proyectos sociales.

Es importante destacar que dentro del proyecto el financiamiento de la inversión no se verá reflejado por un financiamiento (banco o privado), ni tampoco, un capital propio. Esto quiere decir que la inversión inicial será un requisito mínimo para poder ejecutar el proyecto. Los datos a utilizar para el flujo de caja corresponden a la tasa de descuento y vida útil de la Tabla 41 y la inversión total de la Tabla 36.

De esta manera, los escenarios a evaluar serán dos. El primero será un flujo de caja puro considerando como beneficio/ahorro el consumo de agua proveniente de la empresa Esval y otro con camiones aljibes, mientras que el segundo corresponde a un flujo de caja financiado considerando los mismos beneficios/ahorros que en el primer escenario. En ambos escenarios se considerará la misma mantención, los costos de operación y la depreciación, la cual se depreciará con el método de depreciación normal, considerando todos los activos fijos que tengan una vida útil.

5.6.3. Flujos de caja

En el Anexo C se presenta el cálculo referente a los flujos de caja para los escenarios propuestos y en la Tabla 44 y Tabla 45 se presentan los valores de los indicadores utilizados.

Tabla 44: Resultados de indicadores en los flujos de caja para caso de consumo de agua proveniente de Esval.

Flujo de Caja Puro	
Indicador económico	Valor
VANS	\$-41.208,14
CAUE	\$3.592,71
TIRS	-
PRC	-
Flujo de Caja Financiado	
VANS	\$-33.415,15
CAUE	\$2,913,30
TIRS	-
PRC	-

Tabla 45: Resultados de indicadores en los flujos de caja para caso de consumo de agua proveniente de camiones aljibes.

Flujo de Caja Puro	
Indicador económico	Valor
VANS	\$132,96
CAUE	\$11,59
TIRS	6%
PRC	Año 13
Flujo de Caja Financiado	
VANS	\$8.319,10
CAUE	\$725,30
TIRS	23%
PRC	6 años

5.6.4. Análisis de resultados

En primer lugar, de acuerdo con los valores obtenidos y considerando los indicadores evaluados, es posible establecer que los resultados en el flujo de caja puro y financiado en el caso de consumo de agua proveniente de camiones aljibes es mucho más favorable que el caso proveniente de Esval, ya que los valores de VANS y CAUE son más rentables económicamente y ambos flujos entregan una TIRS y un PRC asociado a este consumo. Sin embargo, al considerarse como un proyecto social los valores económicos no son representativos para determinar su evaluación. Dado esto, es necesario evaluar si los casos presentan sustentabilidad y benefician al medio ambiente tomando en contexto la escasez hídrica que se presenta en la región.

Los camiones aljibes por un lado se basan en un mecanismo burocrático, donde se busca obtener un poder económico y operacional que en términos ambientales no representan la emergencia que se debe dar a un recurso vital, de hecho, la utilización de estos camiones de por sí ya requieren por si solos mantenimientos especializados y cumplimiento en las normativas que se presenten. Además, existen limitaciones en cuanto al acceso que tienen estos camiones y en la contribución que tienen al utilizar combustible y emitir las emisiones asociadas que van en contra del impacto ambiental que se debe generar. Por otro lado, el abastecimiento de agua a partir de la empresa Esval que es a través de cañerías siempre será más barato que cualquier otra solución, y no solo en términos económicos, sino también en términos culturales, ambientales y de salud ya que la distribución de agua es eficiente, la calidad de agua es controlada, es de fácil uso para el usuario y presenta una sostenibilidad ambiental (aprovecha las fuentes de aguas renovables y minimiza la sobreexplotación de los recursos hídricos). Considerando estos factores, los camiones aljibes al tener un precio elevado por metro cubico beneficiaria el ahorro

por parte de los usuarios que utilizan este consumo de agua, no obstante, el impacto ambiental no es favorable y no contribuye con el objetivo del proyecto que es entregar sostenibilidad al agua, por lo que el abastecimiento entregado por cañerías de la empresa Esval es más conveniente a pesar de presentar valores de ahorro menores.

Dado esto, el caso del consumo de agua por la empresa Esval, presenta un VANS que corresponderá al valor mínimo que se debe desembolsar para que el proyecto se lleve a cabo, es decir, que se requiere de un total de 42 mil dólares aproximadamente para que la entidad social se haga cargo de este proyecto y pueda ser ejecutado durante el horizonte de evaluación que se estimó en el caso de que sea puro y 33 mil dólares si es financiado. En cuanto al CAUE, este valor corresponde a lo que debiese ser capaz de generar en un año, por ende, si se requiere vender el proyecto a través de una licencia/patente anual, se debe vender al menos al valor estipulado del indicador. De esta manera las entidades gubernamentales podrían ser capaces de pagar esta licencia de manera anual con el fin de beneficiar a la comunidad que necesita suplir la escasez hídrica que se vive.

Por otro lado, el flujo de caja arroja en el indicador VANS un valor negativo que en primera instancia da entender que el proyecto no es viable, sin embargo, dado que el trabajo tiene un enfoque social y no tiene beneficios monetarios directos, el objetivo buscará que se genere un impacto de manera social/ambiental durante los años tal que estos puedan ser más apropiados para aprobar un proyecto con un VANS negativo.

Por ejemplo, en el impacto social del proyecto podemos encontrar que la reutilización de aguas grises aportará de gran forma en la calidad de vida de los vecinos de Lo Vásquez, principalmente por que dicho beneficio les entrega la oportunidad de conocer y aprender sobre el proceso, dándoles acceso a agua tratada que, en efecto, los hará partícipes de un proyecto que los beneficiará, tanto a ellos como al ecosistema. Su participación y apoyo es inminente, y al estar involucrados activamente, muestra la relevancia que existe hoy en día para realizar este tipo de tratamiento de aguas en términos sociales. De hecho, al igual que esta población, el proyecto podría ser realizable para comunidades que presenten el mismo interés y se encuentren en algún sector que también este catalogado dentro de la escasez hídrica.

En cuanto al beneficio medio ambiental, este se puede representar en varios aspectos que a largo plazo benefician a toda la comunidad. Uno de estos corresponde a que la reutilización evita que el agua llegue a los humedales como ríos, embalses y lagos que son la fuente de diversidad biológica más importante, por lo que, al implementar el tratamiento de aguas grises, una parte importante del agua dejaría de participar en esta contaminación logrando de esta forma que este tipo de

humedales se preserven. Por otro lado, también se tiene la reducción del agua potable, ya que este recurso se utiliza para mayoritariamente todas las actividades que requieran la utilización de agua, tales como riego, limpieza, etc, y dado al contexto de sequía que se encuentra en el sector, usar agua potable carece de sentido para este tipo de actividades, entregando una excelente opción en cuanto al sistema presentado, que además de evitar este consumo, favorecerá en términos de sostenibilidad hacia al recurso del agua.

A modo resolutivo, podemos dar cuenta que a pesar de que existan factores que podrían indicar que el tratamiento de aguas grises no es rentable por su valor actual neto, el cual es negativo, los beneficios sociales y medio ambientales a largo plazo son más convenientes que el aspecto financiero. Frente a las problemáticas de escasez hídrica, el tratamiento propuesto es aún más relevante y necesaria para mitigar los efectos del cambio climático, entregando sostenibilidad a la comunidad al medio ambiente.

6. Conclusiones y recomendaciones

En el presente trabajo, se llevó a cabo un estudio técnico y económico para ver la factibilidad de un sistema de distribución de aguas grises en una localidad afectada por sequía de la V región. En base a los análisis realizados en el trabajo y a los resultados obtenidos, es posible señalar que:

Se determinó que la selección del tratamiento considerando las necesidades de la población de Lo Vázquez, corresponde a un tratamiento compuesto por una etapa de filtración, seguido de un biofiltro y desinfección. Esto debido a que, al emplear este tratamiento, el agua gris cumple con los estándares de agua para su reutilización, tomando como base la ley 21.075 del ministerio de Obras Públicas, permitiendo que los vecinos de la comuna de Casablanca puedan utilizar estas aguas para sus propios beneficios. Adicionalmente, este conjunto de tratamientos requiere de mantenciones de bajo costo y su operación no es compleja, lo que genera un costo monetario rentable para su realización y un fácil manejo operativo para la población al momento de ejecutar el proceso.

Se diseñó un sistema de tratamiento capaz de tolerar el consumo de agua de lavadora utilizado por cada casa, en donde dependiendo de las condiciones que se presentaban, fueron seleccionados los equipos a utilizar. Se decidió un diseño para casas que lavan con frecuencia de 1 a 3 días y otro diseño para casas de 4 a 5 días, esto debido a que es necesario que los equipos tengan constancia y no presenten estancamiento al momento de necesitar una mantención. En cuanto a los dimensionamientos, todos los equipos cumplen con sus criterios, y en ningún caso existe la posibilidad de que haya un desbordamiento, ya que en todas las casas los recipientes a utilizar presentan más volumen que el consumo de agua que hay por casa. En cuanto a los balances realizados, a través de la información obtenida, estos cumplen con los estándares de calidad de agua dado que los porcentajes de remoción de los equipos son lo suficientemente eficientes para estar por sobre la ley 21.075 de Chile.

Se evaluó económicamente el proyecto en base a los criterios sociales y se obtuvo mediante los indicadores económicos VANS y CAUE los valores de \$-41.845 y \$3.648 dólares para el caso de abastecimiento de agua por la empresa Esval, y \$-1.798 y \$157 dólares para el caso de los camiones aljibes respectivamente. Se determinó que el caso de la empresa Esval es más conveniente a pesar de su menor beneficio de ahorro dado los beneficios que presenta este abastecimiento ya que en términos generales contribuyen con la sostenibilidad del agua y un impacto ambiental positivo. Ahora, si bien el primer indicador presenta un valor negativo que cuestiona el proyecto por no generar ingresos monetarios, este sigue siendo rentable en términos ambientales y sociales debido a los beneficios a largo plazo que se presentan, generando un impacto medioambiental positivo considerando la situación de escasez hídrica que se vive en la comuna y región. Del mismo modo el segundo indicador presenta un costo anual elevado que una empresa privada no costearía sin un beneficio

mutuo, por lo que, al presentar el proyecto a entidades gubernamentales, la opción se vuelve considerablemente más viable debido a que el costo monetario no debiese ser un problema a pagar considerando las problemáticas ambientales que vive la región.

Finalmente, es posible determinar mediante el estudio técnico y económico realizado, que el sistema de tratamiento de aguas grises para la población de Lo Vásquez, ubicada en Casablanca, es completamente viable ya que cumple con los requerimientos técnicos para su funcionamiento, y económicamente es capaz de entregar beneficios tanto sociales como ambientales que a largo plazo contribuyen de manera positiva con el medio ambiente, entregando una sustentabilidad hacia al recurso del agua.

A modo de recomendación y tomando en consideración los resultados obtenidos en el trabajo sobre el tratamiento de aguas grises, se espera:

- Desarrollar un análisis de impacto que permita influir en la viabilidad a largo plazo y en la aceptación del proyecto, ya que, este análisis evalúa riesgos no técnicos, mitigación de impactos negativos, oportunidades de mejora hacia el proyecto, planificaciones a largo plazo lo que podría en su eventualidad mejorarlo y asegurar un proyecto sostenible que cumpla con mayores requisitos a los que ya posee.
- Llevar a cabo la realización del proyecto a una escala piloto para validar y cuantificar los datos obtenidos

7. Referencias

- AIDIS. (2017). Aguas grises: Un recurso latente. *Revista AIDIS*.
- Aiguapres. (2021). *Catálogo General* (SAER Electropompe, AIG pumps, & SHURFLO, Eds.).
- Alonso, E., & Riesco, P. (2001). *El uso de membranas de microfiltración y ultrafiltración en tratamientos terciarios para reutilización agrícola de aguas residuales*.
- Al-Zou'by, J. Y., Al-Zboon, K. K., & Al-Tabbal, J. A. (2017). Low-cost treatment of grey water and reuse for irrigation of home garden plants. *Environmental Engineering and Management Journal*, 16(2), 351–359. <https://doi.org/10.30638/eemj.2017.035>
- Ángel, M., Castillo, R., Cristian, I., & Arango, Z. (2019). *Sistema de tratamiento y reutilización de aguas grises aplicables a sectores urbanos con déficit hídrico*.
- Ardilla, M. (2013). *Viabilidad Técnica y Económica del aprovechamiento de aguas grises domésticas*. Universidad Nacional de Colombia.
- Asesoría Técnica Parlamentaria. (2018). *BIBLIOTECA DEL CONGRESO NACIONAL DE CHILE ASESORÍA TÉCNICA PARLAMENTARIA 5 DE JULIO DE 2018*.
- Baeza, E., & Torres, R. (2020). *Situación de la demanda de recursos hídricos en Chile por parte de los principales usuarios*. <http://bcn.cl/2axvn>
- Bestflow. (2020). *Bomba de superficies*. Catalogo Bestflow. <https://flowcenter.cl/producto/bomba-aumentadora-de-presion-rs12-9g-220-v/>
- Bianchi, C. (2022). *RESOLUCIÓN N° 274*.
- Blanco, E. (2022). *Mesa Nacional del Agua Informe Final*.
- Boric, G., López, J., Aguilera, X., & Valenzuela, E. (2023). *Mensaje N° 010-371*.
- Bravo, J. (2016). *Desarrollo de una propuesta para el uso eficiente de agua en una zona agrícola de la VI región de Chile*.
- Brikké, F., Vera, R., Medina, N., Castillo, O., Schippner, B., & Mendoza, L. (2006). *Biofiltro: Una opción sostenible para el tratamiento de aguas residuales en pequeñas localidades*.
- Buenfil, J. (2015). *Biofiltro: La jardinera que filtra las aguas grises para reciclarlas*. www.sarar-t.org
- Burgos, J. (2014). *Resolución 4866 Exenta*.

- Çengel, Y., & Cimbala, J. (2012). *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones* (P. E. Roig, Ed.; Segunda edición). McGraw Hill.
- Chilquinta Distribución. (2023). *Tarifas de suministro de Chilquinta distribución S.A - Consumos pequeños*.
- Comisión nacional de Riego. (2023). *Bases del FOUA 2023*. www.cnr.gob.cl.
- CORFO. (2023). *Convocatoria bienes públicos para la gestión hídrica*.
- Cruz, A. (2013). *Evaluación de un biofiltro ubicado en el municipio de la libertad Chontales*. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Díaz, J., & Ramírez, L. (2016). *Diseño de un sistema de tratamiento y reutilización del agua de la lavadora aplicado a los hogares de Bogotá D.C*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Díaz, M. A., Decinti, A., Blanco, D., & Vasquez, K. (2021). Methodology for the reuse of grey water in dwelling located in areas of water stress and extreme hydric stress - Characterization, quality and treatment options for reuse in Chile. *Informes de La Construccion*, 73(563), 1–12. <https://doi.org/10.3989/ic.80823>
- Díaz, M., Decinti, A., Blanco, D., & Vasquez, K. (2021). Methodology for the reuse of grey water in dwelling located in areas of water stress and extreme hydric stress - Characterization, quality and treatment options for reuse in Chile. *Informes de La Construccion*, 73(563), 1–12. <https://doi.org/10.3989/ic.80823>
- ElSayed, M. (2018). *Wastewater reuse standards for agriculture irrigation in, Egypt*. <https://www.researchgate.net/publication/333676905>
- Eriksson, E., Auffarth, K., Henze, M., & Ledin, A. (2002). Characteristics of grey wastewater. *Urban Water*, 4(1), 85–104. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(01\)00064-4](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(01)00064-4)
- Escobar, F. (2005). *Descripción Hidráulica de la batería de filtros de planta N°1 de la atarjea*.
- Esval S.A. (2022, February 2). Esval. *El Mostrador.Cl*.
- Fragkou, M. C., Monsalve-Tapia, T., Pereira-Roa, V., & Bolados-Arratia, M. (2022). Abastecimiento de agua potable por camiones aljibe durante la megasequía. Un análisis hidrosocial de la provincia de Petorca, Chile. *Eure*, 48(145). <https://doi.org/10.7764/eure.48.145.04>
- Franco, M. (2007). *Tratamiento y reutilización de aguas grises con aplicación a caso en Chile*. Universidad de Chile.

- Garzón, M., Buelna, G., & Moeller, G. (2012). La biofiltración sobre materiales orgánicos, nueva tecnología sustentable para tratar agua residual en pequeñas comunidades e industrias. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 111, 153–161.
- Gutiérrez, R. (2022). *REPORTE ANUAL DE LA EVOLUCIÓN DEL CLIMA EN CHILE*.
- Herrera, W., & Rey, A. (2018). *Implementación de biofiltro como agente depurador de aguas residuales del conjunto Aranjuez II, en el municipio de Villavicencio*. Universidad Cooperativa de Colombia.
- Hídrica consultores, & Aquaterra. (2017). *Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile*.
- Hofste, R., Reig, P., & Schleifer, L. (2019, August 6). *Water Stress Creates Ripple Effects Throughout Societies and Economies*.
- Huanacuni, E. (2021). *Mejoramiento de calidad de aguas grises provenientes de lavado de ropa con detergentes aplicando materiales filtrantes con y sin energía fotovoltaica en el distrito de Pocollay*. Universidad Privada de Tacna.
- IACC. (2019). *Evaluación de Proyectos Sociales*.
- Jung, J., Fowdar, H., Henry, R., Deletic, A., & McCarthy, D. T. (2019). Biofilters as effective pathogen barriers for greywater reuse. *Ecological Engineering*, 138, 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.07.020>
- Katukiza, A. Y., Ronteltap, M., Niwagaba, C. B., Kansime, F., & Lens, P. N. L. (2015). Grey water characterisation and pollutant loads in an urban slum. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(2), 423–436. <https://doi.org/10.1007/s13762-013-0451-5>
- Kim, J., Park, Y., Yun, C., & Park, C. H. (2015). Comparison of environmental and economic impacts caused by the washing machine operation of various regions. *Energy Efficiency*, 8(5), 905–918. <https://doi.org/10.1007/s12053-015-9333-7>
- Larrea, J., Rojas, M., Romeu, B., Rojas, N., & Heydrich, M. (2012). Bacterias indicadoras de contaminación en la evaluación de la calidad de las aguas: revisión de la literatura. *Revista CENIC Ciencias Biológicas*, 44.
- Leiva, E., Sánchez, R., Serrano, J., Schneider, N., Alvial, C., & Rodríguez, C. (2020). *Reutilización de aguas grises en Chile: propuesta de implementación en comunidades rurales como alternativa de mitigación para la escasez hídrica*.
- Li, F., Wichmann, K., & Otterpohl, R. (2009a). Evaluation of appropriate technologies for grey water treatments and reuses. *Water Science and Technology*, 59(2), 249–260. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.854>

- Li, F., Wichmann, K., & Otterpohl, R. (2009b). Review of the technological approaches for grey water treatment and reuses. *Science of the Total Environment*, 407(11), 3439–3449. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.02.004>
- Macpherson, E., & O'Donnell, E. (2015). Desafíos para la gestión ambiental del agua en Chile: perspectiva australiana. *Revista de Derecho Administrativo Económico*.
- Magaña, P. (2016). *Proyecto de ley para la reutilización de aguas grises*.
- Maimon, A., & Gross, A. (2018). Greywater: Limitations and perspective. *Current Opinion in Environmental Science and Health*, 2, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.11.005>
- Ministerio de Desarrollo Social. (2017). *Evaluación social de proyectos*.
- Ministerio de Desarrollo Social y Familia. (2023). *Informe Precios Sociales 2023*.
- Ministerio de Salud. (2018). *Proyecto de reglamento sobre condiciones sanitarias básicas para la reutilización de aguas grises*.
- Ministerio del Interior y Seguridad Pública. (2015). *Política Nacional para los Recursos Hídricos 2015*.
- MOP. (2011). *Diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos*.
- Morel, A., & Diener, S. (2006). *Greywater management in low and middle-income countries: review of different treatment systems for households or neighbourhoods*. Sandec at Eawag.
- Morillo, L., Naranjo, D., Pérez, J., Villacis, W., Vargas, P., & Muñoz, F. (2019). Reduction of surfactants and coliforms in domestic wastewater. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35(4), 931–943. <https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.04.12>
- Otero, N. (2007). *Filtración de aguas residuales para reutilización*. Universidad de la Laguna.
- Pakula, C., & Stamminger, R. (2010). Electricity and water consumption for laundry washing by washing machine worldwide. *Energy Efficiency*, 3(4), 365–382. <https://doi.org/10.1007/s12053-009-9072-8>
- Palmer, S., & Corpus, W. (2018). Diseño e implementación de un filtro para tratamiento de aguas grises en la aplicación de un sistema de riego para una huerta casera en San Andrés Islas, Colombia. *Revista Loginn*, 2.
- Pérez, F. (2011). *Abastecimiento de aguas: Tema 8 Filtración*.

- Rakesh, S., Ramesh, Dr. P., Murugaragavan, Dr. R., Avudainayagam, Dr. S., & Karthikeyan, Dr. S. (2020). Characterization and treatment of grey water: A review. *International Journal of Chemical Studies*, 8(1), 34–40.
<https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i1a.8316>
- Rodríguez, T. (2014). *Biofiltros, una opción para mejorar las características de las aguas residuales provenientes de tratamientos convencionales*.
- Rojas, R. (2000). *Construcción, operación y mantenimiento del filtro de arena*.
- Ruiz, A. (2004). La biofiltración, una alternativa para la potabilización del agua. *Revista Lasallista de Investigación*, 1(2), 61–66.
- Santibáñez, F. (2016). *Segunda Sección * Reflexiones y Desafíos al 2030: Perspectiva de Especialistas Externos AGRICULTURA CHILENA Reflexiones y Desafíos al 2030 **.
- Sapag, N., Sapag, R., & Sapag, J. (2014). *PREPARACIÓN Y EVALUACIÓN DE PROYECTOS* (P. E. Roig Vázquez, Ed.; Sexta Edición). McGraw Hil.
- SII. (2003). *Tabla de vida útil de los bienes físicos del activo inmovilizado*.
- Sistema de las Naciones Unidas. (2021). *Escasez Hídrica en Chile: Desafíos pendientes*.
- Soza, A. (2023). *Aguas grises como recurso Hídrico no convencional: Evaluación de alternativas de tratamiento de aguas segregadas y compuestas*. Universidad Técnica Federico Santa María.
- Stamminger, R., & Schmitz, A. (2016). *Washing Machines in Europe – Detailed Assessment of Consumption and Performance*.
- Stevens, E. (2021). *Implementación del reglamento sobre condiciones sanitarias para la reutilización de aguas grises*. Universidad de Chile.
- Tchobanoglous, G., Burton, F., & Stensel, H. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse* (Fourth Edition). McGrawHill.
- Tejedor, J., Córdor, V., Almeida-Naranjo, C. E., Guerrero, V. H., & Villamar, C. A. (2020). Performance of wood chips/peanut shells biofilters used to remove organic matter from domestic wastewater. *Science of the Total Environment*, 738.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139589>
- Torres, F. (2017). *Evaluación de parámetros en la filtración rápida como tratamiento de agua gris doméstica*. Universidad de Los Andes.
- UNESCO. (2023). *Alianzas y cooperación por el agua Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2023 Datos, cifras y ejemplos de acción*.

Vigueras, J., Villanueva, I., Garzón, M., De Jesús, J., Chaires, I., & Hernández, C. (2013). Performance of a biofilter system with agave fiber filter media for municipal wastewater treatment. *Water Science and Technology*, 68(3), 599–607. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.285>

World Health Organization. (2006). *Overview of greywater management Health considerations*.

8. Anexos

Anexo A: Gráfico de Moody para el cálculo del coeficiente de fricción (f_d)

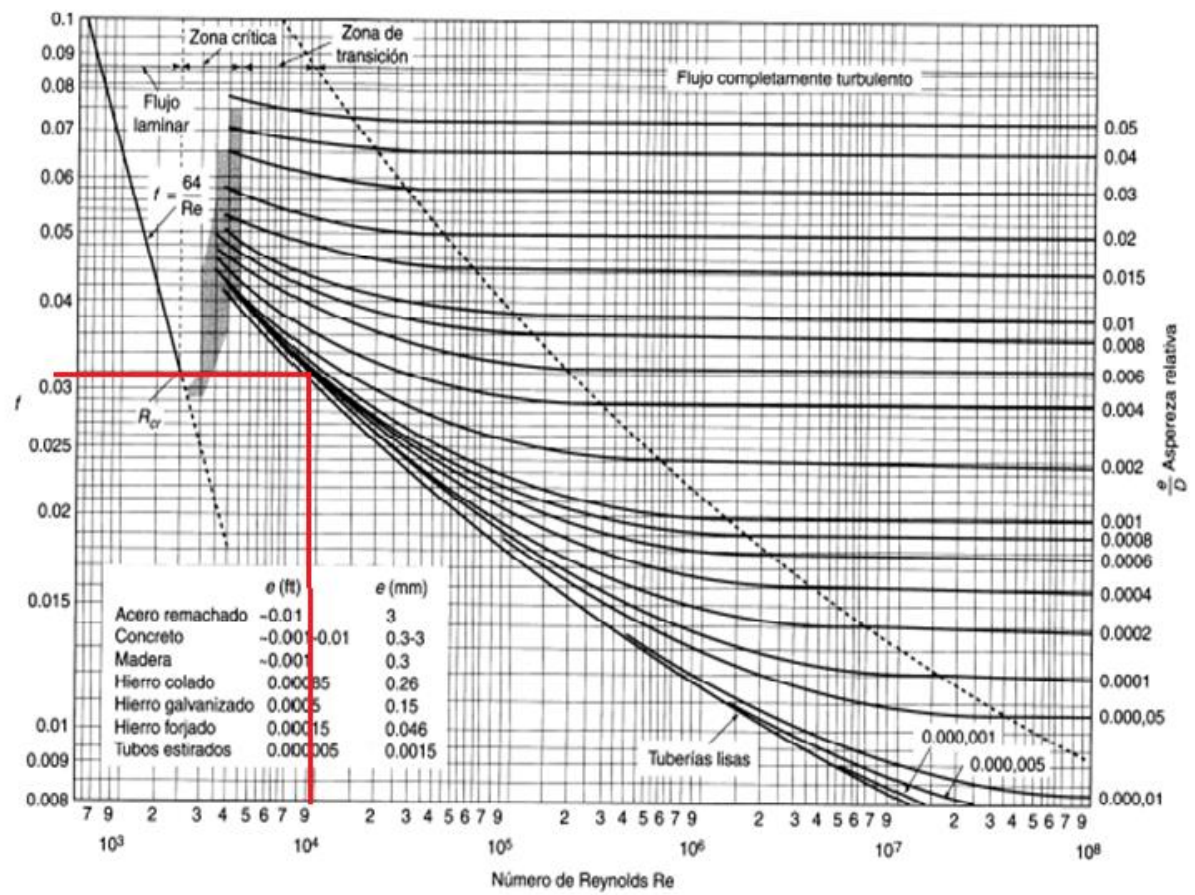


Figura 13: Gráfico de Moody, con sus respectivas intercepciones para obtener el coeficiente de fricción.

Anexo B: Tabla de valores para cada velocidad, factor de fricción y altura.

Tabla 46: Resultados de Altura variando la velocidad y factor de fricción.

V, m/s	Reynolds	1/Raiz (f)	f	hl Total, m	H más agua, m	H menos agua, m
0,80	11.200	5,77	0,0301	0,33	11,259	11,603
0,79	11.060	5,76	0,0302	0,32	11,252	11,596
0,78	10.920	5,75	0,0303	0,31	11,244	11,588
0,77	10.780	5,74	0,0304	0,31	11,237	11,581
0,76	10.640	5,73	0,0305	0,30	11,229	11,573
0,75	10.500	5,72	0,0306	0,29	11,222	11,566
0,74	10.360	5,71	0,0307	0,28	11,215	11,559
0,73	10.220	5,70	0,0308	0,28	11,208	11,552
0,72	10.080	5,69	0,0309	0,27	11,201	11,545
0,71	9.940	5,68	0,0310	0,26	11,194	11,538
0,70	9.800	5,66	0,0312	0,26	11,187	11,531
0,69	9.660	5,65	0,0313	0,25	11,180	11,524
0,68	9.520	5,64	0,0314	0,24	11,174	11,518
0,67	9.380	5,63	0,0315	0,24	11,167	11,511
0,66	9.240	5,62	0,0317	0,23	11,161	11,504
0,65	9.100	5,61	0,0318	0,22	11,154	11,498
0,64	8.960	5,59	0,0319	0,22	11,148	11,492
0,63	8.820	5,58	0,0321	0,21	11,142	11,485
0,62	8.680	5,57	0,0322	0,20	11,135	11,479
0,61	8.540	5,56	0,0324	0,20	11,129	11,473
0,60	8.400	5,55	0,0325	0,19	11,123	11,467

Anexo C: Flujos de caja del proyecto puro y financiado

Tabla 47: Flujo de caja puro del proyecto escenario de consumo de agua proveniente de la empresa Esval del periodo 0 al 9.

Costos	Período 0	Período 1	Período 2	Período 3	Período 4	Período 5	Período 6	Período 7	Período 8	Período 9
Inversión	\$21.496									
Beneficios		\$558	\$584	\$606	\$628	\$650	\$672	\$694	\$716	\$738
Mantenición		\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898
Operación		\$549	\$549	\$549	\$549	\$549	\$549	\$549	\$549	\$549
Depreciación antes y después		\$37	\$37	\$37	\$37	\$37	\$22	\$22	\$22	\$22
Flujo de costos	\$-21.496	\$-1.890	\$-1.864	\$-1.842	\$-1.820	\$-1.798	\$-1.776	\$-1.754	\$-1.732	\$-1.710
Fujo de costos acumulado	\$-21.496	\$-23.385	\$-25.249	\$-27.091	\$-28.910	\$-30.708	\$-32.484	\$-34.237	\$-35.969	\$-37.679

Tabla 48: Flujo de caja puro del proyecto escenario de consumo de agua proveniente de la empresa Esval del periodo 10 al 20.

Periodo 10	Período 11	Período 12	Período 13	Período 14	Período 15	Período 16	Período 17	Período 18	Período 19	Período 20
\$760	\$782	\$804	\$826	\$848	\$870	\$892	\$914	\$936	\$958	\$980
\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898
\$549	\$549	\$549	\$549	\$549	\$549	\$549	\$549	\$549	\$549	\$549
\$22	\$14	\$14	\$14	\$14	\$14	\$14	\$14	\$14	\$14	\$14
\$-1.688	\$-1.666	\$-1.644	\$-1.622	\$-1.600	\$-1.578	\$-1.555	\$-1.533	\$-1.511	\$-1.489	\$-1.467
\$-39.937	\$-41.032	\$-42.675	\$-44.297	\$-45.896	\$-47.474	\$-49.029	\$-50.563	\$-52.074	\$-53.564	\$-55.031

Tabla 49: Flujo de caja puro del proyecto escenario de consumo de agua proveniente de camiones aljibes del periodo 0 al 9.

Costos	Período 0	Período 1	Período 2	Período 3	Período 4	Período 5	Período 6	Período 7	Período 8	Período 9
Inversión	\$21.496									
Beneficios		\$3.834	\$3.949	\$4.008	\$4.068	\$4.129	\$4.191	\$4.254	\$4.318	\$4.383
Mantenición		\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898
Operación		\$549	\$549	\$549	\$549	\$549	\$549	\$549	\$549	\$549
Depreciación		\$37	\$37	\$37	\$37	\$37	\$22	\$22	\$22	\$22
Flujo de costos	\$-21.496	\$1.386	\$1.501	\$1.561	\$1.621	\$1.682	\$1.744	\$1.807	\$1.870	\$1.935
Fujo de costos acumulado	\$-21.496	\$-20.109	\$-18.608	\$-17.047	\$-15.745	\$-13.745	\$-12.001	\$-10.195	\$-8.324	\$-6.389

Tabla 50: Flujo de caja puro del proyecto escenario de consumo de agua proveniente de camiones aljibes del periodo 10 al 20.

Periodo 10	Período 11	Período 12	Período 13	Período 14	Período 15	Período 16	Período 17	Período 18	Período 19	Período 20
\$4.448	\$4.515	\$4.583	\$4.651	\$4.721	\$4.792	\$4.864	\$4.937	\$5.011	\$5.086	\$5.162
\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898
\$549	\$549	\$549	\$549	\$549	\$549	\$549	\$549	\$549	\$549	\$549
\$22	\$14	\$14	\$14	\$14	\$14	\$14	\$14	\$14	\$14	\$14
\$2.001	\$2-068	\$2.135	\$2.204	\$2.274	\$2.345	\$2.417	\$2.489	\$2.564	\$2.639	\$2.715
\$-4.388	\$-2.321	\$-185	\$2.019	\$4.292	\$6.637	\$9.054	\$11.543	\$14.107	\$16.745	\$19.460

Tabla 51: Flujo de caja financiado del proyecto escenario de consumo de agua proveniente de la empresa Esval del periodo 0 al 9.

Costos	Período 0	Período 1	Período 2	Período 3	Período 4	Período 5	Período 6	Período 7	Período 8	Período 9
Inversión	\$21.496									
Beneficios		\$558	\$584	\$606	\$628	\$650	\$672	\$694	\$716	\$738
Mantenición		\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898
Operación		\$549	\$549	\$549	\$549	\$549	\$549	\$549	\$549	\$549
Depreciación		\$37	\$37	\$37	\$37	\$37	\$22	\$22	\$22	\$22
Amortización	\$18.271	\$914	\$914	\$914	\$914	\$914	\$914	\$914	\$914	\$914
Flujo de costos	\$-3.224	\$-2.804	\$-2.779	\$-2.757	\$-2.735	\$-2.713	\$-2.691	\$-2.669	\$-2.647	\$-2.625
Fujo acumulado	\$-3.224	\$-6.029	\$-8.807	\$-11.564	\$-14.299	\$-17.911	\$-19.702	\$-22.371	\$-25.018	\$-27.643

Tabla 52: Flujo de caja financiado del proyecto escenario de consumo de agua proveniente de la empresa Esval del periodo 10 al 20.

Periodo 10	Período 11	Período 12	Período 13	Período 14	Período 15	Período 16	Período 17	Período 18	Período 19	Período 20
\$760	\$782	\$804	\$826	\$848	\$870	\$892	\$914	\$936	\$958	\$980
\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898
\$549	\$549	\$549	\$549	\$549	\$549	\$549	\$549	\$549	\$549	\$549
\$22	\$14	\$14	\$14	\$14	\$14	\$14	\$14	\$14	\$14	\$14
\$914	\$914	\$914	\$914	\$914	\$914	\$914	\$914	\$914	\$914	\$914
\$-2.603	\$-2.581	\$-2.559	\$-2.537	\$2.515	\$-2.493	\$-2.471	\$-2.449	\$-2.427	\$-2.405	\$-2.383
\$-30.245	\$-32.826	\$-35.385	\$-37.922	\$-40.437	\$-42.931	\$-45.402	\$-47.851	\$-50.278	\$-52.683	\$-55.067

Tabla 53: Flujo de caja financiado del proyecto escenario de consumo de agua proveniente de camiones aljibes del periodo 0 al 9.

Costos	Período 0	Período 1	Período 2	Período 3	Período 4	Período 5	Período 6	Período 7	Período 8	Período 9
Inversión	\$21.496									
Beneficios		\$3.834	\$3.949	\$4.008	\$4.068	\$4.129	\$4.191	\$4.254	\$4.318	\$4.383
Mantención		\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898
Operación		\$549	\$549	\$549	\$549	\$549	\$549	\$549	\$549	\$549
Depreciación		\$37	\$37	\$37	\$37	\$37	\$22	\$22	\$22	\$22
Amortización	\$18.271	\$914	\$914	\$914	\$914	\$914	\$914	\$914	\$914	\$914
Flujo de costos	\$-3.224	\$454	\$568	\$627	\$687	\$748	\$810	\$872	\$936	\$1.000
Fujo acumulado	\$-3.224	\$-2.770	\$-2.202	\$-1.574	\$-887	\$-139	\$670	\$1.543	\$2.478	\$3.478

Tabla 54: Flujo de caja financiado del proyecto escenario de consumo de agua proveniente de camiones aljibes del periodo 10 al 20.

Periodo 10	Período 11	Período 12	Período 13	Período 14	Período 15	Período 16	Período 17	Período 18	Período 19	Período 20
\$4.448	\$4.515	\$4.583	\$4.651	\$4.721	\$4.792	\$4.864	\$4.937	\$5.011	\$5.086	\$5.162
\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898	\$1.898
\$549	\$549	\$549	\$549	\$549	\$549	\$549	\$549	\$549	\$549	\$549
\$22	\$14	\$14	\$14	\$14	\$14	\$14	\$14	\$14	\$14	\$14
\$914	\$914	\$914	\$914	\$914	\$914	\$914	\$914	\$914	\$914	\$914
\$1.066	\$1.132	\$1.199	\$1.268	\$1.337	\$1.408	\$1.479	\$1.552	\$1.625	\$1.700	\$1.776
\$4.544	\$5.676	\$6.875	\$8.143	\$9.480	\$10.887	\$12.367	\$13.918	\$15.544	\$17.244	\$19.020