



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**REUTILIZACIÓN DE AGUAS GRISES EN PROYECTOS DE MEJORAMIENTO
URBANO: APLICACIÓN DE UN PROTOTIPO MODULAR DE UN SISTEMA DE
HUMEDAL CONSTRUIDO EN UNA VIVIENDA UNIFAMILIAR**

EDUARDO JOSÉ GIDI GARCÍA

**Santiago, Chile
2022**



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**REUTILIZACIÓN DE AGUAS GRISES EN PROYECTOS DE MEJORAMIENTO
URBANO: APLICACIÓN DE UN PROTOTIPO MODULAR DE UN SISTEMA DE
HUMEDAL CONSTRUIDO EN UNA VIVIENDA UNIFAMILIAR**

**REUSE OF GREY WATERS IN URBAN IMPROVEMENT PROJECTS:
APPLICATION OF A MODULAR PROTOTYPE OF A CONSTRUCTED
WETLAND SYSTEM IN A SINGLE FAMILY HOUSE**

EDUARDO JOSÉ GIDI GARCÍA

**Santiago, Chile
2022**



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

REUTILIZACIÓN DE AGUAS GRISES EN PROYECTOS DE MEJORAMIENTO URBANO: APLICACIÓN DE UN PROTOTIPO MODULAR DE UN SISTEMA DE HUMEDAL CONSTRUIDO EN UNA VIVIENDA UNIFAMILIAR

Memoria para optar al título
Profesional de Ingeniero en Recursos Naturales Renovables

EDUARDO JOSÉ GIDI GARCÍA

PROFESORA GUÍA

Sra. Paola Velásquez B.
Arquitecta, PhD.

Calificaciones

7,0

PROFESORES EVALUADORES

Sra. María Teresa Varnero M.
Química Farmacéutica.

Sra. M. Verónica Díaz M.
Ingeniera Agrónoma, Mg. Sc.


María Verónica
Díaz Martínez
8.401.965-8
11/01/2023 - 10:24
UNIVERSIDAD
DE CHILE
ESTE DOCUMENTO CONTIENE FIRMA ELECTRÓNICA AVANZADA
<https://ceropapel.uchile.cl/validacion/verificador>
CV: 63beb89c0fb135e995428a41

6,8

7,0

Santiago, Chile
2022

AGRADECIMIENTOS

Comienzo agradeciéndole a mi profesora guía, Paola Velásquez, que me introdujo en un inicio al proyecto con tan solo una reunión virtual en tiempos de pandemia, confiando en mí durante todo el transcurso del trabajo y teniendo siempre la mejor disposición. Les agradezco también a Gustavo Salazar y Rebeca Zamorano por haber ayudado en la confección del modelo inicial durante nuestra práctica profesional el año 2021, modelo el cual asentó la visionaria base para el actual y futuros trabajos.

Doy gracias a todo el equipo del taller La Maceta por la ayuda que brindaron para la elaboración real de un gran porcentaje del prototipo. Le agradezco de igual manera a Francisco Antilao por las innumerables horas en que estuvimos instalando este prototipo, donde nos arreglamos para salir con una mejor idea cada vez que fallábamos en algo. Le agradezco a todas las personas que componen el Laboratorio de Calidad de Aguas Gabriela Castillo, dándole por sobre todo las gracias a Viviana Lorca y Katherine Lizama por ayudarme y abrirme las puertas del laboratorio. Quiero mencionar también a la familia que aceptó este proyecto y desafío desde un inicio, les doy las gracias por siempre haber tenido la mejor actitud y una sobresaliente paciencia para que las cosas resultaran.

De manera casi final, pero más importante, agradezco a mi familia por haber estado presente durante todo mi desarrollo como persona hasta el momento, desde alguna que otra cana que les saque hasta ahora que me encuentro terminando una carrera de ingeniería. El último agradecimiento es para mis amigos/as, que sin dudas hacen de la vida algo más especial.

ÍNDICE

RESUMEN	1
“SUMMARY”	2
INTRODUCCIÓN	3
Objetivo general.....	6
Objetivos específicos	6
METODOLOGÍA	7
Área de Estudio.....	7
Materiales	8
Objetivo específico 1. Realización de ajustes y rectificaciones al diseño y construcción del modelo inicial.....	8
Objetivo específico 2. Implementar el prototipo en el antejardín de una casa, junto a un acompañamiento y capacitación a la familia en el correcto uso del sistema.....	9
Objetivo específico 3. Analizar el desempeño del sistema de tratamiento bajo dos TRH, con relación a temperaturas ambientales	10
Métodos.....	11
Objetivo específico 1. Realización de ajustes y rectificaciones al diseño y construcción del modelo inicial.....	11
Objetivo específico 2. Implementar el prototipo en el antejardín de una casa, junto a un acompañamiento y capacitación a la familia en el correcto uso del sistema.....	15
Objetivo específico 3. Analizar el desempeño del sistema de tratamiento bajo dos TRH, con relación a temperaturas ambientales	19
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	26
Objetivo específico 1. Realización de ajustes y rectificaciones al diseño y construcción del modelo inicial	26
Objetivo específico 2. Implementar el prototipo en el antejardín de una casa, junto a un acompañamiento y capacitación a la familia en el correcto uso del sistema	32
Selección de una vivienda dentro del lugar de estudio	32
Implementación del prototipo en la vivienda seleccionada.....	33
Acompañamiento y capacitación a la familia en el correcto uso del sistema de tratamiento	37
Objetivo específico 3. Analizar el desempeño del sistema de tratamiento bajo dos TRH, con relación a temperaturas ambientales.....	39
Funcionamiento y operación del sistema de tratamiento	39

Caracterización fisicoquímica y microbiológica del afluente del sistema	44
Calidad del efluente del sistema de tratamiento	47
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	62
Conclusiones.....	62
Recomendaciones	64
BIBLIOGRAFÍA	65
ANEXOS Y APÉNDICES	72

ABREVIACIONES

HC	Humedal Construido	
HCFVS	Humedal Construido de Flujo Vertical Parcialmente Saturado	
SbN	Solución basada en la Naturaleza	
PQMB	Programa Quiero mi Barrio	
PVC	Policloruro de Vinilo	
PPR	Polipropileno	
TRH	Tiempo de Retención Hidráulico	(h)
DQO	Demanda Química de Oxígeno	(mg/L)
SST	Sólidos Suspendidos Totales	(mg/L)
CE	Conductividad Eléctrica	(mS/cm)
pH	Grado de acidez o alcalinidad de una solución	(unidad)
NT	Nitrógeno Total	(mg/L)
NTK	Nitrógeno Total Kjeldahl	(mg/L)
PT	Fósforo Total	(mg/L)
CF	Coliformes Fecales	(NMP/100 mL)
NMP	Número Más Probable	

RESUMEN

Un Humedal Construido (HC) representa una Solución basada en la Naturaleza (SbN) para el tratamiento de aguas grises, siendo este una alternativa amigable con el medio ambiente, y posiblemente de bajo costo para la reutilización de dichas aguas en irrigación de jardines y otros fines no potables. La presente memoria tiene como objetivo principal, aplicar de manera experimental un prototipo modular de un sistema de humedal construido con flujo vertical y escurrimiento subsuperficial, para la recuperación de aguas grises provenientes de lavadoras. Se utiliza un modelo de diseño y construcción propuesto de manera previa a la realización del presente trabajo, siendo efectuado un mejoramiento de este en base a características técnicas de humedales construidos y consejo de expertos, con el objeto de implementar el modelo en una vivienda seleccionada. Para medir el desempeño del sistema, se ejecutan evaluaciones cualitativas de su funcionamiento, por un periodo de seis meses, en conjunto a dos campañas de medición (invierno y primavera) de la calidad del agua con dos TRH (10 h y 24 h).

Se logra el desarrollo de un modelo de bajo costo de inversión y mantención, de fácil operación, modular y ergonómico. El prototipo se instala de manera efectiva con la utilización de plantas macrófitas de la especie *Juncus patens*, en un hogar unifamiliar localizado en un sector urbano del Programa Quiero mi Barrio. Se consigue capacitar a la familia en la operación y mantención del sistema de tratamiento, el cual presenta un continuo accionar durante todo el proyecto. En relación a la calidad de agua tratada por el sistema, se observa en todos los casos: cargas de pH cercanas a 7, y concentraciones menores a 2,2 mS/cm de CE e inferiores a 8 mg/L de NT. En el 80% de los casos, y con los dos TRH, el efluente presenta valores iguales o menores a 10 mg/L de SST. La DQO disminuye con el aumento del TRH y temperaturas ambientales, llegando solo en un caso en la campaña primaveral a un valor menor a 100 mg/L. Los parámetros de CF y turbiedad precisan de un mayor análisis para la determinación de concentraciones en el efluente.

Palabras clave: Prototipo, humedal construido, modular, aguas grises, *Juncus patens*.

“SUMMARY”

A Constructed Wetland (CW) represents a Nature-based Solution (NbS) for greywater treatment, being an environmentally friendly and possibly low-cost alternative for reusing these waters for garden irrigation and other non-potable purposes. The main objective of this work is to experimentally apply a modular prototype of a constructed wetland system with vertical subsurface flow, for the recovery of grey waters from washing machines. A design and construction model proposed prior to the realization of this work is used, being carried out an improvement of this based on technical characteristics of constructed wetlands and expert advice, in order to implement the model in a selected house. To measure the performance of the system, qualitative evaluations of its operation are carried out for a period of six months, together with two measurement campaigns (winter and spring) of water quality with two HRT (10 h and 24 h).

The development of a low investment and maintenance cost, easy to operate, modular and ergonomic model is achieved. The prototype is effectively installed with the use of macrophyte plants (*Juncus patens*), in a single-family home located in an urban sector of the Programa Quiero mi Barrio. It is possible to instruct and educate the family in the operation and maintenance of the treatment system, which presents a continuous action throughout the project. In relation to the quality of water treated by the system, it is observed in all cases: pH loads close to 7, and concentrations less than 2.2 mS/cm of EC and less than 8 mg/L of TN. In 80% of the cases, and with the two HRTs, the effluent presents values equal to or less than 10 mg/L of TSS. The COD decreases with the increase in the HRT and environmental temperatures, reaching a value of less than 100 mg/L in only one case in the spring campaign. FC and turbidity parameters require further analysis to determine concentrations in the effluent of the system.

“Key words”: Prototype, constructed wetland, modular, greywater, *Juncus patens*.

INTRODUCCIÓN

La escasez hídrica que presenta Chile se ha acrecentado exponencialmente en las últimas décadas. Para el año 2021 se declara insuficiencia hídrica en un 50% del total de comunas del país (Dirección General de Aguas [DGA], 2021). La gestión eficiente del agua pasará a tener un rol preponderante en el próximo tiempo, por consecuencia del aumento de casi tres veces en la demanda de agua a nivel nacional en los últimos 25 años, y sumado a los efectos del cambio climático que afectan cada vez más a las reservas de este recurso (Morales, 2021). La sociedad se ve entonces enfrentada a una posible proyección negativa con respecto a la disponibilidad de agua, no obstante, dicha situación puede originar desafíos y oportunidades hacia la búsqueda de nuevas soluciones.

La reutilización de aguas alteradas por la acción del humano (aguas residuales), resalta como una posible alternativa para hacer frente a un contexto de cambio nacional y global en materia hídrica. Se ha reconocido que el reúso de este tipo de aguas puede actuar como una alentadora solución, para un mejoramiento en la gestión hídrica de muchas regiones áridas y semiáridas del planeta (García y Pargament, 2015)

Según cifras del año 2015, de 359,4 billones de m³ de producción anual global de aguas residuales sólo se reutiliza una cantidad correspondiente a 40,7 billones de m³, o sea, solamente alrededor de un 11,3% anual. Las estadísticas en materia de reutilización de estas aguas van en aumento dentro del mundo desarrollado, pero en disminución para el mundo en vía de desarrollo (Jones *et al.*, 2020). En el caso de Chile, en el año 2018 se llevó a cabo el tratamiento de un total de 1284 millones de m³ de aguas residuales a lo largo del país (a nivel industrial), sin embargo, solo se reutilizó un 1,3% de manera directa para riego u otros fines no potables (Ministerio de Obras Públicas [MOP], 2020). Se esclarece como imprescindible el aumento del reúso de este tipo de efluentes a nivel nacional, tanto a una macro escala como a escalas locales domiciliarias.

Las aguas grises se definen como aguas residuales que no proceden de descargas de inodoro, pudiendo ser generadas en viviendas, edificios, oficinas, colegios, entre otros. Las descargas de inodoro se catalogan como aguas negras debido a su alto contenido en materias fecal y orina (Jefferson *et al.*, 2004). Las aguas grises se pueden dividir en dos según su procedencia: aguas grises claras (duchas y lavamanos) y aguas grises oscuras (lavaplatos, lavavajillas y lavandería). Las aguas grises claras tienden a ser los flujos menos contaminados, por lo que se presentan como las aguas residuales con la mayor facilidad de reciclaje. Las aguas grises oscuras exhiben mayores desafíos para su reutilización, debido a posibles contenidos de aceites, solventes y grasas (Albalawneh y Chang, 2015). Tanto las aguas grises como negras, pueden someterse a tratamiento para posteriormente servir de diversos usos, como lo son la irrigación de jardines, inyección hacia descargas de inodoro, reúso en lavandería y limpieza de autos (Boano *et al.*, 2020).

Existen una serie de distintos tipos de sistemas y tecnologías para el tratamiento de aguas grises en la actualidad. Los sistemas convencionales basados en tipos de tecnología se separan dentro de tres tipos: sistemas de tratamiento primarios, secundarios y terciarios. Los sistemas de tratamiento primarios están destinados a la eliminación de sólidos suspendidos y materia orgánica en el agua mediante filtraciones o decantaciones. Los sistemas de tratamiento secundario incorporan procesos de filtrado y una posterior desinfección del agua. En última instancia, están los sistemas de tratamiento terciarios (generalmente destinados para uso industrial), los cuales incluyen procesos de tratamiento que aumentan la calidad del agua gris, como lo son los procesos fisicoquímicos, filtraciones, oxidaciones, desinfecciones, entre otros (Whiltshire, 2005).

Las Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) son un concepto emergente y en respuesta a los nuevos desafíos que la sociedad presenta, estando basadas en los servicios que las actividades ecosistémicas pueden proveer (Boano *et al.*, 2020). Las SbN pueden proporcionar múltiples opciones de mitigación costo-efectiva ante desafíos como el cambio climático y la seguridad hídrica, entregando también alternativas adaptativas (Marquet *et al.*, 2021). Los humedales existen naturalmente para almacenar agua, sostener la vida silvestre aleadaña, recargar napas subterráneas y otras funcionalidades, como lo es la depuración biológica de las aguas presentes en el medio (Vivanco, 2017).

Un Humedal Construido (HC) hace alusión a una SbN, para el tratamiento de aguas residuales, ya sean grises o negras. En muchos casos, los sistemas y tecnologías convencionales de tratamiento de aguas grises son englobados natural y orgánicamente por un HC, teniendo este una alta eficiencia en la remoción de patógenos y agentes contaminantes existentes en estas aguas (Vidal y Hormazábal, 2018). Los HC's incorporan plantas macrófitas sobre un sustrato compuesto generalmente por arena y grava, lo que se denomina como la zona de tratamiento biológico o biofiltro. En este lugar es donde ocurren diversos procesos de interacción entre las raíces de las plantas y el metabolismo de estas, comunidades de bacterias, nutrientes del agua residual y atmósfera (Saeed y Sun, 2012).

Estas construcciones simuladoras de sistemas naturales pueden ser aplicadas con flujos de agua horizontales o verticales, y con escurrimientos superficiales (de flujo libre expuesto a la atmósfera) o subsuperficiales (flujo de agua dentro del sustrato). Es este último tipo de escurrimiento el con mayor tasa de aplicación debido a su alto grado de eficiencia para depurar aguas, junto a un menor riesgo asociado a manipulaciones indebidas del agua gris (Arteaga-Cortez *et al.*, 2019). Las más grandes ventajas que poseen estos sistemas basados en la naturaleza, son que poseen una larga durabilidad si es que se construyen correctamente (>30 años), como también, que incurren en bajos niveles de mantención y operación debido a su eficiencia energética y funcionamiento ecosistémico. El estado de salud de las plantas macrófitas actúa como un bio indicador para detectar algún problema de funcionamiento del biofiltro, o por el contrario, un correcto accionar por parte de este (Boano *et al.*, 2020).

En el país existe una variada oferta de empresas que operan en el rubro de tratamientos convencionales de aguas grises, como lo son los sistemas basados en filtraciones sedimentarias y posteriores desinfecciones con ozono o UV, al igual que los reactores

biológicos o lodos activados. Dichos sistemas pueden incurrir en altos costos asociados a su implementación y mantenimiento, por lo que no representan una alternativa viable para personas pertenecientes a sectores de bajos ingresos económicos. Sin embargo, los sistemas basados en la naturaleza tienen la potencialidad de ser una alternativa útil, eficiente y amigable con el medioambiente para la reutilización de aguas grises domiciliarias a un bajo costo de inversión (Li *et al.*, 2009).

Este proyecto se realiza en el marco de una iniciativa para promover la sostenibilidad urbana y mitigación al cambio climático, denominada “Conexus: co-produciendo soluciones basadas en la naturaleza y restauración de ecosistemas: nexo transdisciplinario para la sostenibilidad urbana”. Los organismos que actualmente participan dentro de esta iniciativa son la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Chile, el proyecto internacional Conexus del programa Horizon 2020 de la Unión Europea y el Programa Quiero mi Barrio (PQMB) del Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile (Universidad de Chile, s.f).

El PQMB inicia sus proyectos de mejoramiento urbano en el año 2006, enfocándose en barrios distribuidos a lo largo de todo el territorio nacional. El concepto de “barrio” es propiciado por un entorno urbano en conjunción a un tejido social. El programa busca contribuir al mejoramiento en la calidad de vida de personas que habitan barrios, en donde existan características de vulnerabilidad social junto a problemas relacionados al deterioro físico de estos espacios (Ministerio de Vivienda y Urbanismo [MINVU], 2008).

Durante los últimos meses del 2021 se lleva a cabo una práctica profesional en donde se efectúan los primeros acercamientos al proyecto, con el trabajo de un equipo multidisciplinario compuesto por tres estudiantes de la Universidad de Chile, siendo desarrollado el diseño inicial del prototipo junto a su respectiva construcción en un taller especializado. Dicho ejemplar no es implementado a causa de importantes necesidades de mejoramiento. Para el presente trabajo se ejecutan ajustes y rectificaciones a dicho modelo propuesto, para hacer efectiva su correcta puesta en práctica dentro de una vivienda.

La siguiente Memoria de Título entrega una propuesta experimental sobre la aplicación de un prototipo modular de un humedal construido para el tratamiento y reutilización de aguas grises provenientes de lavadoras. El sistema de tratamiento se implementa dentro de una vivienda unifamiliar localizada en un barrio piloto perteneciente al PQMB. El prototipo tiene un enfoque de bajo costo de construcción, implementación y mantenimiento en comparación a sistemas convencionales existentes en el mercado nacional. Este sistema de tratamiento tiene el fin de poder ser replicado e implementado por habitantes de sectores de bajos niveles socioeconómicos, como también, por el PQMB.

La técnica de aplicación del tipo de tratamiento responde a un HC de flujo vertical con escurrimiento subsuperficial y saturación parcial del medio. Se utiliza el tipo de HC de flujo vertical debido al incremento en la utilización de estos durante las últimas décadas en Europa, dado que, pueden presentar mejores resultados relacionados a remociones de contaminantes y patógenos que se encuentran en las aguas residuales, en comparación a los HC's de flujo horizontal (Molle *et al.*, 2006). La zona de depuración de aguas del sistema incorpora dos

biofiltros sedimentarios en conjunto a ejemplares del género *Juncus*. Este género de plantas macrófitas presenta una alta tasa de fitodepuración de aguas residuales en climas con rangos de temperatura de 16°C -27°C, exhibiendo también una considerable resistencia a periodos de bajas temperaturas ambientales (<15°C) (Vidal y Hormazábal, 2018; Syranidou *et al.*, 2017).

Para efectos del análisis de desempeño, se estudia el funcionamiento del sistema de tratamiento relacionándose las temperaturas ambientales con dos Tiempos de Retención Hidráulicos (TRH): 10 horas y 24 horas. El estudio comprende mediciones de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua para un periodo invernal, y otro primaveral. Las estaciones escogidas aluden a un periodo de menor rendimiento en materia de eficiencia de tratamiento biológico, debido a las bajas temperaturas ambientales que existen en invierno (<15°C), y por el otro lado, a un periodo de altos rendimientos depurativos debido al incremento en temperaturas por la acción de la primavera (Kadlec y Reddy, 2001). Además, para el análisis de desempeño se efectúa una evaluación cualitativa del funcionamiento y operación de los distintos módulos del prototipo, como también, del sistema en su totalidad.

Se compara la calidad de agua tratada por el sistema modular de HC, con normativas y recomendaciones nacionales e internacionales para la reutilización de aguas grises. En la actualidad no existe un estándar nacional aprobado para el reúso de aguas grises, limitándose solo a la existencia de una iniciativa legislativa en proceso de ratificación (Leiva *et al.*, 2020). Debido a esto, resulta imprescindible la realización de un contraste de la calidad de agua obtenida por el efluente del sistema, con regulaciones vigentes dentro del escenario mundial. El reúso de las aguas grises tratadas por el sistema de HC se destina a la irrigación de jardines no comestibles, y otras finalidades de carácter no potable comprendidas dentro del domicilio.

Objetivo general

Aplicar un prototipo modular de un sistema de humedal construido para el tratamiento de aguas grises provenientes de lavadoras, dentro de una vivienda unifamiliar.

Objetivos específicos

1. Realización de ajustes y rectificaciones al diseño y construcción del modelo inicial.
2. Implementar el prototipo en el antejardín de una casa, junto a un acompañamiento y capacitación a la familia en el correcto uso del sistema.
3. Analizar el desempeño del sistema de tratamiento bajo dos TRH, con relación a temperaturas ambientales.

METODOLOGÍA

Área de Estudio

El área de estudio correspondió a un barrio urbano incluido en el PQMB del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, dentro de la comuna de Conchalí, Región Metropolitana, Chile. La implementación y evaluación del prototipo se realizó en el antejardín de una casa esquina localizada entre las calles Mar de las Antillas y Mar del Plata (ver Figura 1), al interior de un barrio denominado Remodelación Panamericana Norte, UV N°4 (ver Figura 2). El hogar en particular presentó adecuadas condiciones de aceptación familiar y factibilidad técnica para la incorporación de un sistema de recuperación de aguas grises. En el barrio en mención se quiere incentivar el desarrollo de urbes sostenibles, siendo implementadas diversas soluciones basadas en la naturaleza, todo esto dentro de un marco destinado a afrontar los desafíos relacionados al cambio climático que propicia el proyecto internacional Conexus en conjunto a la Universidad de Chile y el PQMB (Universidad de Chile, s.f).



Figura 1. Casa seleccionada dentro del área de estudio.

La delimitación del área hace referencia a una forma de polígono de 4,3 ha de superficie, el cual está comprendido entre las calles Santa Inés por el norte, la calle Delfos por el sur, y a los costados se encuentran las calles Costa Rica y Carlos Salas Herrera (ver Figura 2). El barrio cuenta con 241 viviendas y un total de 935 habitantes. Existe una sensación de deterioro de las condiciones de salud del barrio por parte de los habitantes del sector, como también, una pérdida de identidad barrial y fragmentación de la comunidad (Tolosa *et al.*, 2021).

Esta zona comprende las características climáticas del tipo mediterráneo, con estaciones estivales secas y largas junto a irregulares inviernos en términos de regímenes pluviométricos, pudiendo existir años con altas precipitaciones invernales, como también,

años con periodos mayormente secos (BCN, s.f). La comuna de Conchalí se encuentra aproximadamente a 503 msnm. La estación meteorológica más cercana a esta zona es la estación Quinta Normal de la Dirección Meteorológica de Chile, la cual se encuentra a una altura de 520 msnm (Dirección Meteorológica de Chile [MeteoChile], 2022).

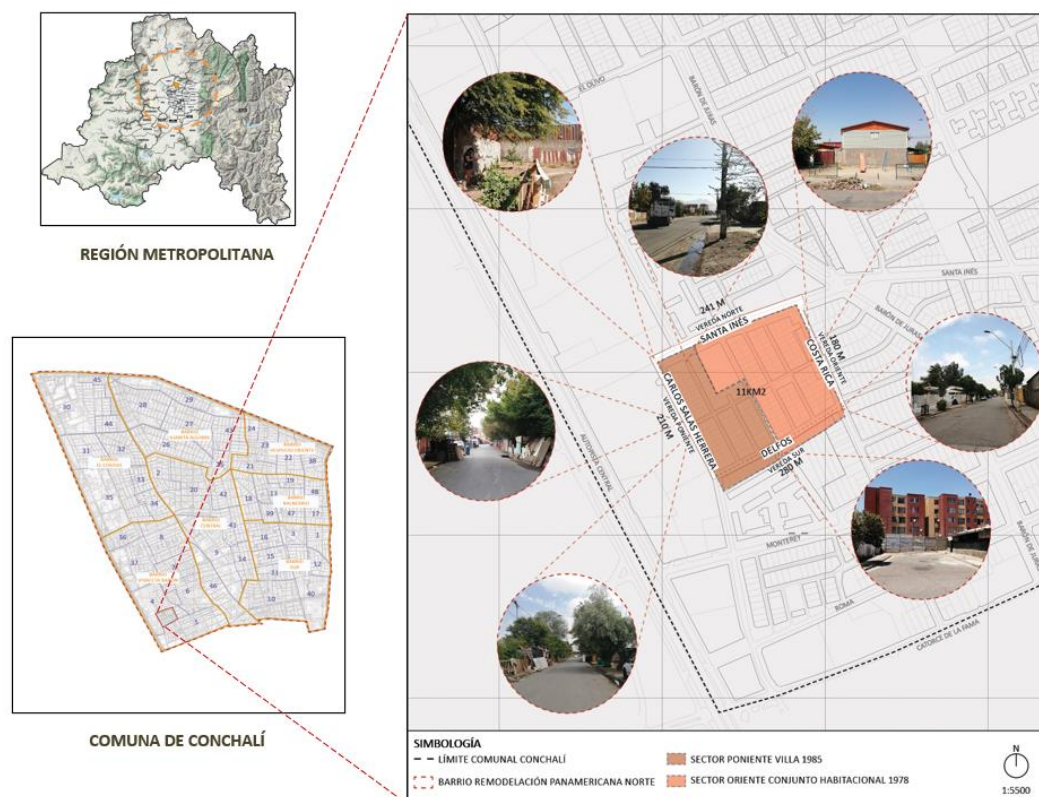


Figura 2. Cartografía del barrio Remodelación Panamericana Norte, UV N°4. Fuente: Elaboración propia a partir de Toloza *et al.* (2021).

Materiales

Objetivo específico 1. Realización de ajustes y rectificaciones al diseño y construcción del modelo inicial

Para el desarrollo del presente trabajo, se inició el proceso de implementación del prototipo con una previa realización de ajustes y rectificaciones al modelo inicial, según criterio de expertos y guías metodológicas de construcción y diseño de humedales construidos. La fase de rectificaciones al modelo inicial fue realizada debido a una identificación de deficiencias existentes en este, las cuales presentaron virtuosas aptitudes de mejora. El modelo inicial del prototipo en 3D se expone en la Figura 3.

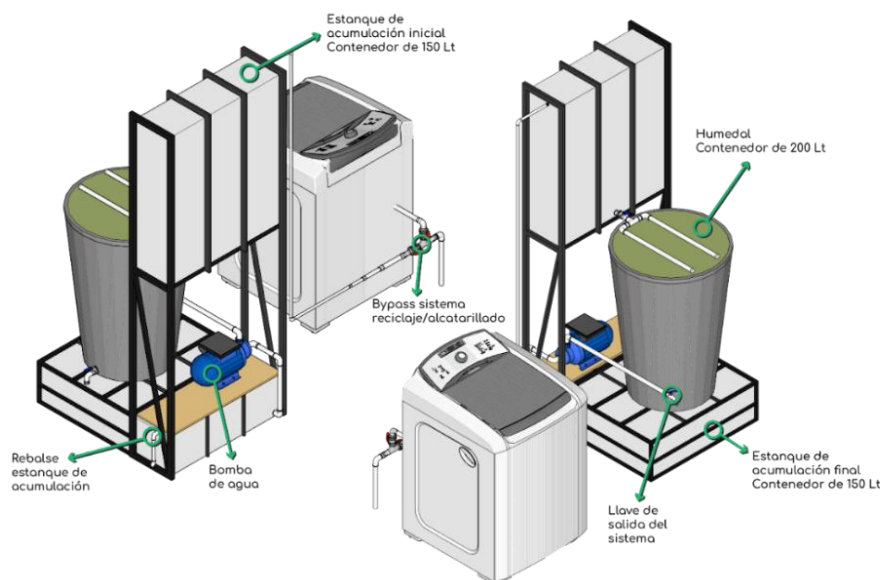


Figura 3. Modelo inicial en 3D del prototipo de HC para el tratamiento y reutilización de aguas grises provenientes de lavadoras.

El modelo inicial propuesto (presentado en la Figura 3) expuso dos estanques de acumulación de agua gris (estanco inicial y final), un estanco color gris para el tratamiento biológico del agua (zona de HC), una electrobomba de agua, un “bypass” de agua en el desagüe de lavadora, cañerías hacia lavadora y una llave de salida del agua gris tratada. El sistema de tratamiento se apoyó en una estructura metálica en forma de L, con un alto de 2,10 m desde el suelo hacia el estanco superior inicial, un largo de 0,92 m en la base del estanco de acumulación final y un ancho de 0,81 m en la base de dicho estanco.

Se llevó a cabo un rediseño de la representación inicial del prototipo, con la utilización de un programa de modelación en 3D. De manera posterior, se modificó y reconstruyó la estructura metálica del prototipo en un taller especializado ubicado en la comuna de Estación Central de la ciudad de Santiago, agregándose nuevos materiales para el correcto accionar del sistema.

Objetivo específico 2. Implementar el prototipo en el antejardín de una casa, junto a un acompañamiento y capacitación a la familia en el correcto uso del sistema

La nueva propuesta constructiva del modelo se expone a continuación:

- 1 estructura metálica con pintura negra antióxido (soporte general)
- 2 soportes metálicos con pintura negra antióxido para estanques verdes
- 2 estanques blancos de acumulación sellados de 150 L cada uno (polietileno)

- 2 estanques verdes de acumulación de 300 L cada uno (polietileno)
- Cañerías de PVC y PPR
- Electrobomba periférica de agua
- Controlador electrónico
- Llaves de paso
- Mangueras
- Contactor eléctrico de 18 A
- Bomba de desagüe genérica para lavadoras
- Cableado eléctrico
- Techo de policarbonato
- 1000 kg de áridos (arena gruesa y gravas)
- 8 ejemplares de *Juncus patens* (especie vegetal macrófita)
- 2 “treillages” de madera

Objetivo específico 3. Analizar el desempeño del sistema de tratamiento bajo dos TRH, con relación a temperaturas ambientales

Los materiales para la medición de agua en terreno se presentan a continuación:

- 2 frascos de 250 ml de vidrio
- 2 frascos de 250 ml de polietileno
- 2 paquetes plásticos refrigerantes
- 1 nevera movible (“cooler”)

Los reactivos y equipos para el análisis de parámetros fisicoquímicos y microbiólogos del agua, son los siguientes:

- Viales de digestión para DQO rango alto plus, 200-15,000 mg/L (Hach)
- TNT 844, test de fósforo de rango alto simplificado, 1,5 - 15,0 mg/L PO₄ (Hach)
- TNT 880, test de nitrógeno total Kjeldahl simplificado s-TKN, 0 - 16 mg/L N (Hach)
- Reactivos para prueba de coliformes (Caldo Lauril Triptosa, Medio EC, Agar MacConkey y Agua de dilución)
- Medidor de pH Multi-Parameter Analyser 18.28 (Eijkelkamp)
- Turbidímetro Ratio Turbidimeter 18900 (Hach)
- Medidor de conductividad eléctrica Multi HQ40d (Hach)
- Espectrofotómetro DR 5000 (Hach)
- Reactor de termostato seco DRB 200 (Hach)
- Aparatos para prueba de sólidos suspendidos (discos filtro de fibra de vidrio, matraces para succión, embudo con filtro, cápsula de aluminio, agitador magnético con barras recubiertas de teflón, desecador, bomba de succión)
- Horno para secado
- Pesa

- Aparatos para prueba de coliformes fecales (autoclave, equipo de baño maría, incubadora, homogeneizador)

Los datos de temperaturas ambientales fueron extraídos del sitio web oficial de la estación Quinta Normal de la Dirección Meteorológica de Chile (MeteoChile, 2022). La información relacionada a concentraciones de los parámetros de calidad de agua estudiados, junto a las temperaturas medias diarias obtenidas, se organizaron y graficaron utilizando Microsoft Excel.

Métodos

Objetivo específico 1. Realización de ajustes y rectificaciones al diseño y construcción del modelo inicial

Se identificaron una serie de características en el modelo inicial (diseño y construcción) que debieron verse sometidas a una etapa de rectificación y mejoramiento, debido a que podrían haber ocasionado fallas disruptivas en el accionar del sistema de tratamiento. En primer lugar, se efectuaron los respectivos ajustes al diseño inicial del modelo para posteriormente continuar a una fase de rectificación constructiva.

Se identificó una primera mejora con respecto al flujo del efluente de la lavadora hacia el estanque de acumulación inicial del prototipo, ya que, el diseño contempló una tubería de PVC (con dos reducciones de diámetro para aumentar presión de salida) desde la lavadora hacia el estanque mencionado, sin propulsión intermedia del agua. Según expertos pertenecientes al taller de prototipado, la columna vertical (2 m aproximadamente) de subida del agua tendría un efecto negativo para la bomba de desagüe de una lavadora promedio, pudiendo resultar en posibles efectos negativos para esta última. Se procedió a desarrollar un sistema auxiliar de propulsión de agua con componentes de bajo costo monetario, elementos que pueden ser encontrados con facilidad en el mercado interno nacional.

Una segunda observación al modelo fue la ausencia de un pretratamiento del agua gris, de manera previa a la zona de depuración biológica. El modelo inicial no contempló una sedimentación o decantación de sólidos, por lo que, podría haberse ocasionado un taponamiento o “clogging” del medio de arena y gravilla en la zona de humedal, debido a la alta carga de sólidos suspendidos y materia orgánica que se hallan en las aguas grises (UN-HABITAT, 2008; Hoffmann, 2011; Vidal y Hormazábal, 2018). Para la realización de una rectificación al modelo, se convirtió el primer estanque de acumulación (con capacidad de 150 L) en un “settling tank” o estanque decantador de sólidos, en base a características básicas de diseño del Manual de Humedales Construidos propuesto por UN-HABITAT (2008) (ver Figura 4).

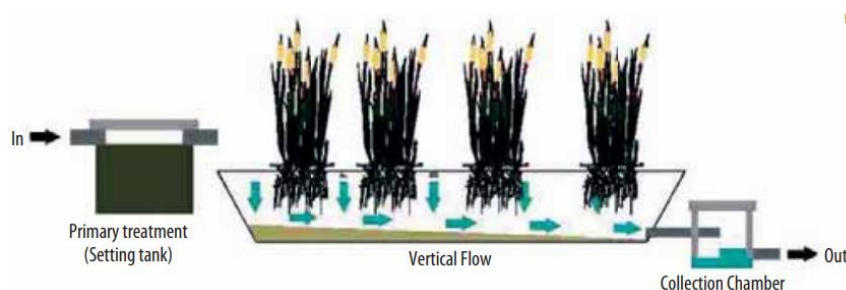


Figura 4. Representación esquemática de un HC de flujo vertical para uso residencial. (Fuente: UN-HABITAT, 2008)

Una tercera observación y rectificación tuvo relación con la zona de humedal propuesta, dado que, no se efectuaron cálculos específicos vinculados al diseño hidráulico y biológico de humedales construidos al momento de desarrollarse el modelo preliminar. El diseño y construcción inicial propuso como zona de tratamiento un estanque cónico de polietileno con una capacidad total de 200 L, para el tratamiento de una descarga diaria proveniente de una lavadora promedio de 10-13 kg. Se identificaron diversos modelos de lavadoras de 10-13 kg dentro del barrio urbano en estudio, consultándose manuales disponibles en la web para la identificación de los consumos de agua pertinentes a cada aparato.

Uno de los aspectos de mayor importancia técnica de consideración al momento de diseñar sistemas de humedales depuradores para aguas residuales, es el Tiempo de Retención Hidráulico (TRH). Este factor tiene una alta influencia en la funcionalidad del mecanismo de tratamiento, siendo este el tiempo promedio en que la porción de agua residual permanece bajo tratamiento en el medio de humedal (Ellis *et al.*, 2003). Antes de llevar a efecto la ejecución de cálculos vinculados al TRH, resultó necesario considerar el volumen efectivo de tratamiento que posee el medio sedimentario dentro del humedal. Los autores Ellis *et al.* (2003) proponen el cálculo referido al volumen del vacío formado dentro del medio de un HC como el que se expone en la Ecuación 1. El denominado “Void Volume” hace referencia a la porción de líquido que puede entrar de manera efectiva a un sustrato compuesto de sedimentos porosos.

$$VV \text{ (“Void Volume”)} = n * V \quad (1)$$

Donde,

VV: Volumen total del vacío [L].

n: Porosidad del medio [fracción decimal].

V: Volumen total del HC [L].

Se utilizó la Ecuación 1 para determinar la cantidad de agua gris que podría haber ingresado de manera efectiva al medio de humedal propuesta en el modelo inicial. Los cálculos se realizaron en base a las características de sedimentos porosos comúnmente usados en humedales depuradores, propuestas por Reed (1993) en el Cuadro 1. Para los cálculos, se abordaron las porosidades ligadas al medio de arena gruesa y gravas (grava media y grava fina), realizándose el cálculo en una razón aproximada de 1:2 respectivamente. Se dispuso

de dicha razón, puesto que un HC con un mayor contenido de arena gruesa que gravas necesita un volumen de mayor envergadura, dada la menor porosidad que presenta este primer sedimento con relación a las gravas. Se utilizaron estos dos tipos de sedimentos debido a sus favorables porosidades y niveles de conductividad eléctrica que exponen en conjunto a sistemas radiculares de especies macrófitas. En particular, la arena gruesa se considera el lecho filtrante de mayor importancia dentro del medio, debido a que, proporciona la superficie para el crecimiento de diversas comunidades microbianas, al igual que soporta la adsorción y los procesos de filtración del agua residual (Hoffmann *et al.*, 2011).

Cuadro 1. Características típicas del medio de humedales construidos con escurrimiento subsuperficial de agua.

Tipo de medio	Tamaño efectivo	Porosidad (n)	Conductividad hidráulica (k)
	D ₁₀ m m	%	m ³ /m ² /d
Arena Fina	2	32	1.000
Arena Gruesa	8	35	5.000
Grava Fina (Gravilla)	16	38	7.500
Grava Media	32	40	10.000

Fuente: (Reed, 1993)

Una vez efectuados los cálculos mencionados, se logró reconocer que el dimensionamiento de la zona de humedal propuesta inicialmente no alcanzaba los requerimientos para el tratamiento de, por lo menos, una descarga diaria de una lavadora promedio de 13 kg. Se estableció entonces un nuevo volumen mínimo del área de HC para el tratamiento deseado. En base a esta nueva propuesta de dimensionamiento, se prosiguió a ejecutar cálculos referidos al diseño hidráulico y biológico de humedales depuradores de aguas residuales. Se utilizó en primera instancia la Ley de Darcy para el diseño hidráulico de la zona de humedal (ver Ecuación 2), principio comúnmente utilizado en sistemas de tratamiento de HC cuando se esperan condiciones de flujos hídricos subsuperficiales a través de medios porosos (Reed, 1993).

$$Q = K_s A S \quad (2)$$

Donde,

Q: Flujo por unidad de tiempo [m³/d].

K_s: Conductividad hidráulica de una unidad de área del medio, perpendicular a la dirección de flujo [m³/m²/d].

A: Área total de la sección transversal perpendicular al flujo [m²].

S: Gradiente hidráulico de la superficie de agua en el sistema de flujo [dh/dL] o [m/m].

En conjunto a la Ley de Darcy, se aplicó la ecuación del Tiempo de Retención Hidráulico (ver Ecuación 3) para el diseño hidráulico y biológico del área de humedal. El principio anteriormente mencionado combina los factores del movimiento de un líquido en un medio poroso, junto al tiempo de tratamiento de dicha porción de líquido dentro del humedal. Si es

que se despeja el flujo promedio y se integra el tiempo de retención dentro de la fracción, se puede obtener de manera similar, el flujo promedio Q en relación al que entrega la Ley de Darcy (Reed, 1993).

$$t = \frac{nLWd}{Q} \quad (3)$$

Donde,

t: Tiempo de retención hidráulico [d].

n: Porosidad efectiva del medio [fracción decimal].

L: Largo de superficie del HC [m].

W: Ancho de superficie del HC [m].

d: Altura promedio del líquido dentro del medio [m].

Q: Flujo promedio a través del medio [m³/d].

Con la aplicación de los lineamientos y ecuaciones mencionadas, se confeccionó el diseño de la nueva propuesta de tratamiento biológico. Este nuevo planteamiento se basó en dos estanques contenedores de polietileno, incluyendo cada uno un HC con las mismas características de plantas macrófitas, sustrato poroso, cañerías, flujo de agua gris y tiempo de retención hidráulico. Se denominó a estos estanques de tratamiento como la zona de depuración biológica del agua, o zona de HC. Se debió realizar también, el nuevo diseño del sistema de cañerías de distribución, recolección y aireación que contendría cada estanque.

No se utilizaron otras ecuaciones ligadas a variaciones de caudales por efecto de ciertos factores que afectan al balance hídrico, como lo pueden ser la precipitación y drenaje. El sector de antejardín de la casa seleccionada en el lugar de estudio dispone de un techo que cubre la totalidad de la zona, por lo que, los flujos promedios de agua en el humedal no tuvieron incidencia de verse afectados debido al factor de precipitación. La pérdida de agua por drenaje tampoco fue una limitante, ya que, se propuso el empleo de estanques de polietileno, material de alta resistencia y larga durabilidad (Llaberia Group, 2020). Esto resulta en que las ecuaciones anteriormente descritas son aplicables para el diseño de un sistema eficaz (Reed, 1993).

De manera posterior a la etapa de depuración biológica del agua gris, no se añadió una fase de desinfección del agua (cloración, luz UV u ozonificación). Este factor de diseño se sustentó en que se pretendió estudiar la calidad del agua gris posterior a un sistema básico en relación a etapas de tratamiento, solo con la inclusión de una fase de decantación de sólidos, seguida por una zona de depuración biológica del agua. Después de una evaluación preliminar, se concluyó que solo las etapas recién mencionadas se ajustaban a una de las aristas del proyecto inicial previo a la ejecución de la presente memoria, la cual fue desarrollar un sistema de tratamiento de bajo costo de inversión.

Al momento de finalizarse la etapa de cálculo, se continuó a realizar el diseño final del sistema de tratamiento con la utilización de un programa de modelación en 3D (ver Figura 5).



Figura 5. Modelado del diseño final del prototipo en 3D.

En la consumación final del diseño se englobaron todas las observaciones mencionadas en este capítulo, para formar módulos con funcionamiento en conjunto de manera orgánica dentro de un solo sistema compacto. Con el modelo en 3D terminado, se prosiguió a reconstruir el prototipo en el taller especializado. Se adquirieron nuevos estanques para la zona de depuración biológica del agua, siendo estos probados hidráulicamente e incorporados al prototipo.

Objetivo específico 2. Implementar el prototipo en el antejardín de una casa, junto a un acompañamiento y capacitación a la familia en el correcto uso del sistema

Selección de una vivienda dentro del lugar de estudio. Se llevó a cabo una consulta a vecinos/as residentes del barrio Remodelación Panamericana Norte, UV N°4, en función de realizar una primera instancia de reconocimiento de posibles interesados/as para incorporar un sistema de tratamiento de aguas grises en su domicilio. Este primer acercamiento fue llevado a cabo por un equipo de funcionarios del PQMB en los meses de septiembre y octubre del 2021.

Una vez que se reconocieron personas interesadas, se efectuó una salida de reconocimiento de dichos hogares (cinco casas) para determinar la factibilidad de instalación de un sistema de tratamiento. Se desarrolló un pequeño cuestionario base sobre la temática relacionada a aguas grises y el método de tratamiento propuesto, sirviendo este cuestionario como preguntas base para abordar una conversación retroalimentativa y de explicación sobre los

términos y conceptos de la temática abordada. Se realizaron las siguientes preguntas a modo de conversación explicativa para cada grupo familiar:

1. ¿Usted conoce lo que son las aguas residuales (grises o negras) producidas dentro del hogar?
2. ¿Conoce usted en que podrían ocuparse las aguas grises producidas dentro de su hogar?
3. ¿Conoce algún tipo de sistema de reutilización de aguas grises?
4. ¿Le interesaría ahorrar en gastos de agua, y a la vez poder contribuir a su hogar y también a la comunidad?
5. ¿Le interesaría poder regar su jardín con el uso de esta aguas recicladas?
6. ¿Estaría dispuesto/a a incorporar un sistema de reutilización de las aguas grises provenientes de su lavadora?
7. Si es que la respuesta anterior fuese sí. ¿Le gustaría tener dentro de su vivienda un sistema basado en un humedal construido?

Una vez finalizados los procesos de consulta y explicación de la temática a cada familia, se procedió a escoger una casa para la implementación del prototipo.

Implementación y puesta en marcha del prototipo. Una vez finalizado el proceso de rediseño y reconstrucción del modelo inicial del prototipo, se procedió a transportar todos los componentes del sistema de tratamiento a la casa seleccionada dentro del área de estudio. Se realizó el proceso de implementación del prototipo durante el mes de mayo del año 2022, con un total de 7 días completos de trabajo efectivo en terreno.

Se acudió a la ayuda de un técnico profesional para este proceso, de manera que los trabajos relacionados a instalaciones eléctricas y otros de mayor dificultad técnica, tuvieran una óptima ejecución. Se confeccionaron las conexiones de agua, sistemas eléctricos y debidas rectificaciones a los diferentes estanques y aparatos del sistema. Una vez ensamblados los diferentes módulos, y de manera previa al armado de la zona de tratamiento biológico del agua, se procedieron a efectuar pruebas hidráulicas para la evaluación de un óptimo funcionamiento del sistema en su totalidad.

Para la fase de instalación de la zona de depuración biológica, se comenzó con la adición del sustrato compuesto por dos tipos de gravas, y arena gruesa. La utilización de arena gruesa, a diferencia de la arena fina, tuvo origen debido a la mejor capacidad que posee para mantener la conductividad hidráulica del medio en conjunción a sistemas radiculares de plantas macrófitas. En adición a lo anterior, se destaca una facilitación del crecimiento de colonias de bacterias y microorganismos en las partículas de arena gruesa y superficie de raíces (“biofilm”), por la acción de especies macrófitas (Hoffmann *et al.*, 2011).

Se empleó el uso de gravas debido a su amplia utilización en humedales depuradores en diferentes países del mundo. La conjunción de gravas y arena gruesa en el biofiltro puede aumentar la permeabilidad del medio, además de entregar deseables resultados con respecto

a la remoción de patógenos, bacterias, sólidos suspendidos, demanda bioquímica de oxígeno, nitrógeno, fósforo y metales (Scholz y Lee, 2005). Se dejaron entre 8-10 cm de zona libre de sedimentos en la parte superior de los estanques depuradores, con el fin de obtenerse un 10% del volumen total para posibles eventualidades de rebalse de agua sobre el medio poroso (Wood, 1995).

En cada estanque depurador se añadió el mismo número de plantas macrófitas, utilizándose una razón cercana a 12 plantas macrófitas emergentes por m², razón propuesta por los autores Sandri y Reis (2021). Las plantas fitorremediadoras que se escogieron para el estudio corresponden al género *Juncus*, el cual pertenece a la familia de las Juncáceas. Se seleccionó este género de plantas monocotiledóneas herbáceas debido a que presentan capacidades de tolerar ambientes anegados de aguas contaminadas, como también aguas con alta salinidad debido a su característica de ser halófitas.

Se ha demostrado que este género puede liberar altas cantidades de oxígeno en su rizosfera, beneficiando a diversas comunidades bacterianas y fúngicas que se encuentran en esta zona próxima a las raíces (Syranidou *et al.*, 2017). El género *Juncus* es comúnmente utilizado en humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales, teniendo estas plantas la característica de tolerar climas extremos (Syranidou *et al.*, 2017), ahora bien, el rango de temperaturas ambientales para su óptimo funcionamiento depurativo va desde los 16°C-27°C (Vidal y Hormazábal, 2018).

Según los autores Vidal y Hormazábal (2018), al momento de seleccionar especies vegetales para implementar en un HC es importante considerar: clima y latitud, disponibilidad de plantas, tamaño de plantas, tasa de colonización de especies de plantas, calidad de agua y objetivos del proyecto. Es por lo anteriormente mencionado que se eligió en específico, la especie *Juncus patens*, siendo esta una variedad originaria de California (EE.UU) que se comercializa en viveros locales de la zona central de Chile. Esta especie perenne puede llegar a medir entre 0,3-1 m de alto, posee una tasa de colonización moderada en relación a otras especies macrófitas, presenta una tolerancia a heladas ambientales de hasta -9,5°C y puede soportar suelos saturados como también condiciones de sequía en verano (California Native Plant Society [Calscape], s.f). No se utilizó la especie *Schoenoplectus americanus* debido a la altura que pueden alcanzar sus ejemplares (3 m), no existiendo una disponibilidad del espacio requerido por esta especie en la zona de instalación del prototipo.

Se escogieron dos tiempos de retención hidráulicos para el presente estudio, tiempos correspondientes a 10 h y 24 h. Estos tiempos de tratamiento fueron seleccionados bajo dos razonamientos, el primero tuvo relación con la factibilidad de empleabilidad del sistema de tratamiento, ya que, este incurrió en una conexión total con la lavadora del hogar. Al estar conectado el prototipo de manera eléctrica e hidráulica al aparato de línea blanca mencionado, se debió limitar el uso de este último al TRH del sistema de tratamiento, condicionándose el estilo de vida del grupo familiar con relación al lavado de vestimenta.

El segundo razonamiento fue sustentado en bibliografía científica recopilada. Referente al TRH de 24 h, se observó un sustento bibliográfico más robusto en comparación al TRH de

10 h. Según un compilado de estudios realizado por Vidal y Hormazábal (2018), se destaca que los humedales depuradores con escurrimiento subsuperficial y flujo vertical que operan bajo un TRH de 24 h, pueden llegar a tener eficiencias de remoción en aguas residuales respectivas a un 30-95% de materia orgánica, 35-55% de nitrógeno, 23-60% de fósforo y 99% de patógenos.

Con respecto al tiempo de tratamiento de 10 h, se observó una menor presencia de bibliografía que lo sustente, por lo tanto, se denotó como una propuesta a investigar en el trabajo. De igual manera, en un artículo publicado por los autores Avery *et al.* (2007), se concluyó que un HC de flujo vertical con plantas macrófitas para la depuración de aguas grises domiciliarias trabajando bajo un TRH de 8,4 h, pudo remover un 93% de la demanda bioquímica de oxígeno, un 81% de la demanda química de oxígeno y un 92% de sólidos suspendidos totales.

Los humedales depuradores de flujo vertical tienden a promover la transformación de nitrógeno amoniacal a nitratos y nitritos (proceso de nitrificación), sin embargo, son menos efectivos transformando nitritos y nitratos a nitrógeno gas (proceso de desnitrificación). Lo anterior sucede si es que el modo de operación del HC de flujo vertical alude a uno de alimentación intermitente del agua residual, en donde no se realiza una saturación del medio filtrante (Bassani *et al.*, 2020). Los humedales construidos de flujo horizontal promueven el mecanismo de desnitrificación, pero con limitada nitrificación debido a una saturación del medio (Vidal y Hormazábal, 2018).

El método de operación seleccionado para el funcionamiento del sistema de tratamiento biológico, correspondió al tipo denominado como Humedal Construido de Flujo Vertical Parcialmente Saturado (HCFVS), o por sus siglas en inglés como “SVF wetland”. Con la utilización de este tipo de operación para humedales depuradores se satura parcialmente el medio filtrante, alimentándose el volumen total de este mediante pulsos con una mayor cantidad de carga hidráulica, llegándose a saturar con agua residual entre un 60-80% del volumen total de la zona sedimentaria (Bassani *et al.*, 2020). Se empleó este tipo de operación para conseguir un sistema de tratamiento compacto y ergonómico, sin la adición de mayores volúmenes destinados al acopio de agua previo a su tratamiento y/o a la zona de HC.

Se ajustó el TRH inicial para el comienzo del funcionamiento, tiempo de retención del agua referente a 10 horas. Este tiempo de retención tuvo un funcionamiento constante durante el mes de junio y julio. Una vez comenzada la fase de mediciones de calidad de agua para el periodo invernal, el TRH fue modificándose en función del cronograma de planificación de mediciones expuesto en el Cuadro 2 (expuesto en sección de Planificación de Muestreos).

Acompañamiento y capacitación a la familia en el correcto uso del sistema de tratamiento. El proceso de acompañamiento al grupo familiar comenzó a partir del momento en que se seleccionó la vivienda para la instalación del prototipo. Durante los primeros meses del año 2022 se estuvo asistiendo continuamente a la casa en mención, para la verificación de medidas y especificaciones técnicas pertinentes al proceso de implementación de un

sistema de tratamiento de aguas grises. Además, se mantuvo constantemente al tanto a la familia con explicaciones sobre la evolución del diseño del modelo, para así asegurar un conocimiento recíproco sobre los distintos avances del proyecto.

Al momento de iniciarse la instalación del prototipo en el antejardín de la casa, se comenzó en conjunto un proceso de capacitación sobre las cualidades y características del sistema de tratamiento en su totalidad. Se indicaron los diversos componentes y módulos que expuso el sistema, como también, las posibles fallas de funcionamiento que cada uno de estos módulos podría presentar, con la finalidad de que todos los miembros de la familia tuvieran la capacidad de dar aviso en caso de deficiencias en el funcionamiento del prototipo.

Durante el transcurso del año se mantuvo un constante acompañamiento a la familia, realizándose visitas mensuales, y en algunos casos semanales, para la verificación de la correcta operación del sistema. Además, durante las campañas de muestreo de calidad de agua en los periodos de invierno y primavera, se verificó el estado del sistema de tratamiento de manera continua.

Objetivo específico 3. Analizar el desempeño del sistema de tratamiento bajo dos TRH, con relación a temperaturas ambientales

Funcionamiento y operación del sistema. Una vez comenzado el inicio de funcionamiento del prototipo, se llevaron a cabo constantes evaluaciones y observaciones cualitativas del sistema en su totalidad. Mediante este tipo de observaciones se pudo apreciar el desempeño parcial y total en algunos casos, de flujos hidráulicos, conexiones de tuberías y mangueras, módulos de tratamiento primario, módulo de acumulación final de agua, zona de depuración biológica y bombas de agua. Aparte de una apreciación de desempeño, se pudo operar el sistema en base a los análisis visuales que fueron llevándose a cabo, modificándose o agregándose elementos al sistema en función de los resultados. Este método se llevó a efecto desde el día de puesta en marcha del prototipo, hasta fines del 2022.

Planificación de muestreos. Para la realización de muestreos de calidad de agua, se organizó una planificación de dos campañas de medición a lo largo del año 2022. La primera campaña fue referente al periodo de invierno, y la segunda al periodo de primavera. La primera medición tuvo lugar el 13 de junio, una vez comenzada la operación del sistema de tratamiento el día 1 de junio. En esta primera toma de muestras se recolectó agua gris proveniente del afluente únicamente, para efectuar una primera caracterización de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos. Las mediciones 2' y 3' fueron ejecutadas con recolecciones de muestras del afluente y efluente, con un TRH de 24 h y un TRH de 10 h. La segunda campaña correspondió al periodo de primavera, realizándose dos mediciones de afluente y efluente para el TRH de 10 h, y un muestreo de las dos fuentes mencionadas para el TRH de 24 h.

En el Cuadro 2 se exponen las campañas de medición con cada muestreo realizado dentro de aquellas, junto al TRH y tiempo transcurrido desde el inicio de operación del sistema de tratamiento.

Cuadro 2. Planificación de campañas y mediciones de la calidad del agua.

N.º de campaña	N.º de medición	TRH	Tiempo transcurrido	Fecha
		h	d	
1	1'	-	12	13/06/22
	2'	24	61	01/08/22
	3'	10	68	08/08/22
2	4'	10	124	03/10/22
	5'	10	138	17/10/22
	6'	24	145	24/10/22

Recolección de muestras. Se ejecutaron muestreos de calidad de agua correspondientes al afluente que entró al sistema de tratamiento, y al efluente de agua gris tratada. Cabe destacar que el afluente no representó de manera estrecha al efluente, por lo que no se relacionaron directamente en el estudio.

La recolección de muestras de agua gris fue llevada a cabo según el Manual Operativo de la Norma de Muestreo de Aguas Residuales NCH 411/10 – 2005 (Superintendencia de Servicios Sanitarios [SISS], 2010). Todas las recolecciones fueron realizadas durante las mañanas, ya que, es el periodo del día en que las temperaturas ambientales no alcanzan el máximo, no afectando así a la temperatura de las muestras. Las mediciones tuvieron lugar los días lunes, siendo llevadas las muestras de manera inmediata al laboratorio de Calidad de Aguas Gabriela Castillo de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

En cada toma de muestras se utilizaron dos frascos de 250 ml de vidrio neutro para muestras bacteriológicas, y dos frascos de 250 ml de polietileno de alta densidad para muestras de parámetros fisicoquímicos (ver Figura 6). Los frascos utilizados tuvieron la característica de ser de boca ancha, para una recolección directa del agua residual. Cada frasco se rotuló y agrupó en una nevera móvil, en donde se introdujeron también, dos paquetes de hielo refrigerante para mantener una cadena de frío y conservar así, las propiedades del agua residual. Los frascos de vidrio para mediciones microbiológicas se llenaron a $\frac{3}{4}$ de su capacidad, de manera de permitir una cámara de aire dentro de ellos.



Figura 6. Almacenamiento de muestras para su traslado al laboratorio.

Para la realización de los muestreos pertinentes al afluente de agua, se procedió a ejecutar un lavado previo del estanque de tratamiento primario, con la finalidad de eliminar la materia sólida acumulada en el fondo de este. El lavado fue realizado con la primera fase de descarga de la lavadora (60-85 L), enviándose el agua residual hacia el alcantarillado mediante una manguera conectada a la válvula de limpieza (ver Figura 7). Posteriormente, se procedió a recolectar una muestra de parámetros fisicoquímicos y una muestra de parámetros bacteriológicos. Esta toma de muestras fue representada por la fase de enjuague de la ropa (Fases: lavado, enjuague y centrifugado). El agua perteneciente al afluente del sistema fue recolectada de esta manera debido a que no se sometió a la fase de tratamiento primario, como tampoco a la fase de tratamiento biológico.



Figura 7. Lavado del estanque de tratamiento primario para la posterior recolección de muestras del afluente del sistema.

La recolección de la muestra proveniente del efluente del sistema, fue realizada con la utilización de una manguera para riego conectada a la válvula del efluente del prototipo (ver Figura 8). El agua gris que se dispuso a través de la manguera en mención, fue acopiada previamente dentro del estanque de acumulación final de 150 L. Se limpió con papel higiénico la zona de salida de agua de la manguera (zona metálica) de manera anterior a la recolección. Antes de realizar el llenado de frascos, se abrió la válvula del efluente y se dejó correr el agua por un tiempo aproximado de 20 segundos, con el objetivo de poder obtener una muestra más homogénea y sin residuos de agua estancada en la manguera.



Figura 8. Recolección de muestras del efluente del sistema.

Antes del muestreo del día lunes, se vació el estanque de acumulación final el día viernes por la tarde, para que el efluente de agua gris tratada (recolectado el lunes) correspondiera a tratamientos ocurridos durante las 48 horas previas. Este método de vaciado fue empleado con la utilización de la electrobomba, y haciendo unión de la manguera para riego con una manguera corrugada conectada al alcantarillado, para el envío de toda el agua acumulada hacia esta última zona mencionada.

Según Eriksson *et al.* (2002), el almacenamiento de aguas grises puede aumentar la calidad del agua durante las primeras 24 horas, no obstante, el acopio de estas aguas por un tiempo mayor a 48 horas puede tender a agotar el oxígeno disuelto. La World Health Organization (2006) señala que el almacenamiento de aguas grises por más de 48 horas puede proporcionar malos olores, además de propiciar condiciones favorables para una multiplicación de microorganismos. Se denota que este tipo de aguas al ser tratadas de manera adecuada, pueden ser acumuladas en estanques durante tiempos prolongados.

La muestra ligada al efluente del sistema fue entonces representada por una descarga de lavadora (afluente) realizada durante los días sábado o domingo previos al día de recolección. No se pudieron recolectar y analizar muestras de este afluente originado el día sábado o domingo por disponibilidad del laboratorio.

Análisis de laboratorio. Las muestras una vez recolectadas fueron llevadas al laboratorio de manera inmediata. Los frascos de polietileno para la medición de características fisicoquímicas, fueron retirados y separados para asegurar su temperatura ambiente para un posterior análisis efectivo de los parámetros recién mencionados.

Los parámetros de calidad de agua comprendidos en el estudio fueron los siguientes: Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Turbiedad, Conductividad Eléctrica (CE), pH, Coliformes Fecales (CF), Nitrógeno Total (NT), Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK) y Fósforo Total (PT). Se analizaron estos parámetros según los Métodos Estándar para el Examen del Agua y Aguas Residuales (Baird y Bridgewater, 2017), y los Métodos de Análisis de Aguas Para Riego (Sadzawka, 2006). En casos específicos, se aplicaron metodologías correspondientes a cada tipo de prueba de productos de la marca Hach, u otras.

Para la medición de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) se procedió a utilizar el método de digestión de reactor Hach 8000 (Hach, 2021a), con viales de digestión para aguas residuales de rango alto (200-15,000 mg/L). Se agregó 2 ml de muestra a cada vial reactivo para posteriormente ser insertados en el digestor Hach DRB 200 por un tiempo de 2 horas, a 150 °C. Para la lectura del valor final se utilizó el espectrofotómetro DR 5000.

Las mediciones de Fósforo Total (PT), Nitrógeno Total (NT) y Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK) fueron efectuadas mediante los métodos Hach 10210 (Hach, 2021b) y 10242 (Hach, 2022). Los productos utilizados correspondieron a: TNT 844 (test de fósforo de rango alto simplificado, 1,5 - 15,0 mg/L PO₄) y TNT 880 (test de nitrógeno total Kjeldahl simplificado s-TKN, 0 - 16 mg/L N). Se utilizó entre 0,5 y 1,3 ml de muestra para estas dos pruebas, agregándose los tubos de ensayos con muestra y reactivo al digestor Hach DRB 200. Los valores finales fueron leídos en el espectrofotómetro DR 5000.

La prueba de Sólidos Suspendidos Totales (SST) fue llevada a cabo en relación a la metodología de Sólidos Suspendidos Totales Secados a 103°C – 105°C, según los Métodos de Análisis de Aguas Para Riego (Sadzawka, 2006) (ver Figura 9). Se emplearon entre 40-100 ml de alícuota de la muestra original por prueba (dependiendo de la cantidad de residuo acumulado en el filtro y el punto de saturación de este), utilizándose un set de dispositivos para la filtración de los sólidos suspendidos (bomba de succión, filtros de fibra de vidrio de 2 µm, embudo, matraces, desecador, agitador magnético, cápsulas de aluminio). Los filtros fueron secados y pesados, repitiéndose este paso hasta llevarse a peso constante.



Figura 9. Materiales para la filtración de SST en aguas residuales.

La turbiedad fue medida con el turbidímetro Ratio Turbidimeter 18900 (Hach), el pH se midió con la utilización de un equipo medidor Multi-Parameter Analyser 18.28 (Eijkelkamp). La Conductividad Eléctrica (CE) fue medida a través del equipo Multi HQ40d (Hach).

El parámetro de Coliformes Fecales (CF) fue analizado según los Métodos Estándar para el Examen del Agua y Aguas Residuales (Baird y Bridgewater, 2017). Se utilizó el método de estimación por el Número Más Probable (NMP) con la técnica de los tubos múltiples (caldo Lauril Sulfato Triptosa, medio EC, agua de dilución, caldo MacConkey), para la determinación de coliformes termo tolerantes en aguas residuales, microorganismos fermentadores de lactosa que producen gas a 44.5°C.

Todos los parámetros del presente estudio fueron analizados en el laboratorio de Calidad de Aguas Gabriela Castillo, y dentro de la mañana del día lunes correspondiente a la recolección de muestras en terreno. El trabajo fue realizado de este modo para que ningún parámetro fuera ingresado a estudio de manera posterior a las primeras 24 horas desde la recolección de muestras, con el fin de obtener resultados más certeros.

Consta mencionar que el uso de la lavadora en la casa se limitó solo a lavados de ropa y otros, con agua fría. Esto se debió a que no hubo conexión del aparato en mención a la línea de agua caliente. Es por esto que no se midió la temperatura del agua de manera *in situ*, ni tampoco se utilizó como parámetro de medición en laboratorio. El agua fría o tibia (5°C - 25°C) no es un factor condicionante de la calidad de tratamiento de sistemas de humedales construidos, ya que se encuentra en un rango óptimo, a diferencia del agua caliente (>35°C) que es capaz de detener procesos de digestión aerobia y nitrificación bacteriana dentro del biofiltro (Delgadillo *et al.*, 2010).

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) no fue utilizada para la investigación debido a la ausencia de reactivos para su medición. El cloro libre residual tampoco fue comprendido para su medición, ya que, el prototipo no contempló una fase de desinfección por cloración posterior a la etapa de tratamiento biológico.

Análisis de datos. Los parámetros de calidad de agua fueron tabulados en Microsoft Excel, según su fuente (afluente o efluente), TRH, fecha y periodo del año en donde fueron medidos (invierno o primavera). Se tabuló además las temperaturas ambientales correspondientes a los días previos a la fecha de medición, con el fin de poder obtenerse el set de temperaturas ambientales que incidió en el tratamiento del efluente recolectado. Se utilizaron las temperaturas medias diarias de los días sábado y domingo previos al día de muestreo, datos que fueron obtenidos de la Estación Meteorológica de Quinta Normal.

De manera posterior, se realizaron gráficos de barra según campañas de medición (estación de primavera o invierno), TRH, número de medición, media de concentraciones en afluentes del periodo y concentraciones de parámetros físicos, químicos y microbiológicos que se encontraron en los efluentes. No se llevaron a efecto análisis estadísticos de los datos recopilados, debido a la baja cantidad que se obtuvo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Objetivo específico 1. Realización de ajustes y rectificaciones al diseño y construcción del modelo inicial

Los cálculos y lineamientos basados en guías metodológicas para el diseño y construcción de humedales depuradores, junto a sugerencias de expertos, tuvieron por finalidad sentar las bases para la etapa de rediseño y reconstrucción del modelo inicial propuesto.

En primera instancia, para perfeccionar el flujo de agua del efluente de la lavadora hacia el prototipo se desarrolló un sistema auxiliar propulsor de agua (ver Figura 10). Este sistema tuvo automatización completa y constó de un contactor eléctrico de 18A conectado mediante cableado eléctrico a una bomba de desagüe genérica para lavadoras.

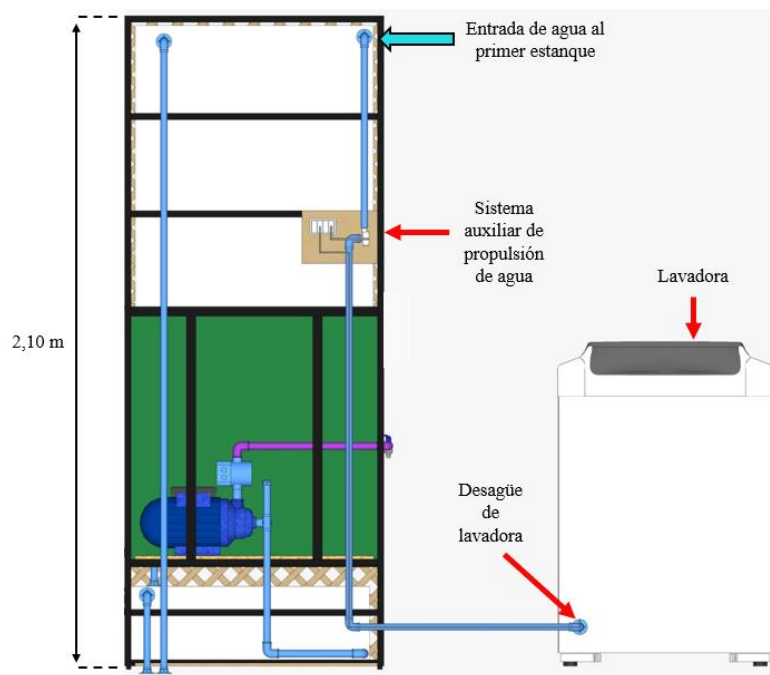


Figura 10. Representación esquemática en 2D de la vista trasera del prototipo, con énfasis en el aparato propulsor de agua desarrollado.

Dicho sistema propulsor incurrió en una conexión eléctrica hacia la lavadora, para que el desagüe de cada lavado, enjuague y centrifugado proveniente del mueble de línea blanca, tuviera un funcionar en conjunto al sistema propulsor intermedio de agua hacia el prototipo. El sistema en mención se situó en una zona aproximadamente intermedia de la columna vertical del prototipo, en función de que el aparato propulsor original de la lavadora propiciara una subida de agua de la mitad de la columna (1 m aproximadamente), para que

luego el sistema propulsor desarrollara el impulso de agua a lo largo de la longitud restante hacia el primer estanque. Dada la rectificación que se le realizó al modelo, se eliminó el “bypass” de agua localizado a la salida del desagüe de la lavadora (elemento del diseño inicial) debido a posibles complicaciones de su funcionamiento.

En base a la segunda observación y rectificación efectuada, el estanque de acumulación inicial fue transformado en la fase de tratamiento primario del prototipo como se puede observar en la Figura 11. El modelo anterior poseía una válvula de PVC de $\frac{3}{4}$ " en la zona inferior izquierda del estanque (vista lateral), válvula la cual se mantuvo para utilizarse como una vía de limpieza de sólidos y materia orgánica acumulada en la zona baja del estanque. Se incorporó una válvula de PVC de 1" a una altura media del estanque (salida de agua gris hacia tratamiento biológico), con el fin de asemejar el objeto a un estanque séptico de una cámara. Además de los ajustes anteriormente mencionados, se añadió también un sistema de rebalse (manguera de 1") en la zona superior del estanque para conectar con el sistema de alcantarillado, con la finalidad de prevenir situaciones adversas ligadas a la acumulación de líquido dentro del estanque.

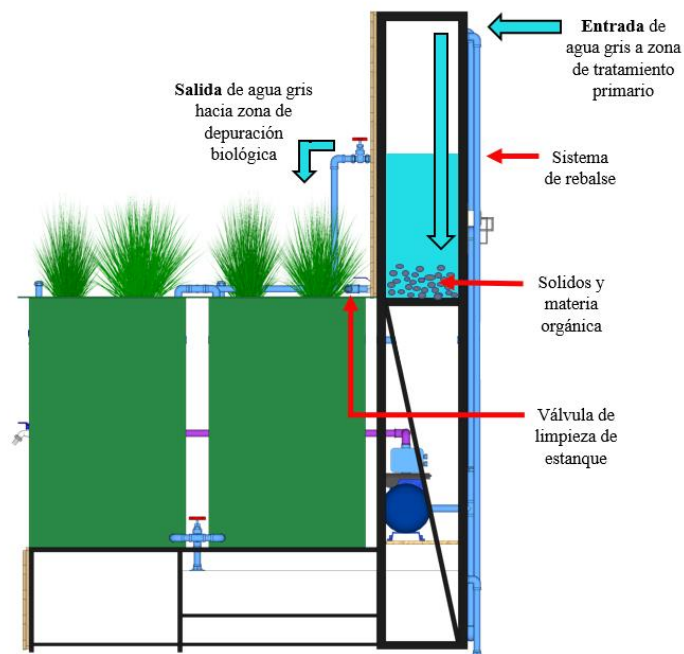


Figura 11. Representación esquemática en 2D de la vista lateral del prototipo, con énfasis en la fase de tratamiento primario.

Con respecto a la rectificación de la zona de HC, se logró de manera inicial la identificación de los consumos de agua de las lavadoras de 10-13 kg situadas en las cinco casas consultadas dentro del área de estudio. Fue posible determinar que la lavadora con mayor capacidad, fue la que estuvo situada en la vivienda seleccionada para la implementación del prototipo (lavadora marca Samsung de 13 kg de capacidad). El consumo de este aparato es de 120 L en un lavado con nivel mínimo, y de 170 L en un lavado con el máximo nivel de potencia.

Dentro de este rango existen 10 niveles de lavado. Con la información expuesta anteriormente, se dispuso a desarrollar el rediseño en función de ser apto para albergar el tratamiento de una descarga con el nivel máximo de lavado de la lavadora de 13 kg, sirviendo de igual manera para descargas de lavadoras de menor capacidad.

En base al cálculo del Volumen de Vacíos se decidió utilizar una zona de HC de 600 L en total, la cual se compuso por dos estanques rectangulares verdes con un volumen de 300 L cada uno. Este primer cálculo utilizado para la rectificación del modelo entregó que, para una descarga máxima de la lavadora identificada se necesitaría un mínimo de 550 L para tratamiento biológico, debido a que el lavado con el máximo nivel de agua que pudo haber propiciado la lavadora era de 170 L. Al ser necesario un 10% del volumen total de la zona de HC para previsión de rebalses (Wood, 1995), se añadieron 50 L al mínimo requerido, resultando en un volumen total final de 600 L.

Una vez identificada la zona necesaria para el tratamiento biológico del agua gris proveniente de la lavadora, se utilizó la Ley de Darcy junto a la ecuación del Tiempo de Retención Hidráulico. Según Collivignarelli *et al.* (2020), con la aplicación de esta última ecuación (TRH) se puede conseguir el flujo óptimo de líquido residual que puede depurar un HC en un tiempo determinado.

Con la utilización de las dos ecuaciones anteriormente mencionadas, se consiguió determinar el caudal que pudo ingresar a este tipo de tratamiento según distintas unidades de tiempo para depuración. Se identificaron dos flujos promedio (m^3/d) que pudieron ingresar al proceso de tratamiento dentro del volumen total de la zona de HC, en donde se utilizó una razón aproximada de gravas y arena gruesa correspondiente a 2:1. El primer caudal promedio hizo referencia a un total de $0,202 \text{ m}^3/\text{d}$ ($202 \text{ L}/\text{d}$) para un TRH de 24 horas, y el segundo flujo promedio aludió a un total de $0,48 \text{ m}^3/\text{d}$ ($480 \text{ L}/\text{d}$) para un TRH de 10 horas.

Explicando lo anterior, las ecuaciones descritas tienen como factor el caudal de salida del sistema, por lo tanto, al regularse la llave de salida de agua de la zona de HC a un mayor caudal (TRH de 10 horas del biofiltro), mayor será la cantidad de porción de líquido la cual puede entrar a tratamiento. Esto no significa que la calidad de tratamiento posea la misma calidad entre los dos periodos mencionados, debido que a medida que el agua residual tiene un menor tiempo de contacto con el “biofilm” formado en arenas y gravas, junto a las raíces de las plantas macrófitas, los procesos de nitrificación y desnitrificación pueden verse afectados negativamente (Vidal y Hormazábal, 2018).

Se mantuvo la forma estructural abordada en el modelo inicial, la cual consistía en un armazón metálico en forma de L, con la finalidad de propiciar flujos gravitacionales entre los estanques inicial y final. Al mantener estos flujos gravitacionales mencionados, se logró reducir el consumo eléctrico requerido por el sistema de tratamiento, limitándose este consumo de energía solamente al sistema propulsor auxiliar de agua, y a la electrobomba para riego u otras finalidades. Esta última se activa automáticamente, una vez que se abre la llave de paso del efluente de agua gris tratada.

El modelo final contempló entonces, dos humedales depuradores para el tratamiento de 1-2 descargas diarias (según TRH) de agua gris proveniente de una lavadora de 13 kg. En caso de conectarse a una lavadora de menor capacidad, las descargas diarias varían en función del consumo hídrico del mueble de línea blanca. El diseño final se muestra en la Figura 12.

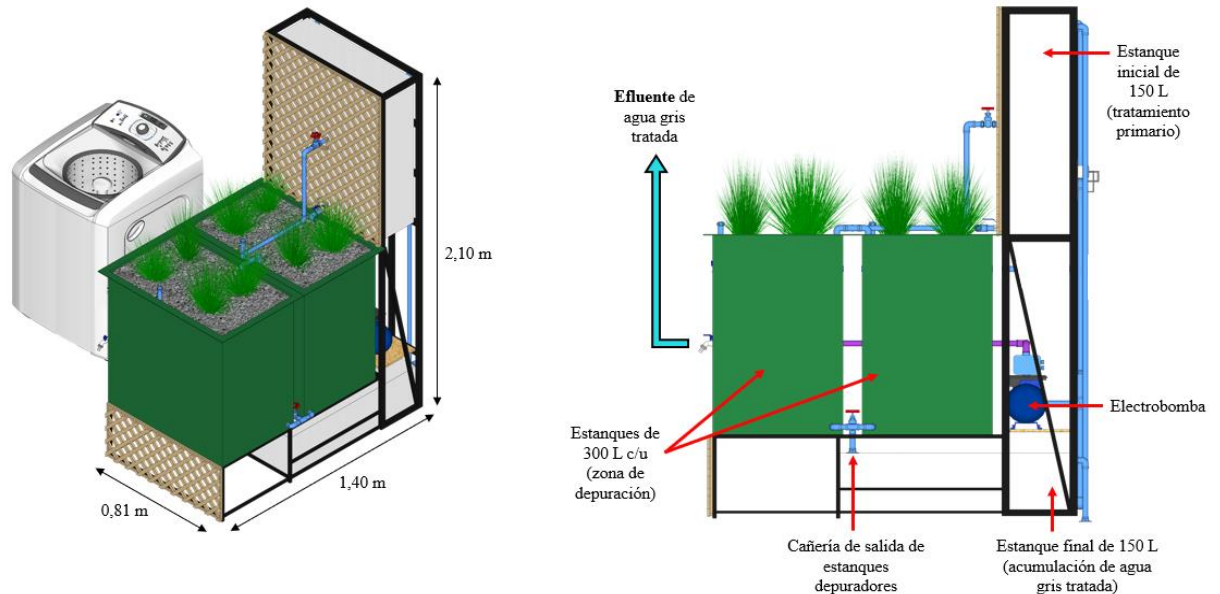


Figura 12. Representación visual en 3D del modelo, junto a una representación esquemática en 2D de la vista lateral del prototipo.

El flujo de una descarga de agua gris se dividió en dos partes antes de su entrada a tratamiento biológico, mediante la utilización de cañerías de PVC, para que cada estanque recibiera un máximo de 85 L por descarga. Se diseñó una cañería de salida que unió a los dos estanques verdes en las zonas inferiores de estos, para enviar el flujo de agua depurada hacia el estanque de acumulación final (ver representación esquemática en 2D en la Figura 12). Se añadió una válvula a la unión de las cañerías de salida anteriormente mencionadas, con el fin de poderse ajustar el TRH de los dos humedales construidos con la utilización de dicha válvula.

Se mantuvo la modularidad del prototipo al momento de realizarse el rediseño de este, ya que, es este factor el que le otorgó una cualidad innovadora al sistema de tratamiento de aguas grises. El sistema en su totalidad constó entonces de seis módulos: un estanque de tratamiento primario, zona de depuración biológica (zona de HC), estanque de acumulación de agua tratada, estructura metálica, una electrobomba y el sistema auxiliar de propulsión de agua. Todos los módulos del sistema poseen movilidad alguna, lo que resulta en un prototipo que puede ser retirado en caso de fallas o inconvenientes. Los estanques inicial y final fueron identificados como los elementos con mayor facilidad de movilidad. Son estos estanques los que pueden retirarse con más simpleza, en caso de necesitarse un arreglo o cambio de algún componente del prototipo (ver figura 13).

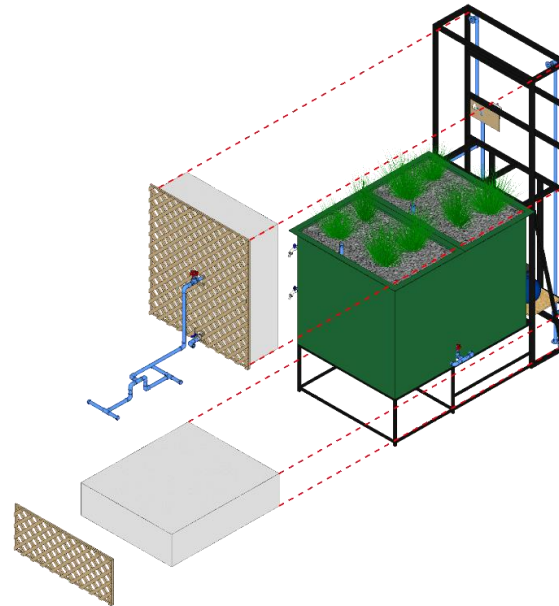


Figura 13. Representación visual en 3D de la movilidad del estanque de tratamiento primario y del estanque de acumulación final.

La zona de depuración biológica del agua se expone en la Figura 14, en donde se pueden apreciar las capas sedimentarias del biofiltro, flujo de entrada desde fase de tratamiento primario, flujo de salida del agua tratada hacia el estanque de acumulación, y plantas macrófitas.

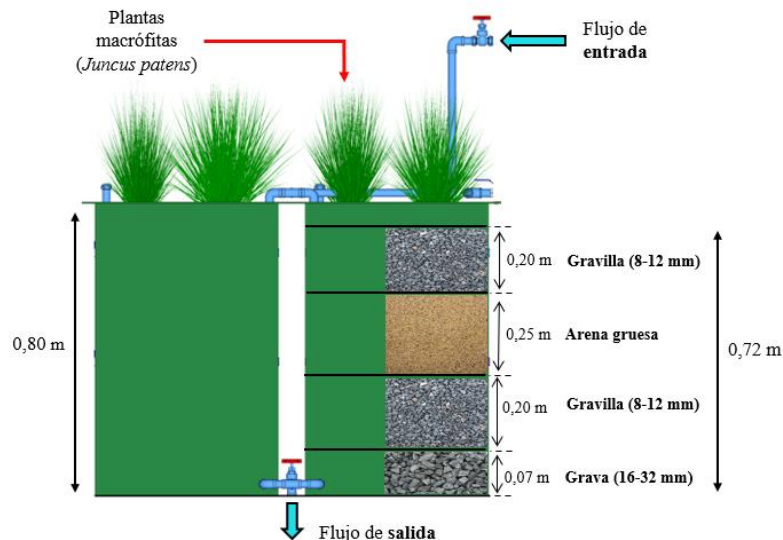


Figura 14. Representación esquemática en 2D de la zona de depuración biológica del agua gris.

Al transformarse la zona de depuración biológica, también tuvo que rectificarse el sistema de tuberías de dicha área. Se diseñaron las tuberías de drenaje de agua con alineación paralela (Vidal y Hormazábal, 2018), de manera que cubrieran la mayor cantidad de área en la zona más baja de cada HC. Se modeló una tubería de aireación conectada al sistema de drenaje por cada estanque, siguiendo los lineamientos daneses de diseño de un HC de flujo vertical (Brix y Arias, 2005). Al conectarse una tubería de ventilación al sistema de drenaje, se puede contribuir con oxigenación para la formación de zonas aerobias dentro del biofiltro (Tilley *et al.*, 2018). Las tuberías de distribución de agua gris se ordenaron de forma idéntica en cada estanque, de tal manera que se separara en dos partes equitativas la entrada de agua proveniente de la fase de tratamiento primario. El diseño del sistema de cañerías se presenta en la Figura 15.

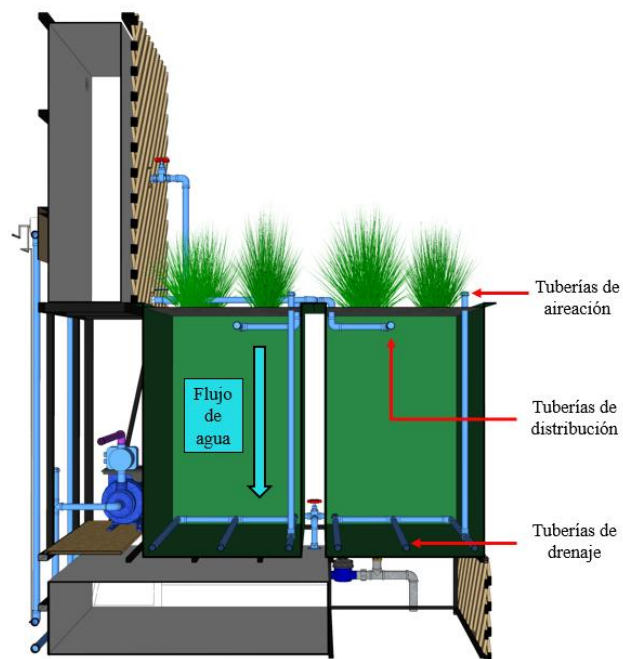


Figura 15. Representación esquemática en 3D de la vista lateral del prototipo, con énfasis en la zona de depuración biológica de agua.

Las rectificaciones de diseño mencionadas anteriormente incurrieron en un alargue a la base de la estructura metálica, de la cual se apoyan los estanques verdes de polietileno. Se extendió la base de la estructura metálica un aproximado de 48 cm, para poder alcanzar un largo de 140 cm. Se procedió a efectuar la reconstrucción de la estructura (soporte general) en el taller de prototipado, para que, de esta manera se pudiera apoyar la nueva zona de tratamiento biológico propuesta (ver Figura 16).



Figura 16. Reconstrucción de la estructura metálica, y adición de estanques para tratamiento biológico.

En conjunto al alargue de la estructura para soporte, se fabricaron dos soportes metálicos para cada estanque verde. Estas estructuras fueron construidas de manera posterior a una prueba hidráulica de llenado de estanques que se realizó, en donde se vislumbró una deformación de las paredes de polietileno por efecto de la columna de líquido. Una vez construidos e instalados los soportes, se efectuó la prueba de llenado nuevamente como se aprecia en el Apéndice I.

Se construyó el sistema de drenaje y aireación como se expone en el Apéndice II. Se emplearon cañerías hidráulicas de PVC de $\frac{3}{4}$ ". Se le hicieron agujeros del diámetro de un clavo a las cañerías de recolección situadas en la base de los estanques, siendo este el modo de drenaje del agua que posteriormente sería acopiada en el estanque de acumulación final.

Las modificaciones al estanque de acumulación inicial de agua, para transformarlo en un estanque de tratamiento primario, fueron realizadas en terreno durante el proceso de implementación. De igual modo, el sistema de propulsión auxiliar de agua fue añadido durante la fase de instalación del prototipo.

Objetivo específico 2. Implementar el prototipo en el antejardín de una casa, junto a un acompañamiento y capacitación a la familia en el correcto uso del sistema

Selección de una vivienda dentro del lugar de estudio

La vivienda escogida presentó las mejores aptitudes técnicas para la instalación del sistema en el antejardín, con una mayor cercanía de la lavadora (capacidad de 13 kg) hacia esta última zona mencionada, y en conjunto a otros aspectos técnicos positivos (techo para la protección de plantas frente a heladas, zona de jardín sellada con reja). Además, el hogar expuso la característica de ser unifamiliar, lo cual facilitó las instancias de acercamiento, instalación y posterior acompañamiento y capacitación.

Se reconoció una actitud positiva y de aprendizaje proveniente del grupo familiar residente del hogar, en cuanto a la instalación de un sistema de reutilización de aguas grises para fines de riego de jardines no comestibles, y otros fines no potables. Se verificaron diversas medidas dentro de la vivienda, como de extensiones eléctricas, extensiones desde el desagüe de la lavadora hacia el sistema de tratamiento y medidas de las posibles zonas del antejardín para hacer efectiva la implementación del prototipo.

Implementación del prototipo en la vivienda seleccionada

Se comenzó el proceso de instalación con la extensión y habilitación de cableados eléctricos para el funcionamiento de los sistemas de propulsión de agua. Una vez con energía disponible se armó, instaló y probó el funcionamiento del aparato auxiliar de propulsión de agua y la electrobomba para la salida de agua gris tratada (ver Figura 17).



Figura 17. Instalación de sistemas de propulsión de agua.

El aparato auxiliar de propulsión de agua se conectó a la lavadora mediante un tendido eléctrico al contactor de 18 A. Se utilizaron mangueras corrugadas de 1" para el flujo hídrico desde el efluente de la lavadora, hacia el sistema auxiliar de propulsión, y posteriormente hacia el estanque de tratamiento primario. Para la salida de agua desde la electrobomba hacia la válvula del efluente de agua tratada del prototipo (válvula de metal de 3/4"), se utilizaron

cañerías de PPR de $\frac{3}{4}$ " , polímero termoplástico el cual posee una mayor resistencia y durabilidad en comparación al PVC (Ampersand, 2022). Se diferenciaron de color las cañerías de salida de agua gris del sistema (color gris), con respecto a las cañerías de salida de agua potable en el antejardín (color cobre). Se usó el tipo de material mencionado (PPR) a causa de la presión de salida que ejerce la electrobomba. La conexión de tuberías desde el estanque de acumulación final hasta la electrobomba, fue realizada con cañerías hidráulicas de PVC de 1".

Con los sistemas de propulsión de agua ya implementados, se procedió a instalar los sistemas de rebalse de agua (ver Figura 18). Se instaló el sistema de rebalse N°1 en el estanque de tratamiento primario, y el sistema de rebalse N°2 en el estanque de acumulación final de agua. Estos sistemas de salida de agua se confeccionaron con coplas y uniones de PVC en conjunto a mangueras corrugadas de 1". Se conectaron las dos mangueras de salida de agua a la zona de alcantarillado de la casa, para el envío de líquidos de rebalse hacia dicha área.

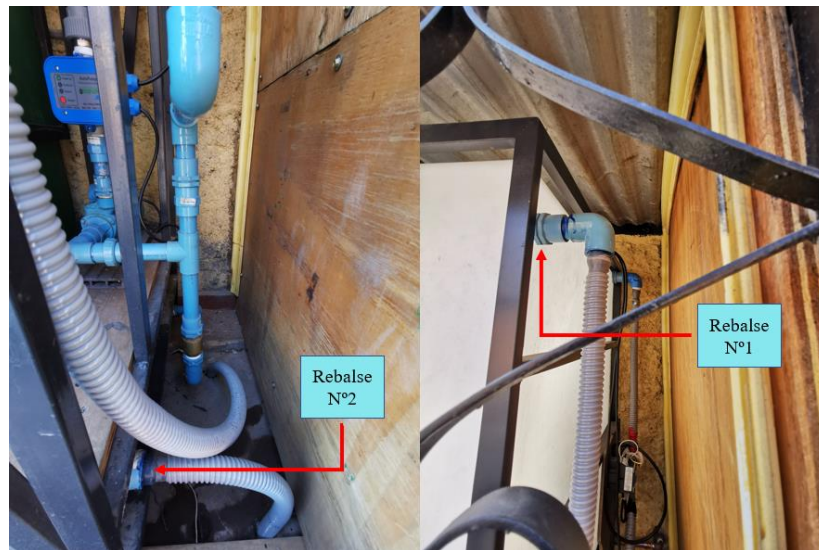


Figura 18. Instalación de sistemas de rebalse de estanques.

Posteriormente, se efectuó un cambio de techo en la zona superior del prototipo como se aprecia en la Figura 19. Se retiró una plancha de techo metálico de aproximadamente 90x90 cm, siendo agregada una plancha de policarbonato en esta zona, para que la entrada de radiación solar a la zona de HC pudiera hacerse efectiva. Los humedales depuradores actúan como sistemas de tratamiento con potenciamiento solar, necesitando estos la mayor cantidad de radiación solar diurna para una maximización de su funcionamiento (Scholz y Lee, 2005).



Figura 19. Cambio de material de la cubierta del antejardín.

Se prosiguió con el llenado de los estanques verdes para el proceso de tratamiento biológico de agua, con capas de sedimento correspondientes a: grava de 16-32 mm, gravilla de 8-12 mm y arena gruesa (ver Figura 20). Se utilizó una razón aproximada de 2:1 con respecto a la utilización de gravas (grava media y gravilla) y arena gruesa en cada humedal.

Se instalaron dos barras metálicas en la zona de tratamiento primario del prototipo. Estas barras metálicas se atornillaron y se dispusieron de forma horizontal, para la contención del estanque de tratamiento primario de agua en la zona superior del modelo. Junto a lo anterior, se añadió la válvula de limpieza de dicho estanque (válvula de PVC de $\frac{3}{4}$ ") y la válvula de salida de agua hacia la zona de depuración biológica (válvula de PVC de 1") (ver Figura 20).

Se agregaron las cañerías de salida de cada HC (tuberías de PVC de $\frac{3}{4}$ "), tubos que se conectaron con una unión T de PVC a una válvula de regulación metálica (válvula de regulación del TRH expuesta en la Figura 20). Desde la válvula metálica se conectó una manguera flexible hacia el estanque de acumulación final, para que de esta manera se pudiera utilizar dicha manguera para la regulación del caudal de salida de los estanques depuradores (ver Apéndice III). La regulación de caudal mencionada se llevó a cabo en base a un tiempo en específico, aludiendo a la regulación del TRH para la zona de tratamiento biológico.



Figura 20. Llenado de humedales construidos con sedimento, adición de soportes y válvulas.

Una vez completado el proceso de llenado de estanques y terminaciones de la fase de tratamiento primario, se prosiguió a realizar pruebas de funcionamiento hidráulico de manera previa al plantado de especies vegetales en el medio. Se continuó entonces con la fase de plantado de ejemplares de la especie *Juncus patens*. El área total compuesta por los dos humedales construidos fue de 0.8 m², por lo cual se decidió plantar 4 ejemplares por cada estanque, según los planteamientos elaborados por Sandri y Reis (2021) (ver Figura 21).



Figura 21. Plantado de humedales, junto a la adición de cañerías de distribución y “treillages” de madera.

Posteriormente, se adicionó el sistema de cañerías de distribución. Este sistema se conectó desde la válvula de salida de tratamiento primario hacia cada HC como se muestra en la

Figura 21. Una vez instalado este circuito de cañerías, se cubrieron las zonas superiores a estas con una capa de 3-4 cm de gravilla. Lo anterior se realizó para que no existiera la posibilidad de manipulación del agua gris antes de su entrada a tratamiento biológico, manteniéndose la técnica de aplicación de escurrimiento subsuperficial en todo momento.

Con las terminaciones técnicas realizadas, se añadieron los “treillages” de madera al sistema de tratamiento para entregarle un fin estético de jardín. La terminación visual y estética del prototipo tuvo gran incidencia al momento de efectuarse el diseño del modelo. Se intentó mantener una estética no disruptiva con la armonía visual del antejardín de la casa, empleándose una madera con tonalidad similar a las paredes del exterior de la casa, como también, estanques de color verde. Una de las integrantes de la familia de la vivienda llevó a cabo el barnizado de los “treillages” de madera, integrándose a la etapa final de la implementación del prototipo en su hogar.

Se finalizó la instalación efectiva del prototipo el 1 de junio, probándose en ese momento el funcionamiento del sistema completo al activarse un lavado con carga máxima proveniente de la lavadora, con el fin de verificarse la correcta puesta en marcha (ver Figura 22).



Figura 22. Presentación del prototipo una vez finalizada su correcta implementación.

Acompañamiento y capacitación a la familia en el correcto uso del sistema de tratamiento

Durante el proceso de acompañamiento y capacitación la familia se procuró mantener una actitud comunicativa en todo momento, con disposición completa a la ayuda. La

transparencia con la información entregada fue uno de los puntos clave que ayudó a mantener y cultivar la relación con el grupo familiar. Se mantuvo comunicación directa con una de las integrantes adultas, persona la cual fue receptora del proyecto en un inicio. De igual manera, se logró hacer contacto con todas las personas que residen en la vivienda, denotándose un constante interés en el aprendizaje sobre el actuar del sistema de tratamiento desde el comienzo de su funcionamiento.

La vivienda se compuso entonces por un grupo unifamiliar, el cual se constituyó por dos adultos junto a sus dos hijas. La capacitación tuvo mayor enfoque en los dos adultos del hogar, sin dejar de lado diversas instancias explicativas hacia las residentes menores de edad, en donde se abordaron características del sistema, como también las debidas utilizaciones en fines exclusivamente no potables del agua gris tratada.

Al finalizar la instalación efectiva del prototipo se instruyó a los adultos sobre los diferentes usos del sistema, enfatizándose siempre en la importancia del traspaso de información a los otros habitantes del hogar. Se comenzó por exponer todos los módulos del prototipo, en conjunto a los funcionamientos de cada uno. Se capacitó en los correctos usos del agua gris tratada, utilizándose siempre en irrigación de jardines no comestibles y en fines no potables dentro del domicilio.

Se enseñó el método de limpieza del estanque de tratamiento primario, el cual consistió en la abertura de la válvula de limpieza con una posterior conexión de una manguera corrugada hacia el alcantarillado (manguera perteneciente al sistema de rebalse N°1). Se instruyó también el método de vaciado del estanque de acumulación final. Se indicaron las cantidades de descargas que podrían efectuarse diariamente según el TRH ajustado, cantidades referidas a dos descargas diarias para el TRH de 10 h, y una descarga diaria para el TRH de 24 h.

La adición de una tapa movable al estanque de acumulación final entregó una solución de limpieza de fácil ejecución para la familia (situación explicada con más detalle en la siguiente sección). Se enseñó sobre la puesta en práctica de una correcta limpieza a este módulo, mencionándose que esta acción debería ser realizada cada 2-3 meses. Se enfatizó en la importancia de realizar este lavado, con el objeto de remover cualquier sedimento decantado en el fondo del estanque que pudiera contribuir a la proliferación de microorganismos en el agua gris tratada.

Existieron instancias en donde alumnos/as de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo fueron a la vivienda en mención, para llevar a cabo encuestas de satisfacción sobre la implementación del sistema de tratamiento, para efectos de trabajos semestrales relacionados al presente proyecto (ver Figura 23).



Figura 23. Encuesta de satisfacción hacia una integrante de la familia, propiciada por un estudiante de la carrera de Diseño Industrial de la Universidad de Chile.

Se observó una positiva recepción del prototipo entre el grupo familiar residente del hogar, siendo estas personas las que aportaron con tiempo y energía para que la instalación del sistema se hiciera realidad. Durante el periodo de trabajo en su hogar, la familia realizaba invitaciones para almorzar dentro de su espacio común. Es fundamental destacar la buena actitud que sostuvo la familia en relación al proyecto, ya que fueron ellos los que debieron modificar ciertos hábitos en función de un sistema de tratamiento nunca probado con anterioridad. Por otra parte, la comunidad aledaña presentó también un interés en el prototipo. En recurrentes ocasiones durante la fase de monitoreo y toma de muestras, se acercaron vecinos/as del sector con preguntas del funcionamiento del sistema, y por sobre todo, con la duda de como adquirir uno de las mismas características.

Objetivo específico 3. Analizar el desempeño del sistema de tratamiento bajo dos TRH, con relación a temperaturas ambientales

Funcionamiento y operación del sistema de tratamiento

El sistema modular de tratamiento comenzó su funcionamiento el primer día del mes de junio del 2022. Durante el transcurso del año se realizaron visitas al lugar de estudio para el análisis cualitativo del estado y accionar del prototipo. Además, se llevó a efecto la medición de la

calidad del agua del afluente y efluente del sistema, ajustes de caudales, limpieza de módulos y adición de elementos en base a resultados observados.

El afluente de agua gris del prototipo correspondió a lavados de ropa y otros conjuntos, desde la lavadora. Se utilizaron detergentes y suavizantes convencionales que se encuentran en el mercado nacional, sin cambiarse el estilo de vida de los habitantes del hogar en materia de utilización de productos. Solo se instó a modificar las repeticiones y horarios de lavado, según los ajustes de caudal que fueron efectuándose.

El efluente de agua gris tratada fue utilizado para riego de jardines no comestibles, y otros usos de carácter no potable comprendidos dentro del domicilio (lavado del piso de antejardín). El método de irrigación fue mediante una manguera de riego conectada a la válvula del efluente del prototipo, salida de agua que incurrió en una conexión con cañerías de color gris, a diferencia de las cañerías de agua potable de la casa.

Se observó un correcto funcionamiento relacionado a todo el sistema eléctrico instalado, desde cableados hasta las bombas de propulsión de agua. Al igual que los sistemas eléctricos, se identificó un óptimo funcionamiento en los flujos de agua dentro del sistema, a excepción de la zona de HC, la cual presentó detalles menores de comportamiento con relación al TRH de 24 h. No existieron eventos ligados a fugas de agua en las conexiones con mangueras o tuberías instaladas, ni tampoco fallas disruptivas (corte de funcionamiento) en los módulos de tratamiento primario o tratamiento biológico del agua residual.

En relación a la característica estructural del prototipo, no se observaron fallas en ninguna de las zonas del modelo. La estructura general en forma de L presentó el comportamiento esperado en mención a su objetivo de soporte general de todos los estanques. Las contenciones metálicas añadidas a cada estanque depurador tuvieron también, un óptimo desempeño.

Después de dos meses de funcionamiento del sistema de tratamiento se observó una acumulación de material sólido (tejidos de ropa, papel, entre otros) proveniente de la lavadora, en la zona sedimentaria superior de cada HC.

A raíz del evento anteriormente mencionado, se procedió a añadir un sifón al sistema de cañerías localizadas entre la llave de salida del estanque de tratamiento primario y el sistema de cañerías de distribución de aguas (ver Figura 24). El sifón pasó a incorporar la fase de tratamiento primario del agua gris, en conjunto al estanque decantador de sólidos. Con la adición del elemento mencionado se intentó lograr la acumulación de una fracción de sólidos que no decantaron durante su recorrido por el estanque decantador de sólidos. Se le realizó una limpieza al sifón cada dos semanas, desde su instalación en el mes de agosto, por parte del estudiante a cargo del proyecto. Durante las visitas de monitoreo del funcionamiento del sistema, se capacitó a los integrantes de la vivienda para la realización de la debida limpieza al sifón.



Figura 24. Adición de sifón a la fase de tratamiento primario del sistema.

El estado de funcionamiento de la zona de depuración biológica del agua se ejecutó mediante una minuciosa observación cualitativa. No se percibieron olores pestilentes en el entorno cercano a los estanques depuradores, de igual manera, no se observó la presencia de mosquitos en esta zona.

Los individuos macrófitos de la especie *Juncus patens* presentaron una notoria aceptabilidad del medio en donde fueron plantados, además, se vislumbró un positivo y vigoroso desarrollo en la zona aérea de las plantas (ver Figura 25). Según Vidal y Hormazábal (2018) las plantas macrófitas en humedales construidos juegan roles vinculados al alojamiento de microorganismos, efectos físicos, consumo de nutrientes, evapotranspiración, acondicionamiento de microclima y aislación térmica. Los autores denotan que un indicador para verificar el cumplimiento de los roles anteriormente descritos, es un estado saludable en el aspecto físico de las plantas.

Los 8 ejemplares evidenciaron constantes nuevos brotes en las zonas laterales de los tallos durante el curso del año, viéndose aumentada esta acción de crecimiento una vez comenzada la estación de primavera. Durante el mes de septiembre comenzaron a brotar las inflorescencias de los lados de los tallos, en las zonas altas de las plantas (ver Figura 25). El color de los ejemplares se mantuvo verde a lo largo del año, no presentándose el efecto de marchitez durante la temporada de invierno. La altura de las zonas aéreas de las plantas fue del rango de los 70-90 cm al finalizar el proceso de monitoreo.



Figura 25. Estado de la zona de tratamiento biológico después de 5 meses transcurridos desde la instalación del sistema completo.

La zona de depuración biológica de flujo vertical con escurrimiento subsuperficial, operó bajo el método de saturación parcial. Se aplicó a los dos estanques depuradores (superficie total de $0,8 \text{ m}^2$), una tasa de carga hidráulica total de $0,213 \text{ m/h}$ al efectuarse un lavado con el nivel máximo de potencia de la lavadora (170 L). La tasa de carga hidráulica que ingresó a la zona de depuración con un lavado de mínima potencia (120 L) fue de $0,15 \text{ m/h}$.

Los sistemas de HC de flujo vertical con alimentación intermitente poseen una falta de condiciones anaeróbicas dentro del biofiltro, lo cual esclarece una desventaja con respecto a la eliminación del nitrógeno total debido a una falta del proceso de desnitrificación. Al utilizarse el método de saturación parcial, se puede combinar un desarrollo de regiones aeróbicas y anaeróbicas dentro del sustrato poroso, añadiéndose además una mayor cantidad de carbono orgánico disponible. De esta manera, se puede fomentar una mayor desnitrificación dentro del HC (Saeed y Sun, 2017).

Con respecto al funcionamiento hidrológico de la zona de HC, se observó una correcta operación ligada al flujo de agua que se sometió a tratamiento con un TRH de 10 h , desde inicio a fin del monitoreo del sistema. No se avistaron problemas de rebases de agua con el tiempo de retención mencionado. Resultaron posible las dos utilizaciones de lavadora (con cualquier nivel de lavado) al día con el TRH en mención, siempre y cuando se mantuviesen las 10 horas de separación entre cada lavado. Con la utilización de este tiempo de tratamiento del agua dentro del medio, fue posible lograr el principio de saturación parcial del lecho filtrante ($60\text{-}80\%$ del volumen total del medio).

Con respecto a la operación del sistema con un TRH de 24 h, se identificaron detalles en el comportamiento del flujo de agua en la zona de HC después de 3-4 meses desde el inicio de funcionamiento. Durante el periodo primaveral de actividad con el TRH aludido, se avistó que con la utilización del nivel máximo de lavado (170 L) la columna de agua sobrepasó en ocasiones entre 2-4 cm, al nivel superficial de la zona sedimentaria de cada estanque depurador. El 10% de cada estanque de tratamiento biológico fue dejado como zona para previsión de rebalses, resultando ser una característica sumamente efectiva para la contención de descargas con el nivel máximo de agua. El principio de saturación parcial del medio filtrante se pudo lograr con lavados correspondientes a niveles bajos, medios y medio altos del consumo de agua proveniente de la lavadora, para el TRH de 24 h.

En base al comportamiento descrito con anterioridad, se tienen dos presuntos supuestos que podrían originar esta situación. El primer supuesto es explicado por una observación de grandes porciones de arena fina dentro de los sacos de arena gruesa que fueron comprados a un distribuidor local de áridos en la ciudad. Como menciona Hoffmann *et al.* (2011), no se recomienda construir el lecho filtrante activo del humedal con diferentes tamaños granulométricos de arena, debiéndose utilizar siempre arena gruesa con un diámetro efectivo cercano a los 8 D_{10} mm. Dicha recomendación alude a posibles malos desempeños en el flujo de humedales subsuperficiales en el caso que se utilicen arenas más finas en el medio activo. Se debe tener un cauteloso cuidado al momento de adquirir sustratos arenosos para un HC, y sobre todo si es que se trabaja con volúmenes totales acotados para el tratamiento biológico del agua.

Un segundo supuesto tiene relación con la condición de algún grado de taponamiento del medio poroso, por la acción de una acumulación de sólidos entre los poros de este tipo de sustrato. Esta obstrucción del medio filtrante (sobre todo en arenas) puede verse ocasionada debido a una alta carga de sólidos suspendidos y tejidos en el agua gris que no decantaron correctamente en la fase de tratamiento primario del agua (UN-HABITAT, 2008; Hoffmann, 2011; Vidal y Hormazábal, 2018).

Resulta indispensable entonces la realización de un criticismo constructivo a la fase de tratamiento primario del agua, la cual estuvo compuesta por un estanque decantador en un inicio, siendo agregado un sifón después de 2 meses desde el comienzo de funcionamiento del sistema. Como mejora al módulo de tratamiento primario, y para un futuro rediseño del modelo propuesto en este trabajo, se debería agregar y conectar un segundo estanque sellado de 150 L al ya existente, añadiéndose también un circuito de cañerías interiores, con la finalidad de recrear un tanque séptico de doble cámara.

La segunda semana del mes de noviembre de 2022, se decidió hacer una abertura circular de 9 cm de diámetro a la zona superior del estanque de acumulación final de agua gris tratada, con la finalidad de agregar una tapa movable para la limpieza de este módulo (ver Apéndice IV). El origen de la adición de este elemento al estanque de acumulación, fue debido a que se reconocieron alzas en los parámetros de turbiedad y coliformes fecales en las muestras de efluentes recolectadas en el periodo primaveral, en comparación al periodo invernal.

Además, se reconoció un incremento sustancial en los olores de las muestras de efluentes del periodo de primavera, en relación a muestreos anteriores.

Al abrirse el agujero de entrada al estanque en mención, se pudo observar una acumulación de una capa de material sólido decantado en el fondo de este estanque. Se procedió a realizar un lavado al módulo con la ayuda de una manguera con salida de agua a presión, y una escobilla nueva, de manera de retirar todo tipo de sedimento existente en la zona baja del estanque.

En el diseño final del modelo se había previsto la posibilidad de retirar el estanque de acumulación final para su limpieza, lineamiento el cual le añade un grado de modularidad al prototipo. Se intentó realizar la acción mencionada, sin embargo, no se logró debido a complicaciones de acceso a la zona trasera. Existió la posibilidad de cortar una pequeña fracción de la reja del antejardín para acceder al espacio trasero del prototipo, solución que se había pensado como de reparación para alguna de las bombas de agua, no obstante, se consiguió añadir una tapa para limpieza sin problemas desde la zona externa a la reja.

Caracterización fisicoquímica y microbiológica del afluente del sistema

Las prácticas que se realizan en torno al consumo del agua definen la cantidad y calidad del agua gris generada, siendo estas acciones dependientes de diferentes estilos de vida y costumbres, número y edad de habitantes, factores climáticos y la disponibilidad de recursos (Shaikh y Ahammed, 2020). La cantidad de agua gris que se genera en un domicilio es cercana a un 50-80% del total del agua residual producida dentro de este. Se estima que alrededor de un 47% del agua gris generada dentro de una vivienda se origina desde lavamanos y duchas, un 27% desde lavaplatos y lavavajillas, y el 26% restante procede de lavandería (lavatorios y lavadoras) (Albalawneh y Chang, 2015).

Es común encontrar en flujos de agua gris, altas cargas de materiales orgánicos que se pueden biodegradar fácilmente junto a constituyentes básicos derivados de productos comúnmente usados en hogares, destacándose nutrientes como el fósforo y sus derivados, y el nitrato y sus derivados. En particular, los efluentes de aguas grises de lavanderías domiciliarias pueden contener químicos de detergentes, aceites, cloro, solventes, pintura, agua caliente y fibras de ropa. Resulta común encontrar bacterias y virus en aguas grises provenientes de lavadoras debido a la presencia de ropas con residuos sólidos de distintas procedencias (Shaikh y Ahammed, 2020).

El Cuadro 3 expone una caracterización fisicoquímica y microbiológica del afluente de agua gris del sistema de tratamiento. En el cuadro se muestran las mediciones correspondientes al periodo invernal (1', 2' y 3') y primaveral (4', 5' y 6').

Cuadro 3. Caracterización fisicoquímica y microbiológica del afluente de agua gris del sistema de tratamiento.

Parámetro	Unidad	Número de medición					
		1'	2'	3'	4'	5'	6'
DQO	mg/L	447	372	955	525	230	624
SST	mg/L	33,3	33,3	73,3	91	100	30
Turbiedad	UNT	78	48	70	111	54	50
CE	mS/cm	2,36	2,01	2,11	1,8	1,43	2,93
pH	unidad	7,8	7,7	7,5	7,5	7,5	9,7
NT	mg/L	NR	5,74	10,6	22,3	5,57	NR
NTK	mg/L	NR	5,23	9,61	21	4,95	NR
PT	mg/L	NR	NR	0,85	0,645	ND	NR
CF	NMP/100mL	3500	200	70	35000	1300	20

ND: No detectado

NR: No realizado

El parámetro de DQO se entiende como la cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar la materia orgánica en el agua, mediante medios químicos (oxidación) para posteriormente ser convertida en H₂O y CO₂. Según lo mostrado en el Cuadro 3, la DQO se encontró dentro de un rango de 230–955 mg/L, con una media de 526 mg/L. Según un estudio realizado por Shaikh y Ahammed (2020) en donde comparan características y variabilidades de aguas grises domésticas generadas en diferentes países alrededor del mundo, el rango de DQO originado en lavanderías (lavatorios y lavadoras) es de 58-4155 mg/L con una media de 1100 mg/L. Los valores obtenidos para el efluente de la lavadora del presente estudio se encuentran dentro del rango propuesto por los autores mencionados, y estando todos debajo de la media mencionada. Se denota que los efluentes de lavanderías son más ricos en componentes orgánicos en comparación con baños y lavamanos, los cuales presentan valores medios de DQO de 268 y 316 mg/L respectivamente.

Los Sólidos Suspendidos Totales (SST) están asociados con los constituyentes físicos presentes en aguas residuales, y se refieren a las partículas sólidas que se mantienen en suspensión en estas aguas y que son retenidas por filtros de 2 µm (Baird y Bridgewater, 2017). Los SST observados en el Cuadro 3 se distribuyeron en un rango de 33,3-100 mg/L, con una media de 60,1 mg/L. Según Oteng-Peprah *et al.* (2018), los SST en aguas grises varían entre 190 y 537 mg/L, rango el cual se encuentra por sobre los valores encontrados en el presente estudio. De igual manera, la concentración media de SST encontrada en aguas grises provenientes de lavanderías propuesta por Shaikh y Ahammed (2020), corresponde a 202 mg/L, la cual está por sobre cualquier valor encontrado en el Cuadro 3.

La turbiedad representa una expresión de la propiedad óptica que causa que la luz se disperse y absorba en el líquido, en vez de ser transmitida a través de este. Este parámetro físico del agua es causado por la presencia de materia suspendida y coloidal, y es medido en Unidades Nefelométricas de Turbidez (UNT) (Baird y Bridgewater, 2017). Se observó un rango de

turbiedad en el afluente del prototipo referente a 48-111 UNT, con un valor medio de 69 UNT. Los autores Oteng-Peprah *et al.* (2018) sugieren un rango de turbiedad de 19-444 UNT para aguas grises domésticas, el cual se asimila a los valores de este parámetro encontrados por Shaikh y Ahammed (2020) para aguas grises originadas en lavanderías (34-510 UNT). Todos los valores de turbiedad encontrados en el afluente del prototipo se posicionan dentro de los rangos mencionados para aguas grises.

La CE es un parámetro correspondiente a los constituyentes físicos de las aguas grises, y es una medida de la capacidad del agua de traspasar una corriente eléctrica a través de iones disueltos (Baird y Bridgewater, 2017). La unidad utilizada para medir la CE en este estudio fue mS/cm (mili siemens por centímetro). El rango de la CE varió desde los 1,43 a 2,93 mS/cm, con una media de 2,11 mS/cm. Los investigadores Oteng-Peprah *et al.* (2018) determinaron que el rango común de este parámetro registrado en aguas grises domésticas varía entre 0,041 a 3 mS/cm. Se observa que todos los valores de CE registrados en el afluente del prototipo en estudio, se encuentran dentro del intervalo mencionado por los autores.

El pH se expresa como un compuesto químico, y es la concentración de iones de hidrógeno en una disolución. Se utiliza este parámetro con un rango de 0-14 (unidades) y como medida de acidez o alcalinidad de una solución acuosa (Delgadillo *et al.*, 2010).

Se encontró que el pH proveniente del efluente de la lavadora osciló entre rangos de 7,5 a 9,7, con una media de 8. Durante las cinco primeras mediciones (138 días transcurridos desde la entrada de funcionamiento del sistema) el valor de pH no superó los 7,8, no obstante, al realizarse la sexta medición se identificó un valor de pH alto, correspondiente a 9,7. Se ha denotado que los valores de aguas grises domiciliarias tienden a estar entre 5-9. Las aguas provenientes de lavandería son las que pueden presentar los pH más elevados, tendiendo a ser la fuente más alcalina dentro del hogar debido a la utilización de detergentes con surfactantes (Oteng-Peprah *et al.*, 2018). Los autores Shaikh y Ahammed (2020) aluden que el rango de pH en aguas grises provenientes de lavanderías es de 5,5-10,3, debido a la variabilidad del uso de detergentes que alcalinizan el agua, como también, de jabones de limpieza de ropa que tienden a acidificar en grandes proporciones el agua.

El Nitrógeno Total (NT) en aguas residuales se compone por nitratos, nitritos, amonio y nitrógeno orgánico. El amonio y nitrógeno orgánico se determinan en laboratorio bajo el nombre de Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK). Este último está compuesto por materiales naturales tales como los péptidos, proteínas, ácidos nucleicos, urea y diversos materiales orgánicos de caracteres sintéticos. El fósforo a su vez, se encuentra en aguas residuales en la forma de fosfatos, los que se clasifican como ortofosfatos, fosfatos condensados y fosfatos ligados orgánicamente. El Fósforo Total (PT) se divide analíticamente en tres componentes químicos: fósforo ácido-hidrolizable, reactivo y orgánico. Todas las formas de nitrógeno y fósforo en aguas grises hacen referencia a una característica química de estas (Baird y Bridgewater, 2017).

Se encontró un rango de NT de 5,57-22,3 mg/L, con una media de 11,1 mg/L. Para el NTK se observó una distribución de valores de 4,95-21 mg/L, con un promedio de 10,2 mg/L. La

medición de PT fue realizada solo para los muestreos 3', 4', y 5', en donde se detectó solamente en los muestreos 3' y 4'. La no detección puede verse ocasionada debido a nulas o muy bajas concentraciones del parámetro en estudio. El rango de PT osciló entre 0,645 a 0,85 mg/L, con una media de 0,75 mg/L. Los investigadores Shaikh y Ahammed (2020) destacan que el rango de NT encontrado generalmente en aguas grises provenientes de lavanderías es de 2,8-31 mg/L, con una concentración promedio de 10 mg/L. Asimismo, estos autores mencionan que las aguas grises de lavanderías poseen en general el mayor contenido de PT dentro de una vivienda, con un rango de 0,2-51,6 mg/L y un promedio de 11,9 mg/L. Esto último se debe al amplio uso de detergentes fosfatados en lavanderías domiciliarias distribuidas alrededor del mundo.

Se recalca que los rangos y valores medios de NT identificados en la presente caracterización se encuentran dentro de rangos y promedios recién mencionados. La concentración de NTK en general representó un valor mayor al 90% del NT en la mayoría de los casos, lo que puede verse originado por altos contenidos de amonio y aminoácidos en los productos de lavandería utilizados en la vivienda, lo que, a su vez se ve reflejado en mayores concentraciones de NT en relación a PT (Shaikh y Ahammed, 2020). Al encontrarse bajos valores de PT en la mediciones realizadas, se puede deducir que los productos de aseo de ropa usados en el hogar contienen una baja concentración de agentes fosfatados.

El parámetro de Coliformes Fecales (CF) representa un estimado de la densidad media de coliformes termo tolerantes en 100 mL de agua gris, utilizándose el método probabilístico del Número Más Probable (NMP). La bacteria principal de este grupo de microorganismos es denominada como *Escherichia coli*, de igual manera, se pueden encontrar las bacterias *Citrobacter freundii* y *Klebsiella pneumoniae* (Baird y Bridgewater, 2017).

Se observó una amplia distribución en la concentración de CF para el afluente del sistema de tratamiento, obteniéndose un rango de 20-35000 NMP/100 mL y un promedio de 6682 NMP/100 mL. Según Li *et al.* (2009), el rango de CF en aguas grises provenientes de lavanderías domiciliarias es de 50-1400 NMP/100 mL. Los autores Shaikh y Ahammed (2020) mencionan que el rango de este parámetro microbiológico encontrado en aguas grises provenientes de la fuente en mención, es de 1000-100000 NMP/100 mL. Los valores encontrados en este estudio se ajustan dentro de los rangos mencionados por los autores Li *et al.* (2009) y Shaikh y Ahammed (2020).

Se puede vislumbrar una alta variabilidad en los rangos de concentraciones de CF que se exponen en los estudios científicos anteriormente mencionados, al igual que en las concentraciones encontradas en este estudio. Esta variabilidad se puede explicar por las diversas prácticas de aseo personal que se emplean dentro de cada vivienda en particular, lo que, por consecuencia incidirá en la densidad media de coliformes termo tolerantes que se emitirán a las aguas grises de cada uno de estos hogares.

Calidad del efluente del sistema de tratamiento

En esta sección se expone uno de los ejes relacionados al análisis de desempeño del sistema de tratamiento. Se presentan gráficos con las distribuciones de concentraciones medias de cada parámetro en el afluente por periodo (invierno y primavera), en conjunto a las concentraciones del parámetro que fueron encontradas en los efluentes de cada TRH. Se presentan también, gráficos de temperaturas medias diarias correspondientes a los días en que el agua gris estuvo sometida al tratamiento provisto por el sistema modular de HC.

Las concentraciones encontradas en el efluente del sistema de tratamiento se comparan con una compilación de regulaciones vigentes, y recomendaciones de reutilización de aguas grises según diversos países (Boano *et al.*, 2020). El Anexo I expone estándares mandatorios de Gran Bretaña, EEUU, New South Wales-Australia, Japón e Italia. La tabla presenta además, recomendaciones de reutilización de países como Alemania, Eslovenia, China, India y Canadá. A la tabla presentada en el Anexo I, se añaden las concentraciones máximas exigidas para la reutilización de aguas grises en zonas urbanas según la actual iniciativa chilena regulatoria de aguas grises, la cual aún no se publica en el Diario Oficial de la República.

En el país existe la denominada Ley N° 21.075 que regula la Recolección, Reutilización y Disposición de Aguas Grises (Ley N° 21.075, 2018), pero aún espera la aprobación del Proyecto de Reglamento sobre Condiciones Sanitarias Básicas para la Reutilización de Aguas Grises (Ministerio de Salud [MINSAL], 2018). La ley actual aún no es aplicable debido a la falta de su reglamentación, lo que significa que su cumplimiento es de carácter voluntario hasta el momento (Leiva *et al.*, 2020).

Mientras el proyecto de reglamentación de aguas grises de Chile no tenga aprobación oficial, la norma que regula la calidad del agua para riego en territorio nacional es la NCh 1333 OF. 78 (NCh 1333 OF. 78, 1987). Se denota que esta norma fue elaborada en un periodo de tiempo en donde las regulaciones se imitaban a las de otros países, no considerándose las condiciones propias del territorio ni tampoco la posibilidad de ocurrencia de los contaminantes (Sancha *et al.*, 2005). Esta norma sólo exhibe el rango de pH (5,5-9), rango de salinidad, y límites de elementos químicos (metales pesados) y bacteriológicos (CF deben ser menores o iguales a 1000 NMP/100 mL) en aguas para riego.

En el Apéndice V se exponen las concentraciones de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos que fueron determinadas en el efluente del sistema de tratamiento según el número de medición, temperaturas ambientales de las 48 horas previas al muestreo y tiempos de retención hidráulicos.

Periodo de invierno. En el presente apartado se exponen los gráficos de concentraciones que se encontraron en la primera campaña de muestreo (junio-agosto), en donde fueron realizadas las mediciones 1', 2' y 3'. El muestreo 1' fue realizado el mes de junio, siendo un set de concentraciones del afluente únicamente. El muestreo correspondiente al TRH de 24 horas (medición 2') fue llevado a cabo después de 61 días desde el comienzo de funcionamiento del prototipo. La medición respectiva al TRH de 10 horas (medición 3') tuvo

efecto después de 68 días desde la puesta en marcha de este sistema. Las concentraciones medias del afluente que se exponen en los gráficos, corresponden al promedio de valores que se encontraron en las tres mediciones de la campaña de invierno.

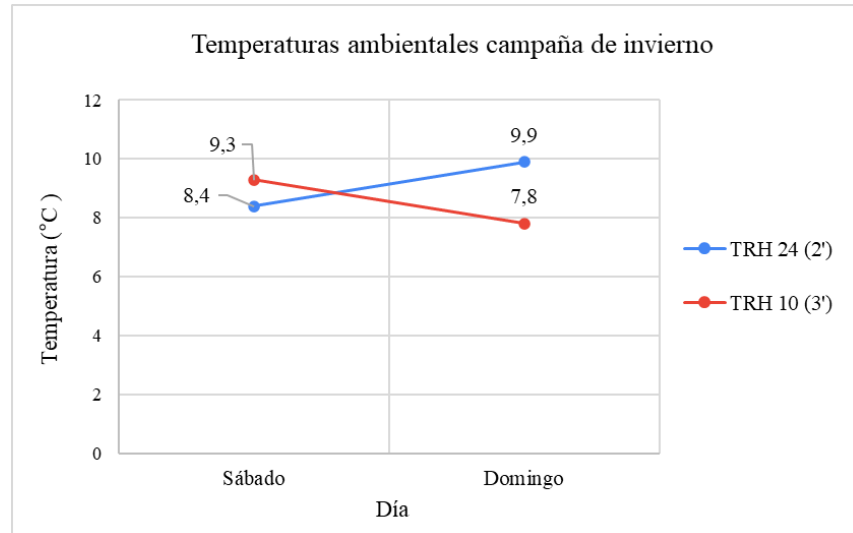


Figura 26. Temperaturas medias diarias para las 48 horas previas al día de recolección de muestras, según tiempo de retención hidráulica para el tratamiento y número de medición (periodo de invierno).

Con respecto a las temperaturas provistas por el ambiente dentro del periodo invernal de mediciones (ver Figura 26), se encontraron temperaturas medias diarias de 9,3°C y 7,8°C en los días sábado y domingo previos a la medición del efluente con un TRH 10 h (promedio de 8,6°C para los dos días). Para el muestreo correspondiente al tratamiento de agua gris con un TRH de 24 h, se observaron temperaturas medias diarias de 8,4°C y 9,9°C (sábado y domingo), con una media de 9,2°C para las 48 horas mencionadas. Es posible identificar un leve aumento de 0,6°C para el tratamiento realizado con un TRH de 24 h.

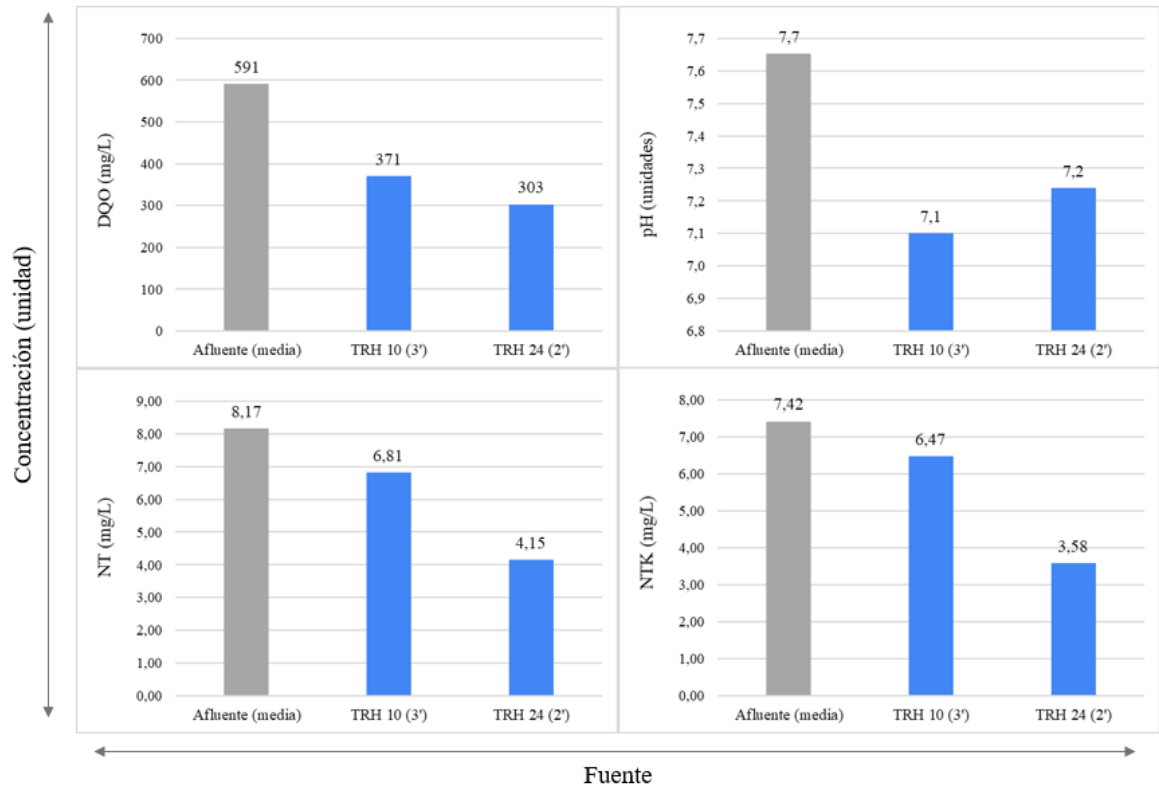


Figura 27. Concentración media del afluyente y concentraciones de parámetros químicos del efluente según TRH y número de medición (campana de invierno).

A raíz de lo observado en la Figura 27, se encontró un pH de 7,1 para el TRH de 10 h, y un pH de 7,2 para el TRH de 24 h. La media del pH en el afluyente del sistema dentro del periodo invernal fue de 7,7. Se puede destacar que los dos efluentes presentaron una mayor neutralidad con respecto al promedio de los afluentes que ingresaron al sistema. El rango óptimo de concentración de pH para la actividad microbiana y la existencia de la mayor parte de la vida biológica es de 6-9, por otra parte, el rango aceptable para la descarga al ambiente de efluentes de aguas residuales tratadas se ajusta a 6,5-8,5 (Metcalf y Eddy, 2003).

Se denota que la concentración media de pH del afluyente es favorable para la actividad biológica de microorganismos y plantas en la zona de depuración del agua gris. Las concentraciones de los dos efluentes se encuentran dentro de los rangos idóneos para su descarga al ambiente según la información entregada por Metcalf y Eddy (2003). Asimismo, los valores de pH de los dos TRH se ajustan a todos los rangos de normativas y recomendaciones para el reúso de aguas grises en irrigación, y otros fines no potables dentro de zonas urbanas, como se muestra en el Anexo I. Los valores de pH encontrados se ajustan al rango propuesto por la actual NCh 1333 OF. 78.

En el gráfico correspondiente a la DQO que se muestra en la Figura 27, se aprecia una concentración media de 591 mg/L en los afluentes que entraron a tratamiento durante el

periodo de invierno. El valor observado en el efluente con un TRH de 10 h fue de 371 mg/L. El efluente con un TRH de 24 h presentó una concentración de 303 mg/L. Es posible observar que las concentraciones de DQO en los respectivos efluentes fueron entre un 37-49% más bajas con respecto a la media de los afluentes de la estación. Cabe mencionar que ninguno de los efluentes se posiciona en límites aceptables (normativas y recomendaciones) para irrigación u otros usos urbanos presentados en el Anexo I.

Como se puede observar en los gráficos relacionados al NT y NTK en la Figura 27, se hallaron valores medios del afluente respectivos a 8,2 mg/L de NT y 7,4 mg/L de NTK. El tratamiento con un TRH de 10 h presentó concentraciones de 6,81 mg/L de NT y 6,47 mg/L de NTK. El efluente del sistema con un TRH de 24 h expuso concentraciones de 4,15 mg/L y 3,58 mg/L de NT y NTK respectivamente. No se graficaron las concentraciones de PT, ya que, se utilizó exclusivamente para la medición de un TRH de 10 h (por disponibilidad de reactivos), no siendo determinado el resultado en el efluente del sistema debido a posibles nulas o muy bajas concentraciones (ver Apéndice V).

Se denota que los valores de NT determinados en los efluentes con un TRH de 10 h y 24 h, no exceden ninguna norma ni recomendación presentada en el Anexo I, siendo estas concentraciones admisibles según normativas de reúso de aguas grises de países como Italia (límite máximo de 10 mg/L) y Japón (límite máximo de 30 mg/L). Del mismo modo, las concentraciones encontradas están dentro de rangos propuestos en lineamientos voluntarios de reutilización de aguas grises, de países como Eslovenia (límite máximo de 10 mg/L) y China (límite máximo de 20 mg/L).

Con respecto al PT, al no ser determinado en el efluente del TRH de 10 h se infiere que el agua gris tratada no contuvo el elemento (ver Apéndice V). El efluente mencionado se consideraría como adecuado para su reúso en materia de nitrógeno y fósforo, según normativas y regulaciones de Italia, Japón, Eslovenia y China. La iniciativa legislativa chilena no adopta valores máximos de NT y PT para el reúso de aguas grises tratadas.

Se distinguieron disminuciones en las concentraciones de DQO, NT y NTK, una vez que se aumentó el TRH a 24 h. Los autores Katayon *et al.* (2008) mencionan que al aumentar el TRH de un humedal construido con escurrimiento subsuperficial, de 12h a 24 h, existen cambios significativos de remoción de características químicas del agua residual (DQO, PT y nitrógeno orgánico). Es posible ver un descenso en las concentraciones expuestas en la Figura 27, no obstante, para el caso de la DQO no se lograron alcanzar límites admitidos por normativas y recomendaciones internacionales. Esto último puede verse originado por las bajas temperaturas ambientales durante los dos TRH, siendo en los dos casos menores a 9,3°C. Como mencionan Kadlec y Reddy (2001), los procesos que regulan la descomposición de materia orgánica se ven negativamente afectados por temperaturas ambientales menores a 15°C. Además, el rango óptimo de temperaturas para el proceso de fitodepuración del agua de especies del género *Juncus* es de 16°C-27°C (Vidal y Hormazábal, 2018).

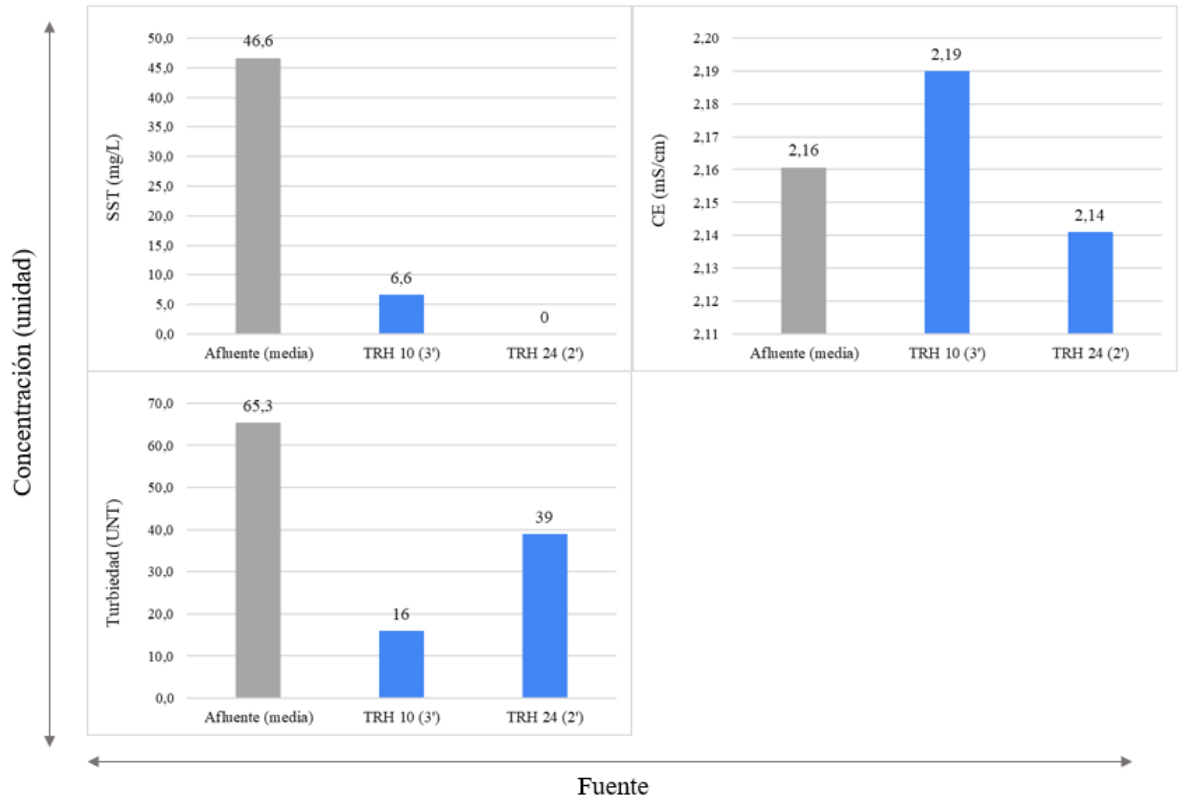


Figura 28. Concentración media del afluente y concentraciones de parámetros físicos del efluente según TRH y número de medición (campaña de invierno).

Con respecto al gráfico de SST que se puede observar en la Figura 28, se encontró que la concentración media de este tipo de sólidos en los afluentes fue de 46,6 mg/L. Las concentraciones de SST determinadas en los efluentes con tiempos de tratamiento biológico de 10 h y 24 h, fueron de 6,6 mg/L y 0 mg/L respectivamente. Cabe destacar que los humedales construidos con escurrimiento subsuperficial presentan altas eficiencias de remoción de SST (64-98%) desde los inicios de operación, ya sea en climas fríos o templados (Boano *et al.*, 2020). Los valores obtenidos para los dos TRH en el periodo de invierno se sitúan dentro de límites adecuados para el reúso de aguas grises en irrigación u otros fines no potables, concierne a normativas y recomendaciones de todas las naciones exhibidas en el Anexo I. En el caso particular de Chile, se destaca que el proyecto reglamentario de aguas grises exige un máximo de 10 mg/L de SST para uso urbano.

El gráfico de turbiedad, parámetro el cual es medido en Unidades Nefelométricas de Turbidez (UNT), se presenta en la Figura 28. Se halló una concentración media en los afluentes que ingresaron a tratamiento, de 65,3 UNT. Los valores de turbidez para los TRH de 10 h y 24 h fueron de: 16 UNT y 39 UNT. Los HC's con escurrimiento subsuperficial puede llegar a remover entre un 47-97% de la turbiedad del agua (Boano *et al.*, 2020). Es posible observar que la remoción de material coloidal provista por el actual sistema de HC no alcanzó rangos

aceptables expuestos en el Anexo I. La concentración máxima de turbiedad que permite la actual iniciativa legislativa chilena es de 5 UNT, encontrándose por debajo de los valores determinados en los efluentes con tiempos de retención de 10 h y 24 h.

La CE expuso una concentración media para los afluentes de 2,16 mS/cm, como se aprecia en la Figura 28. El efluente con un TRH de 10 h exhibió una mayor CE (2,19 mS/cm) en relación al TRH de 24 (2,14 mS/cm) y al promedio de valores encontrados en el afluente. Según Delgadillo *et al.* (2010), resulta sumamente importante el análisis de la CE en efluentes de aguas residuales tratadas para fines de irrigación, con el objeto de evaluar el riesgo de salinización en suelos regados con estas aguas. Como mencionan estos autores, no es recomendable irrigar suelos con concentraciones de CE mayores a 3 mS/cm, a causa de una posible alta carga de sales disueltas en el agua. La única regulación que incorpora un límite máximo de CE para la reutilización de aguas grises es la normativa italiana (ver Anexo I), la cual expone un valor máximo de CE referente a 3 mS/cm. Se destaca que los valores observados en los efluentes del periodo invernal se encuentran dentro de los rangos mencionados para su reúso.

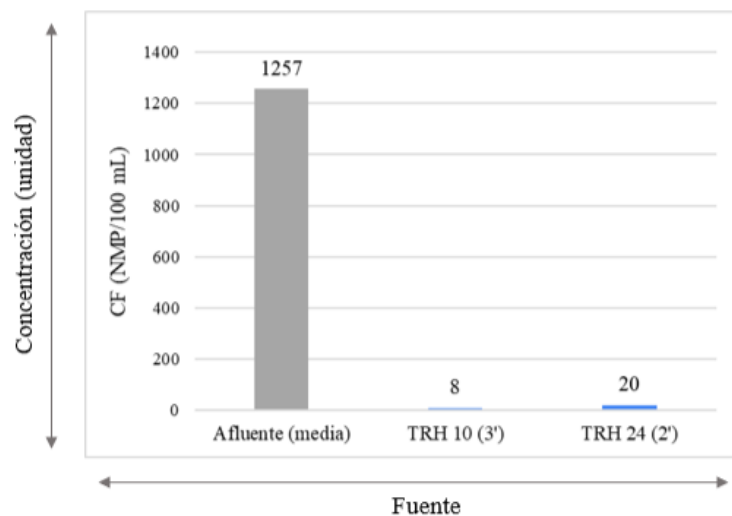


Figura 29. Concentración media del afluente y concentraciones de parámetros microbiológicos del efluente según TRH y número de medición (campana de invierno).

Como se muestra en la Figura 29, se determinó que la concentración promedio de CF encontrada en los afluentes del periodo de invierno, fue de 1257 NMP/100 mL. Se halló una concentración de 8 NMP/100 mL en el efluente con un TRH de 10 h, y un valor de 20 NMP/100 mL en el efluente con un TRH de 24 h. Se hace posible identificar que los efluentes estuvieron entre un 99-98% más bajos que la media de los afluentes que ingresaron al sistema de tratamiento para el periodo.

Se puede vislumbrar que solo el efluente con un TRH de 10 expuso admisibilidad de CF según el proyecto reglamentario chileno de aguas grises (límite máximo de CF de 10

NMP/100 mL). Los dos efluentes del periodo invernal mostraron valores adecuados para el reúso de aguas grises en irrigación u otros fines no potables, según recomendaciones de Alemania (<100 NMP/100 mL) y Canadá (2-200 NMP/100 mL), y la actual norma para riego NCh 1333 OF. 78 (≤ 1000 NMP/100 mL).

Periodo de primavera. En el presente apartado se muestran los gráficos de concentraciones de parámetros de calidad de agua que se encontraron en la segunda campaña de muestreo (mes de octubre). Se efectuaron las mediciones 4', 5' y 6', siendo estas realizadas respectivamente después de 124, 138 y 145 días desde el comienzo de funcionamiento del prototipo. Las concentraciones de afluentes que se exponen en los gráficos, representan al promedio de valores para la campaña de primavera.

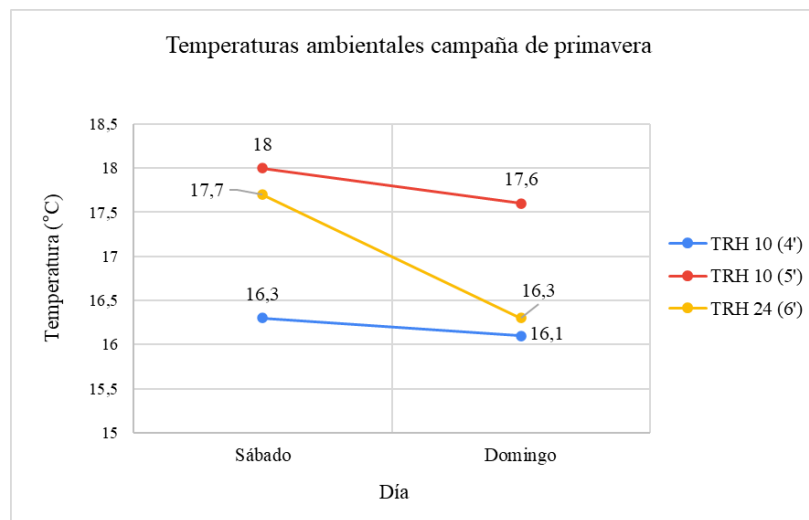


Figura 30. Temperaturas medias diarias para las 48 horas previas al día de recolección de muestras, según tiempo de retención hidráulico para el tratamiento y número de medición (periodo de primavera).

Las temperaturas medias diarias para los tiempos de tratamiento expuestos en el gráfico de temperaturas ambientales de la Figura 30, estuvieron en el rango de 16,1°C-18°C. Los promedios de los dos días para los TRH fueron los siguientes: 16,2°C para el TRH de 10 h (4'), 17,8°C para el TRH de 10 h (5') y 17°C para el TRH de 24 h (6'). Todas las temperaturas medias diarias estuvieron en el rango óptimo ($>16^{\circ}\text{C}$) para la actividad de procesos depurativos de aguas, que realizan especies macrófitas del género *Juncus*.

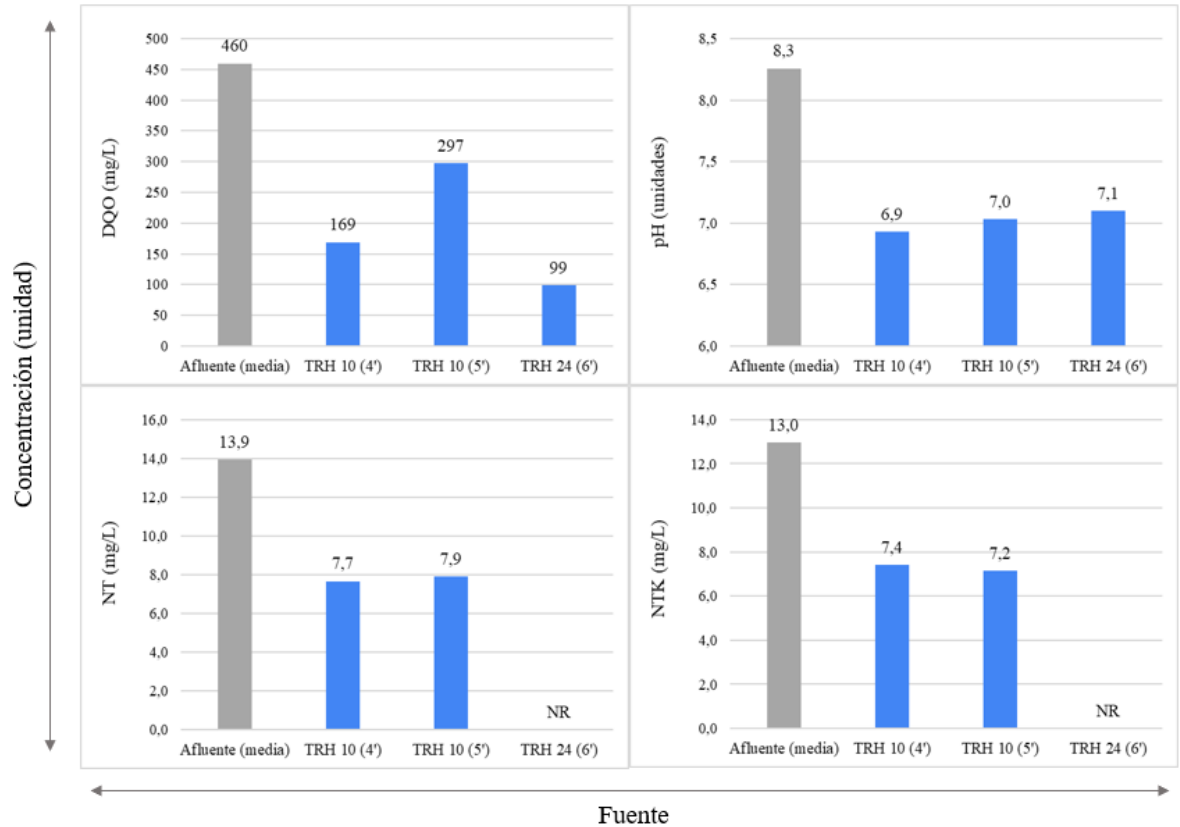


Figura 31. Concentración media del afluente y concentraciones de parámetros químicos del efluente según TRH y número de medición (campana de primavera).

Como se muestra en la Figura 31, la media de la concentración de pH para todos los afluentes que ingresaron al sistema en el periodo de primavera, tuvo un valor de 8,3. Los valores de pH para los efluentes fueron: 6,93 (TRH 10 h (4')), 7 (TRH 10 h (5')) y 7,1 (TRH 24 h (6')). Se puede observar que el pH con mayor neutralidad fue el correspondiente al TRH 10 h (5'), teniendo este efluente las mayores temperaturas ambientales para las 48 horas previas en donde estuvo sometido el líquido residual a tratamiento biológico (18°C-17,6°C). Se destaca que los tres efluentes de agua gris tratada presentaron una adecuada neutralidad para ser descargados al ambiente (Metcalf y Eddy, 2003). Del mismo modo, las tres concentraciones se encuentran dentro de rangos idóneos (normativas y recomendaciones) para fines de irrigación u otros expuestos en el Anexo I, como también, para el rango propuesto por la NCh 1333 OF. 78.

La DQO expuso un promedio de concentraciones en los afluentes del periodo de primavera, de 460 mg/L (ver Figura 31). Los efluentes con tiempos de retención de 10 horas presentaron concentraciones de 169 mg/L (medición 4') y 297 mg/L (medición 5'). En base al Anexo I, es posible identificar que el efluente con un TRH de 10 h que fue recolectado en la medición 4', está en rangos aceptables de reutilización para recomendaciones de países como Eslovenia (límite máximo de 200 mg/L), India (<250 mg/L) y Canadá (límite máximo de 280 mg/L).

Por el otro lado, el efluente con el mismo tiempo de retención hidráulico que fue recolectado en la medición 5', no se atiene a ningún rango de aceptabilidad de reusó de aguas grises presentado en el Anexo I.

La concentración de DQO encontrada en el efluente con un TRH de 24 h expuesta en la Figura 31, correspondiente a 99 mg/L, representa al único valor el cual es admitido por alguna normativa vigente de reutilización de aguas grises en el mundo (única regulación que incorpora DQO), como lo es la norma de Italia (límite máximo de 100 mg/L) (ver Anexo I). Es posible identificar que la concentración de DQO para el TRH mencionado mostró una reducción de un 41-66% con respecto a los valores de los efluentes con tiempos de tratamiento biológico de 10 horas. Como destacan los autores Vidal y Hormazábal (2018), los humedales construidos de flujo vertical y escurrimiento subsuperficial con tiempos de retención de 24 h pueden remover hasta un 95% del total de materia orgánica del agua residual. Además, el proceso de disminución de la DQO en humedales depuradores se puede ver potenciado al utilizar un TRH de 24 h, en relación a tiempos de retención más bajos como menciona Katayon *et al.* (2008).

Los valores promedio de NT y NTK en los afluentes del periodo de primavera, fueron de 13,9 mg/L y 13 mg/L en el orden dado (ver Figura 31). Las concentraciones de NT y NTK para el efluente con un TRH de 10 h (4') entregaron valores de 7,66 mg/L y 7,4 mg/L. Las concentraciones de los parámetros mencionados, y de manera sucesiva, tuvieron valores de 7,9 mg/L y 7,15 mg/L para el TRH de 10 h (5'). No se realizaron mediciones de nitrógeno en el muestreo 6'. Se puede vislumbrar que los valores de nitrógeno para los dos efluentes con tiempos de retención de 10 horas, muestran cercanía en cantidad de concentración. Estos valores se adentran dentro de rangos aceptables para su reúsó según normativas (Italia y Japón) y recomendaciones (Eslovenia y China) internacionales expuestas en el Anexo I.

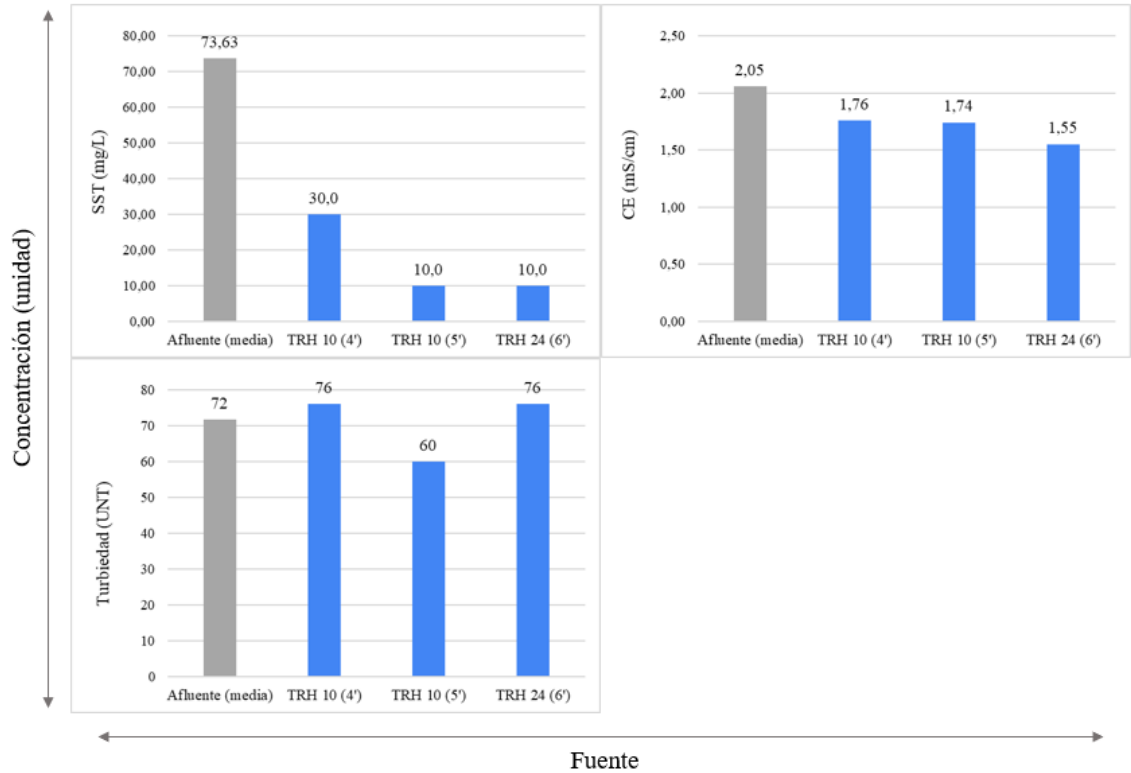


Figura 32. Concentración media del afluente y concentraciones de parámetros físicos del efluente según TRH y número de medición (campaña de primavera).

Se puede apreciar en la Figura 32 que la media de concentración de SST en los afluentes que ingresaron al sistema de tratamiento, fue de 73,6 mg/L. El efluente respectivo al TRH de 10 h (4') presentó un valor de 30 mg/L, adentrándose en rangos adecuados para su reutilización si es que se compara con la regulación para irrigación de NSW-Australia (límite máximo de 30 mg/L), y las recomendaciones de reúso de países como Eslovenia (límite máximo de 80 mg/L), China (límite máximo de 50 mg/L), India (<200 mg/L) y Canadá (<100 mg/L). Este efluente no presentó idoneidad para su reúso según la normativa italiana ni el proyecto de reglamento chileno, ya que, estos dos proponen un límite máximo de 10 mg/L (ver Anexo I).

Aún en relación a los SST encontrados en las aguas del efluente, se observó que los dos efluentes de las campañas de medición 5' y 6' (tiempos de retención de 10 h y 24 h respectivamente) pudieron alcanzar los rangos para reúso de aguas grises de la norma italiana, y el proyecto de reglamento chileno. Estas dos regulaciones mencionadas presentan una estricta exigencia de reutilización de sólidos suspendidos con respecto a otras normas y recomendaciones internacionales.

A partir del gráfico de CE presentado en la Figura 32, se pudo observar un promedio de 2,1 mS/cm de conductividad en los afluentes que ingresaron al sistema durante el periodo de primavera. Las conductividades que se encontraron en los efluentes fueron las siguientes: 1,76

mS/cm para el TRH 10 h (4'), 1,74 mS/cm para el TRH 10 h (5') y 1,55 mS/cm para el TRH 24 h (6'). Todos los efluentes del presente periodo presentaron una menor carga de iones disueltos en el agua tratada, en comparación a los efluentes del periodo invernal. Se puede mencionar que las concentraciones encontradas para el periodo primaveral, exponen cargas aceptables de salinidad para irrigación (Delgadillo *et al.*, 2010). Cabe destacar que los valores mencionados de CE se encuentran dentro del rango aceptable para el reúso de aguas grises, según la normativa italiana (ver Anexo I).

El gráfico de concentraciones de turbiedad para el periodo primaveral expuso una media de valores en los afluentes respectiva a 72 UNT (ver Figura 32). Los valores de turbiedad encontrados en los efluentes fueron los siguientes: 76 UNT para el TRH 10 h (4'), 60 UNT para el TRH 10 h (5') y 76 UNT para el TRH 24 h (6'). Como se puede observar, los valores de turbiedad no disminuyeron con el aumento del TRH, siendo estas concentraciones altas en relación a los rangos exigidos en regulaciones y recomendaciones, tanto de Chile (límite máximo de 5 UNT) como de otros países (<10 UNT) (ver Anexo I). Es posible vislumbrar que las concentraciones de turbiedad de los efluentes fueron en 2/3 de los casos, mayores a la media encontrada en las aguas que ingresaron al sistema.

Según Boano *et al.* (2020), la zona del biofiltro sedimentario de un HC tiene grandes ventajas en la remoción de parámetros físicos del agua gris. Los autores mencionan que estos sistemas de tratamiento de agua pueden remover entre un 50-97% de la turbiedad presente en aguas grises. Se distinguió una notoria alza de turbiedad en los efluentes del periodo de primavera, en comparación a los efluentes del periodo invernal. A raíz de lo anteriormente mencionado, se identificó una posible situación no deseada con respecto al proceso de acumulación de agua gris tratada. Dicho planteamiento se asoció con el parámetro de coliformes fecales presentado a continuación.

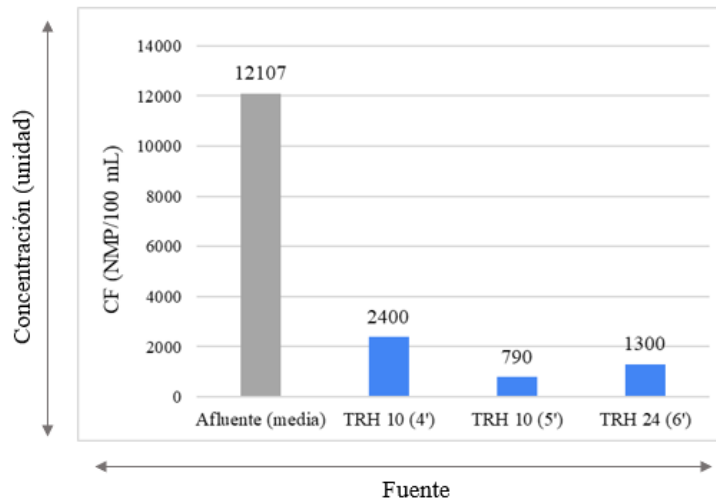


Figura 33. Concentración media del afluente y concentraciones de parámetros microbiológicos del efluente según TRH y número de medición (campaña de primavera).

La concentración media del parámetro de CF para los afluentes del periodo de primavera, tuvo un valor de 12107 NMP/100 mL (ver Figura 33). Los efluentes del sistema de tratamiento para este periodo presentaron las siguientes concentraciones: 2400 NMP/100 mL para el TRH 10 h (4'), 790 NMP/100 mL para el TRH 10 h (5') y 1300 NMP/100 mL para el TRH 24 h (6').

Cabe recalcar que todos los valores del efluente fueron considerablemente más bajos que el promedio de concentraciones de los afluentes, estando entre un 80-93% debajo del valor medio aludido. A pesar de lo mencionado anteriormente, ninguno de los efluentes recolectados alcanzó rangos de aceptabilidad para su reutilización para el caso del proyecto de reglamento chileno (límite máximo de 10 NMP/100 mL), ni tampoco para las recomendaciones de países como Alemania (<100 NMP/100 mL) y Canadá (<200 NMP/100 mL) (Ver Apéndice I). Se puede mencionar que dentro del periodo de primavera, solo la concentración de CF que se halló en el efluente de la medición 5' expuso un valor aceptable para el uso de agua en riego según la NCh 1333 OF. 78.

Se observó que los valores de coliformes termo tolerantes en los efluentes del periodo de primavera respondieron de manera similar a las fluctuaciones de concentraciones de turbiedad que se encontraron en esta fuente para el periodo mencionado. Estos dos parámetros expusieron una notoria alza en todos los efluentes para la campaña de primavera, en relación a los efluentes de la campaña de invierno.

Con respecto a las temperaturas ambientales, según los autores Schafer y Mihelcic (2012) existe un potencial aumento del crecimiento de agentes patógenos como la *Escherichia coli* dentro de estanques de acumulación de agua, en condiciones de temperaturas ambientales mayores a 15°C. Los investigadores añaden también que los estanques de polietileno pueden presentar mayores niveles de contaminación por microorganismos, en relación a estanques fabricados con fibra de vidrio o fibra de cemento.

Según la World Health Organization (2017), la turbiedad puede presentarse como un indicador de la presencia de microorganismos patógenos en el agua, al ser causada por partículas químicas y biológicas que se encuentran suspendidas. Se destaca que un cambio notorio de la concentración de turbiedad, en pequeños o largos periodos de tiempo, podría verse originado por la proliferación de microorganismos en el agua. Como recalcan los autores Martínez-Orjuela *et al.* (2020), la turbiedad presenta una correlación lineal positiva con el parámetro de coliformes fecales dentro del tratamiento de aguas.

En relación al incremento en los parámetros de turbiedad y CF que se observaron en los efluentes de la campaña de primavera, y añadido al sustento bibliográfico mencionado, se procedió a ejecutar una acción de limpieza completa del módulo de acumulación final de agua tratada. Se intentó en primera instancia, retirar el estanque de acumulación de agua como se había previsto en el diseño final del modelo. No se logró conseguir la acción mencionada (como se explicó previamente en el apartado de Funcionamiento y Operación del Sistema de Tratamiento), por lo cual, se hizo un agujero (9 cm de diámetro) y se añadió una tapa movable a la zona superior del estanque.

Al abrirse el agujero en el estanque se observó una capa remanente de sólidos en la parte baja de este, la cual no pudo ser removida en las instancias de vaciado de este módulo (con la electrobomba). Lo anterior se debe a que la conexión de la cañería de salida del módulo de acumulación, no quedó pegada a la zona baja, sino que unos milímetros más arriba. Esta lámina remanente de sedimento pudo haber propiciado una proliferación de microorganismos patógenos adheridos a las partículas (World Health Organization, 2017). La situación recién mencionada pudo haberse visto aumentada por el incremento de temperaturas ambientales, originándose también un posible aumento en la humedad del estanque (condiciones favorables para el desarrollo de microorganismos). En efecto, en casos donde se fuera a activar la electrobomba para riego se podría causar una suspensión de microorganismos (debido al movimiento de agua), afectando así a toda el agua gris tratada acopiada en el estanque.

El origen de los sedimentos encontrados en el fondo del estanque puede haberse visto originado por acción de las gravas y arenas añadidas a los estanques depuradores. No se realizó un lavado a los sedimentos mencionados en la fase de instalación del prototipo, por lo que resulta posible que se hayan acumulado residuos en la zona baja del módulo de acopio de agua.

Se esclareció que el método de vaciado del estanque que se había propuesto en un comienzo (de manera previa a los días de recolección de muestras), con la utilización de la manguera para riego en conexión a una manguera corrugada hacia el alcantarillado, no dio los resultados esperados. Es de fundamental importancia la realización de un lavado completo del estanque de acumulación final durante el primer mes de funcionamiento del prototipo (en caso de instalación futura), para la eliminación de sólidos decantados que podrían haberse originado en el proceso de adición de gravas y arenas. Según Schafer y Mihelcic (2012), un estanque de acumulación de agua lavado 3 o más veces en un año puede presentar estadísticamente menores concentraciones de *Escherichia coli* y turbiedad en comparación a un estanque lavado con menos frecuencia. Es por esto que se propuso la realización de lavados completos cada 2-3 meses al módulo de acumulación del actual prototipo.

Se pudo observar que la carga de CF en las muestras de efluentes recolectadas en la campaña de invierno, no superó los 20 NMP/100 mL, a diferencia de las concentraciones encontradas en los efluentes de primavera que oscilaron en un rango de 790-2400 NMP/100 mL. Se identificó como un posible condicionante de los parámetros de CF y turbiedad en la campaña de primavera, y posiblemente también en la de invierno, la mencionada lámina remanente de sólidos decantados en el estanque de acumulación final. Es por lo anterior que no fue posible hacer un análisis de desempeño en relación a la desinfección patogénica provista por el sistema.

El lavado completo del módulo de acopio de agua se presentó como de gran importancia a ser realizado. Es posible que el lavado del módulo haya disminuido las cargas de microorganismos en las aguas tratadas, sin embargo, no se pudo continuar con más campañas de muestreo de calidad del agua para el presente trabajo. La adición de un módulo clorador posterior a la fase de tratamiento biológico tiene la virtud de actuar como un efectivo método

para la reducción e inactivación de microorganismos patógenos en las aguas grises (Bernstein *et al.*, 2021), siempre y cuando se realice un correcto diseño en base a las características propias del modelo.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

La comprensión holística de todas las aristas que inciden en el accionar de una planta de tratamiento de aguas residuales con humedales construidos, es uno de los factores con mayor relevancia al momento de diseñar, construir e implementar sistemas de esta índole. Resulta importante analizar detenidamente todos los agentes, tanto internos como externos, que repercuten en la tecnicidad de estos sistemas y sus componentes, como en los tipos y fases de tratamiento propuestos para la operación.

Se propone un lineamiento de diseño de un modelo ergonómico y compacto, realizándose el dimensionamiento de este en base a características de consumo de agua de lavadoras promedio de 10-13 kg. El ingreso y tratamiento del agua se lleva a cabo de manera automatizada, solo debiéndose efectuar lavados a estanques y aberturas de válvulas. El prototipo tiene la particularidad de ser modular, presentando diversos componentes con diferentes grados de movilidad, asimismo, no necesita ser adherido de manera fija en la vivienda. El actual modelo presenta la cualidad de ser una alternativa accesible para sectores de la ciudadanía con accesos limitados a recursos económicos, siendo también un sistema de fácil manipulación y operación para personas sin conocimiento alguno en materia de tratamiento de agua. Cabe destacar que el diseño final efectuado presenta puntos de mejoramiento con relación a ciertos módulos, como lo son la fase de tratamiento primario y el estanque de acopio de agua gris tratada.

El sistema de tratamiento se implementa de manera óptima, lográndose un funcionamiento constante durante el transcurso del proyecto, dentro de un antejardín de una vivienda unifamiliar localizada en un área de remodelación y mejoramiento urbano que propicia el Programa Quiero mi Barrio. Se destaca la aprobación familiar en torno a la inserción del sistema dentro de su hogar, siendo estas personas las que lograron acogerlo dentro de su espacio personal, adaptando también ciertos hábitos personales como lo es el lavado de ropa. El proceso de capacitación a la familia es llevado a efecto de una provechosa manera, ya que se logra un entendimiento completo por parte de los integrantes sobre el funcionamiento y operación del prototipo. En mención a la comunidad del área de estudio, se denota un sensación de aceptación de un sistema de tratamiento de aguas grises con funcionamiento ecosistémico dentro del barrio, sentimiento el cual se manifiesta a través de innumerables personas que ofrecen ser voluntarios/as para la instalación del modelo en su vivienda.

La zona de tratamiento biológico del agua se emplea con plantas macrófitas adaptadas a climas mediterráneos, como lo es la especie *Juncus patens*. Se puede observar un deseado desarrollo de la zona aérea de las plantas en los estanques depuradores, lo cual se entiende como un indicador de una buena aceptabilidad de la especie en el medio propuesto. Se logra

una esperada operación de la fase de tratamiento biológico con el TRH de 10 horas. Se destaca que la zona de humedal funcionando bajo el TRH de 24 horas y con la utilización máxima de agua de la lavadora situada en el hogar, presenta un leve rebalse de la columna de agua sobre la zona sedimentaria, pudiéndose deber a características propias de las arenas utilizadas o a algún grado de taponamiento del sustrato poroso.

Los afluentes que ingresaron al sistema de tratamiento estuvieron en general, dentro de rangos de aguas grises provenientes de lavanderías situadas en diferentes lugares del mundo. No obstante, se destaca que las aguas originadas de la lavadora en estudio, tuvieron la característica de tener bajos niveles de SST y fósforo en relación al común de aguas grises de lavanderías domiciliarias, como también, una alta variabilidad en las concentraciones de microorganismos patógenos.

Los efluentes de agua gris tratada exponen en todos los casos rangos neutros de pH (o cercanos), y concentraciones idóneas de salinidad y nitrógeno para la reutilización en riego según normas y recomendaciones nacionales e internacionales. No se determina fósforo en el efluente en ninguna de las mediciones efectuadas. Se observa que los SST alcanzan aceptabilidad para reuso según el proyecto reglamentario chileno y la norma italiana en un 80% de los casos de muestreo (con los dos TRH), no viéndose afectado este parámetro por la estacionalidad. En relación a la DQO, se distinguen bajas de concentraciones una vez que aumentan las temperaturas ambientales debido a la primavera, además, el aumento del TRH a 24 h tendió a disminuir en todos los casos la concentración del parámetro en el efluente. Solo en el periodo de primavera y con el TRH de 24 h, se alcanza un valor admisible de DQO para la reutilización de aguas grises con respecto a la única norma encontrada que comprende este criterio, como lo es la regulación de Italia.

Cabe mencionar que la turbiedad y CF precisan de un mayor estudio para analizar la capacidad del prototipo de alcanzar rangos admisibles para el reuso de aguas grises. Lo anterior se debe a que se observa una alza conjunta de las concentraciones de estos parámetros hacia la segunda campaña de medición, pudiendo deberse a las condiciones de higiene del estanque de acumulación final de agua y al aumento de temperaturas ambientales.

El trabajo interfacultativo, junto a la colaboración de programas gubernamentales, entregan la posibilidad para el desarrollo del proyecto realizado. El prototipo aplicado permite expandir el conocimiento existente en materia de tratamiento y reutilización de aguas grises domiciliarias en base a un funcionamiento ecosistémico, y un modelo democrático. Con sistemas como este, se puede beneficiar a un sinnúmero de personas en la recuperación de aguas grises para el lavado de autos y patios, descargas de inodoro y riego de jardines tanto domiciliarios como comunitarios. La elaboración de más propuestas como esta puede llegar a representar una solución complementaria a la creciente crisis hídrica que afecta al país, y por sobre todo, una ayuda para personas de sectores menos acomodados de la sociedad.

Recomendaciones

En base a los resultados obtenidos en el desarrollo del presente trabajo, se elaboran las siguientes recomendaciones para un rediseño e implementación futura del actual modelo:

- Realizar un mejoramiento a la fase de tratamiento primario del agua, con énfasis en la replicación de un estanque séptico de doble cámara con arreglo interno de cañerías.
- Instalar el modelo en espacios con acceso libre y continuo a la zona trasera de este, con el fin de mantener la movilidad de módulos para sus debidas limpiezas u otras reparaciones.
- Escoger con un cauteloso cuidado el sustrato de arena gruesa para la zona de humedal construido, con especial énfasis en que no contenga arena fina.
- Efectuar un lavado a los áridos antes de su implementación, y de manera posterior un lavado al estanque de acumulación de agua. Además, resulta importante el lavado del estanque de acopio de agua cada tres meses (o menos).
- Añadir un método de desinfección posterior a la zona de tratamiento biológico del agua para la inactivación de microorganismos patógenos. En el caso de una aprobación de la actual iniciativa reglamentaria de aguas grises chilena, la desinfección debe ser por cloración.

BIBLIOGRAFÍA

Albalawneh, A., y Chang, T. K. (2015). Review of the greywater and proposed greywater recycling scheme for agricultural irrigation reuses. *International Journal of Research-Granthaalayah*, 3(12), 16-35. <https://doi.org/10.29121/granthaalayah.v3.i12.2015.2882>

Ampersand. (2022). *¿Qué es PPR?* Recuperado de <https://ampersandchile.cl/que-es-ppr/>

Arteaga-Cortez, V. M., Quevedo-Nolasco, A., Valle-Paniagua, D. H. D., Castro-Popoca, M., Bravo-Vinaja, Á., y Ramírez-Zierold, J. A. (2019). Estado del arte: una revisión actual a los mecanismos que realizan los humedales artificiales para la remoción de nitrógeno y fósforo. *Tecnología y ciencias del agua*, 10(5), 319-343. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-05-12>

Avery, L. M., Frazer-Williams, R. A., Winward, G., Shirley-Smith, C., Liu, S., Memon, F. A., & Jefferson, B. (2007). Constructed wetlands for grey water treatment. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 7(3-4), 191-200. [https://doi.org/10.1016/S1642-3593\(07\)70101-5](https://doi.org/10.1016/S1642-3593(07)70101-5)

Baird, R., y Bridgewater, L. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater. 23rd edition*. Washington, D.C.: American Public Health Association.

Bassani, L., Pelissari, C., da Silva, A. R., y Sezerino, P. H. (2021). Feeding mode influence on treatment performance of unsaturated and partially saturated vertical flow constructed wetland. *Science of The Total Environment*, 754, 142400. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142400>

Bernstein, A., Siebner, H., Kaufman, A. G., y Gross, A. (2021). Onsite chlorination of greywater in a vertical flow constructed wetland—significance of trihalomethane formation. *Water*, 13(7), 903. <https://doi.org/10.3390/w13070903>

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN). (s.f). *Clima y Vegetación Región Metropolitana de Santiago. Chile Nuestro País*. Recuperado de <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region13/clima.htm>

Boano, F., Caruso, A., Costamagna, E., Ridolfi, L., Fiore, S., Demichelis, F., ... y Masi, F. (2020). A review of nature-based solutions for greywater treatment: Applications, hydraulic design, and environmental benefits. *Science of the total environment*, 711, 134731. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134731>

Brix, H., y Arias, C. A. (2005). The use of vertical flow constructed wetlands for on-site treatment of domestic wastewater: New Danish guidelines. *Ecological engineering*, 25(5), 491-500. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.07.009>

California Native Plant Society (Calscape). (s.f). *Common Rush. Juncus patens*. Recuperado de [https://calscape.org/Juncus-patens-\(\)](https://calscape.org/Juncus-patens-())

Collivignarelli, M. C., Carnevale Miino, M., Gomez, F. H., Torretta, V., Rada, E. C., y Sorlini, S. (2020). Horizontal flow constructed wetland for greywater treatment and reuse: an experimental case. *International journal of environmental research and public health*, 17(7), 2317. <https://doi.org/10.3390/ijerph17072317>

Delgadillo, O., Camacho, A., Perez, L. F., y Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Nelson Antequera. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/48017573.pdf>

Dirección General de Aguas (DGA). (2021, septiembre). *El 50% de las comunas de Chile con declaración de Escasez Hídrica*. Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile. Recuperado de <https://dga.mop.gob.cl/noticias/Paginas/DetalledeNoticias.aspx?item=780>

Dirección Meteorológica de Chile (MeteoChile). (2022). *Servicios Climáticos, Quinta Normal, Santiago*. Recuperado de <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/diario/visorDeDatosEma/330020>

Ellis, J. B., Shutes, R. B. E., y Revitt, D. M. (2003). *Guidance manual for constructed wetlands*. Environment Agency, Almondsbury, Bristol. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/19951883.pdf>

Eriksson, E., Auffarth, K., Henze, M., y 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)

García, X., y Pargament, D. (2015). Reusing wastewater to cope with water scarcity: Economic, social and environmental considerations for decision-making. *Resources, Conservation and Recycling*, 101, 154-166. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.05.015>

Hach. (2021a). *Oxygen Demand, Chemical-Reactor Digestion COD Method 8000 ULR, LR, HR, HR plus+*. Recuperado de <https://latam.hach.com/viales-de-digestion-para-dqo-rango-alto-plus-de-200-a-15-000-mg-l-de-dqo-paquete-de-25/product-downloads?id=54617177299>

Hach. (2021b). *Short Working Procedure: TNTplus™ 844 Phosphorus Total and Reactive (Ortho), High Range, Method 10209/10210*. Recuperado de <https://www.hach.com/phosphorus-reactive-and-total-tntplus-vial-test-hr-1-5-15-0-mg-l-po-25-tests/product-downloads?id=7640196816>

Hach. (2022). *Hach TNTplus 880 Total Kjeldahl Nitrogen Method 10242*. Recuperado de <https://www.hach.com/simplified-tkn-s-tkn-tntplus-vial-test-0-16-mg-l-n-25-tests/product-downloads?id=7640209881>

Hoffmann, H., Platzer, C., Winker, M., y Von Muench, E. (2011). Revisión Técnica de Humedales Artificiales de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas grises y aguas domésticas. *Eschborn, Alemania: Agencia de Cooperación Internacional de Alemania, GIZ Programa de Saneamiento Sostenible ECOSAN*. Recuperado de <https://sswm.info/es/node/12001>

Jefferson, B., Palmer, A., Jeffrey, P., Stuetz, R., y Judd, S. (2004). Grey water characterisation and its impact on the selection and operation of technologies for urban reuse. *Water science and technology*, 50(2), 157-164. <https://doi.org/10.2166/wst.2004.0113>

Jones, E., van Vliet, M. T. H., Qadir, M., y Bierkens, M. F. P. (2020). Country-level and gridded wastewater production, collection, treatment and re-use. *PANGAEA*. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.918731>

Kadlec, R. H., y Reddy, K. R. (2001). Temperature effects in treatment wetlands. *Water environment research*, 73(5), 543-557. Recuperado de <https://www.jstor.org/stable/25045537>

Katayon, S., Fiona, Z., Megat Mohd Noor, M. J., Abdul Halim, G., y Ahmad, J. (2008). Treatment of mild domestic wastewater using subsurface constructed wetlands in Malaysia. *International Journal of Environmental Studies*, 65(1), 87-102. <https://doi.org/10.1080/00207230601125192>

Leiva, E., Sánchez, R., Serrano, J., Schneider, N., Alvial, C., y Rodríguez, C. (2021). Reutilización de aguas grises en Chile: propuesta de implementación en comunidades rurales como alternativa de mitigación para la escasez hídrica. En: Centro de Políticas Públicas UC (ed), *Propuestas para Chile. Concurso de Políticas Públicas 2020*. Santiago: Pontificia Universidad Católica de Chile, pp. 173-209. Recuperado de <https://politicaspublicas.uc.cl/publicacion/capitulo-vi-reutilizacion-de-aguas-grises-en-chile-propuesta-de-implementacion-en-comunidades-rurales-como-alternativa-de-mitigacion-para-la-escasez-hidrica/>

Ley N°21.075, REGULA LA RECOLECCIÓN, REUTILIZACIÓN Y DISPOSICIÓN DE AGUAS GRISES. *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile/ BCN*, 15 de febrero de 2018. Recuperado de <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1115066&idParte=9886827&idVersion=2018-02-15>

Li, F., Wichmann, K., y Otterpohl, R. (2009). 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>

Llaberia Group. (2020). Ventajas de los tanques y depósitos de polietileno. *Revista Técnica de Medio Ambiente (Retema)*. Recuperado de <https://www.retema.es/actualidad/ventajas-tanques-depositos-polietileno>

Marquet, P., Rojas, M., Stehr, A., Farías, L., González, H., Muñoz, J. C., Wagemann, E., Rojas, C., Rodríguez, I., y Hoyos, J. (2021). *Soluciones basadas en la naturaleza*. Santiago: Comité Científico de Cambio Climático; Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5736938>

Martínez-Orjuela, M. R., Mendoza-Coronado, J. Y., Medrano-Solís, B. E., Gómez-Torres, L. M., y Zafra-Mejía, C. A. (2020). Evaluación de la turbiedad como parámetro indicador del tratamiento en una planta potabilizadora municipal. *Revista UIS Ingenierías*, 19(1), 15-24. <https://doi.org/10.18273/revuin.v19n1-2020001>

Metcalf, L., y Eddy, H. P. (2003). *Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse* (Vol. 4). New York: McGraw-Hill. Recuperado de [https://www.researchgate.net/profile/Shuokr_Qarani_Aziz/post/Does any one has Metcalf Eddy-Wastewater Engineering-Treatment and Reuse 4th edition/attachment/5c9a90decfe4a7299498fd8f/AS%3A740806746984450%401553633500173/download/Wastewater+Eng+by+Metcalf+and+Eddy+%2C+2003.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Shuokr_Qarani_Aziz/post/Does_any_one_has_Metcalf_Eddy-Wastewater_Engineering-Treatment_and_Reuse_4th_edition/attachment/5c9a90decfe4a7299498fd8f/AS%3A740806746984450%401553633500173/download/Wastewater+Eng+by+Metcalf+and+Eddy+%2C+2003.pdf)

Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2020). *Mesa Nacional del Agua. Primer Informe*. Recuperado de [https://www.mop.cl/Prensa/Documents/Mesa Nacional del Agua 2020 Primer Informe Enero.pdf](https://www.mop.cl/Prensa/Documents/Mesa_Nacional_del_Agua_2020_Primer_Informe_Enero.pdf)

Ministerio de Salud (MINSAL). (2018). *PROYECTO DE REGLAMENTO SOBRE CONDICIONES SANITARIAS BÁSICAS PARA LA REUTILIZACIÓN DE AGUAS GRISAS*. Recuperado de <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/02/Reglamento-Aguas-Grises.pdf>

Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU). (2008). *PROGRAMA QUIERO MI BARRIO*. Recuperado de <https://pdba.georgetown.edu/Security/citizenssecurity/chile/politicas/QuieromiBarrio.pdf>

Molle, P., Liénard, A., Grasmick, A., y Iwema, A. (2006). Effect of reeds and feeding operations on hydraulic behaviour of vertical flow constructed wetlands under hydraulic overloads. *Water Research*, 40(3), 606-612. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.11.026>

Morales, P. (2021). *Escasez hídrica en Chile y las proyecciones del recurso*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile /BCN. Recuperado de <https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/32023/3/Escasez%20hi%CC%81drica%20en%20Chile%20y%20las%20proyecciones%20del%20recurso.pdf>

Norma Chilena Oficial NCh 1333 Of. 78, Requisitos de Calidad del Agua para diferentes usos. Requisitos de Agua para Riego. *Instituto Nacional de Normalización*, INN. 1987. Recuperado de https://ciparchile.cl/pdfs/11-2013/norovirus/NCh1333-1978_Mod-1987.pdf

Oteng-Peprah, M., Acheampong, M. A., y DeVries, N. K. (2018). Greywater characteristics, treatment systems, reuse strategies and user perception—a review. *Water, Air, & Soil Pollution*, 229(8), 1-16. Recuperado de <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-018-3909-8>

Reed, S. C. (1993). *Subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment: a technology assessment* (No. 74). US Environmental Protection Agency, Office of Water. Recuperado de https://books.google.cl/books?hl=es&lr=&id=P21GAAAAYAAJ&oi=fnd&pg=PR13&dq=Subsurface+flow+constructed+wetlands+for+wastewater+treatment:+a+technology+assessment+&ots=APrMwjTSep&sig=ExQu7w9I9zJE7GmzZ3pGP_Ea_Vg&redir_esc=y#v=onepage&q=Subsurface%20flow%20constructed%20wetlands%20for%20wastewater%20treatment%3A%20a%20technology%20assessment&f=false

Sadzawka, A. (2006). *Métodos de Análisis de Aguas Para Riego*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Serie Actas INIA N° 37, Santiago, Chile, 332p. Recuperado de <http://www.schcs.cl/doc/libros/An%C3%A1lisis%20de%20aguas%20para%20riego.pdf>

Saeed, T., y Sun, G. (2012). A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media. *Journal of environmental management*, 112, 429-448. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.08.011>

Saeed, T., y Sun, G. (2017). Pollutant removals employing unsaturated and partially saturated vertical flow wetlands: A comparative study. *Chemical Engineering Journal*, 325, 332-341. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.05.072>

Sancha, A. M., Castillo, G., Espinoza, C., Mena, M. P., Cornejo, J., Rivas, H., y Molina, M. E. (2005). *CRITERIOS DE CALIDAD DE AGUAS O EFLUENTES TRATADOS PARA USO EN RIEGO (INFORME FINAL)*. Recuperado de http://biblioteca-digital.sag.gob.cl/documentos/medio_ambiente/criterios_calidad_suelos_aguas_agricolas/pdf_aguas/informe_final.pdf

Sandri, D., y Reis, A. P. (2021). Performance of constructed wetland system using different species of macrophytes in the treatment of domestic sewage treatment. *Revista Engenharia na Agricultura-REVENG*, 29, 429-447. <https://doi.org/10.13083/reveng.v29i1.12712>

Schafer, C. A., y Mihelcic, J. R. (2012). Effect of storage tank material and maintenance on household water quality. *Journal-American Water Works Association*, 104(9), E521-E529. <https://doi.org/10.5942/jawwa.2012.104.0125>

Scholz, M., y Lee, B. H. (2005) Constructed wetlands: a review. *International Journal of Environmental Studies*, 62:4, 421-447. <https://doi.org/10.1080/00207230500119783>

Shaikh, I. N., y Ahammed, M. M. (2020). Quantity and quality characteristics of greywater: a review. *Journal of environmental management*, 261, 110266. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110266>

Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS). (2010). *MANUAL OPERATIVO DE LA NORMA DE MUESTREO DE AGUAS RESIDUALES NCH 411/10 – 2005*. Recuperado de https://www.siss.gob.cl/586/articles-8526_manual_NCh411_10_oct_2010.pdf

Syranidou, E., Christofilopoulos, S., y Kalogerakis, N. (2017). *Juncus* spp.—the helophyte for all (phyto) remediation purposes? *New biotechnology*, 38, 43-55. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2016.12.005>

Tilley, E., Ulrich, L., Lüthi, C., Reymond, P., Schertenleib, R., y Zurbrügg, C. (2018). *Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento*. EAWAG. Recuperado de https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/TILLEY%20et%20al%202018.%20Compendio%20de%20sistemas%20y%20tecnolog%C3%ADas%20de%20saneamiento.pdf

Toloza, E., Sedini, F., y Muñoz, D. (2021). *Plan Maestro, Barrio Remodelación Panamericana Norte, comuna de Conchalí*. Presentado en Mesa Técnica Regional, Ministerio de Vivienda y Urbanismo. Recuperado por transparencia de datos.

UN-HABITAT. (2008). *Constructed Wetlands Manual*. UN-HABITAT Water for Asian Cities Programme Nepal, Kathmandu. Recuperado de https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/UN%20HABITAT%202008%20Constructed%20Wetlands%20Manual.pdf

Universidad de Chile. (s. f). FAU participa en investigación internacional sobre soluciones basadas en la naturaleza y desarrollo urbano sostenible. *Noticias Universidad de Chile*. Recuperado de <https://www.uchile.cl/noticias/169107/fau-participa-en-investigacion-internacional-sobre-soluciones-verdes>

Vidal, G., y Hormazábal, S. (2018). *Humedales Construidos. Diseño y Operación*. Concepción, Chile: Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad de Concepción. Recuperado de <http://www.eula.cl/giba/wp-content/uploads/2018/09/HUMEDALES-CONSTRUIDOS- DISEÑO-Y-OPERACIÓN.pdf>

Vivanco, E. (2017). *Humedales: Definiciones, Funciones y Amenazas*. Biblioteca del Congreso Nacional/ BCN. Recuperado de <https://www.camara.cl/verDoc.aspx?prmID=111594&prmTIPO=DOCUMENTOCOMISION#:~:text=Las%20funciones%20medioambientales%20o%20servicios,y%20exportaci%C3%B3n%20de%20sedimentos%20y>

Wiltshire, M. (2005). *Greywater reuse in urban areas*. [Tesis de Pregrado]. University of Southern Queensland, Faculty of Engineering and Surveying, Australia. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/11034494.pdf>

Wood, A. (1995). Constructed wetlands in water pollution control: fundamentals to their understanding. *Water Science and Technology*, 32(3), 21-29. [https://doi.org/10.1016/0273-1223\(95\)00601-X](https://doi.org/10.1016/0273-1223(95)00601-X)

World Health Organization. (2006). *Overview of greywater management health considerations* (No. WHO-EM/CEH/125/E). Recuperado de <https://applications.emro.who.int/dsaf/dsa1203.pdf>

World Health Organization. (2017). Water quality and health-review of turbidity: information for regulators and water suppliers. Recuperado de <https://www.who.int/publications/i/item/WHO-FWC-WSH-17.01>

ANEXOS Y APÉNDICES

Anexo I. Visión general de regulaciones y recomendaciones para el reúso de aguas grises según distintos países.

Parámetro (unidad)	Regulaciones						Recomendaciones				
	Gran Bretaña Irrigación	EEUU Urbano	NSW- Australia Irrigación	Italia	Japón	Chile* Urbano	Alemania	Eslovenia	China	India	Canadá
pH	5-9,5	6-9	6-9	6-9,5	6-9	-	6-9	7-9	6-9	6-9	7-9
CE (mS/cm)	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-
DQO (mg/L)	-	-	-	100	-	-	-	200	<15	<250	280
SST (mg/L)	-	-	30	10	-	10	-	80	10-50	<200	<100
Turbiedad (UNT)	<10	<5	-	-	-	5	-	-	<10	-	<2
NT (mg/L)	-	-	-	15	20-30	-	-	10	15-20	-	-
PT (mg/L)	-	-	-	2	1-4	-	-	1	1-5	-	-
CF (NMP/100mL)	-	-	-	-	-	10	<100	-	-	-	2-200
DBO ₅ (mg/L)	-	<10	<20	20	<20	10	20	-	10-20	<30	200
Cloro libre residual	-	-	-	-	-	$0,5 \leq X \leq 2$	-	-	-	-	-

*: Regulación no vigente

Fuente: (Boano *et al.*, 2020; MINSAL, 2018)



Apéndice I. Prueba de llenado de uno de los estanques para el tratamiento biológico de agua.



Apéndice II. Sistema de drenaje y aireación de los HC.



Apéndice III. Regulación del TRH de la zona de depuración biológica.



Apéndice IV. Implementación de una tapa movable para la limpieza del estanque de acumulación de agua gris tratada.

Apéndice V. Concentraciones de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, encontradas en el efluente del sistema de tratamiento, según TRH y temperaturas medias diarias de los sábados y domingos previos al día lunes de recolección de muestras.

Parámetro	Unidad	Número de medición					
		1'	2'	3'	4'	5'	6'
		TRH (h)					
		-	24	10	10	10	24
DQO	mg/L	NR	303	371	169	297	99
SST	mg/L	NR	0	6,6	30	10	10
Turbiedad	UNT	NR	39	16	76	60	76
CE	mS/cm	NR	2,14	2,19	1,76	1,74	1,55
pH	unidad	NR	7,24	7,1	6,93	7,03	7,1
NT	mg/L	NR	4,15	6,81	7,66	7,9	NR
NTK	mg/L	NR	3,58	6,47	7,4	7,15	NR
PT	mg/L	NR	NR	ND	ND	ND	NR
CF	NMP/100mL	NR	20	8	2400	790	1300
T sábado	°C	-	8,4	9,3	16,3	18	17,7
T domingo	°C	-	9,9	7,8	16,1	17,6	16,3

ND: No detectado

NR: No realizado