



UNIVERSIDAD
SAN SEBASTIAN
VOCACIÓN POR LA EXCELENCIA

**FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO
ESCUELA DE ENERGÍA Y SUSTENTABILIDAD
INGENIERÍA EN ENERGÍA Y SUSTENTABILIDAD AMBIENTAL
SEDE SANTIAGO**

**PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN Y MEDICIÓN DE UN
BIOFILTRO YAKU EN EMPRESA TEXTIL PARA EL
RECICLAJE DE AGUAS AZULES**

Tesis para optar al Título de Ingeniero en Energía y Sustentabilidad Ambiental.

Profesor Guía: Camila Cárdenas
Estudiante: Patricio Reyes

Santiago, Chile
Enero de 2023

© Patricio Andrés Reyes Negrete

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra en cualquier forma, medio o procedimiento sin permiso por escrito del o los autores.

CALIFICACIÓN DE LA MEMORIA.

En Santiago de Chile, el ___ de _____ del 2023, los abajo firmantes dejan constancia que el alumno Marco Antonio Fuentes Pardo, de la carrera Ingeniería En Energía y Sustentabilidad ha aprobado el proyecto de título para optar al título de Ingeniero en Energía y Sustentabilidad Ambiental con una nota de _____.

Camila Cárdenas Calderón

Ariel Valdés Barrera

Agradecimientos

Siento una gratitud enorme al estar en estas instancias, esto sin duda ha sido un trabajo que no ha dependido solo de mi esfuerzo, si no que de todo el entorno que me ha apoyado en seguir creciendo constantemente.

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi profesora guía Camila, quien me ha brindado la oportunidad de seguir creciendo en este difícil camino académico, como también en lo laboral, brindándome herramientas únicas para afrontar esta etapa.

Agradezco a mi madre y mi hermana quienes a pesar de la distancia siempre estuvieron presentes en todo momento,

Fue fundamental el apoyo de Carolina Pizarro, Paulina Villarroel y Andrea Sepúlveda quienes fueron clave en distintas etapas de mi vida académica

A mis amigos, quienes me apoyaron una y mil veces, a mis profesores del colegio, del liceo, como también los de mi formación profesional, al equipo de Yaku Spa, quienes siempre estuvieron ahí, a cada uno de los funcionarios quienes hacen historia en cada persona al formar una comunidad Sebastiana, a mi universidad por brindarme valores de formación personales e íntegros, experiencias, momentos, personas y aprendizajes que jamás olvidaré.

Resumen

Durante el último siglo se han evidenciado los efectos que tiene la industria textil en el mundo, estas últimas contribuyen alrededor del 10% de emisiones de CO₂ a nivel global. Uno de los impactos ambientales es el intensivo consumo hídrico que se presenta durante la confección y teñido de jeans, donde se necesitan 7500 litros de agua para fabricar una sola prenda.

En Chile, la industria textil se aborda desde los tratados de libre comercio, donde la mayor cantidad de prendas es comercializada desde el extranjero. En este contexto, destaca Mohicano Jeans como una empresa nacional que desarrolla jeans más sustentables, para comercializarlos en el país.

El siguiente estudio evalúa la eficiencia de un biofiltro para agua textil provenientes de fábrica de jeans y su posterior reciclaje. Para ello primero se caracterizó y se monitoreó el agua azul resultante del teñido textil de jeans de la fábrica Mohicano Jeans y su recuperación, la segunda etapa fue el diseño de un sistema de pretratamiento y tratamiento mediante el biofiltro Yaku para ser aplicado en el tratamiento del agua textil, y finalmente, se evaluarón los resultados obtenidos para su implementación y posterior reincorporación del agua en el proceso de teñido de jeans, obteniendo resultados de biofiltración superiores al 90% en 13 semanas, brindando así, la oportunidad de generar una eficiencia hídrica mucho mayor en la industria textil nacional.

Abstract

During the last century the effects of the textile industry in the world have been evidenced, the latter contribute about 10% of CO₂ emissions globally. One of the environmental impacts is the intensive water consumption that occurs during the making and dyeing of jeans, where 7500 liters of water are needed to make a single garment.

In Chile, the textile industry is addressed from free trade agreements, where the largest amount of garments is marketed from abroad. In this context, Mohicano Jeans stands out as a national company that develops more sustainable jeans, to market them in the country.

The following study assesses the efficiency of a textile water biofilter from a jeans factory and its subsequent recycling. For this purpose, the blue water resulting from the textile dyeing of jeans from the Mohicano Jeans factory and its recovery was first characterized and monitored, the second stage was the design of a pretreatment and treatment system using the Yaku biofilter to be applied in textile water treatment, and finally, the results obtained for its implementation and subsequent reincorporation of water in the dyeing process of jeans were evaluated, obtaining biofiltration results greater than 90% in 13 weeks, thus providing the opportunity to generate a much greater water efficiency in the domestic textile industry.

Contenido

2. Hipótesis:	11
3. Objetivos	11
3.1 Objetivo general	11
3.2 Objetivos específicos.....	11
4. Marco teórico	12
4.1 Escasez Hídrica, panorama mundial	12
Figura N°1: Indicador de estrés hídrico global.....	13
4.2 Escasez Hídrica, panorama nacional	13
4.3 Reutilización de aguas grises	14
4.4. Composición aguas grises	15
<i>Tabla N°1: Composición aguas grises (Fuente: OMS)</i>	15
<i>Tabla N°2: Fuente aguas grises OMS</i>	16
4.5. Normativa nacional aplicada a las aguas grises	16
<i>Tabla N°3: Requisitos de calidad de aguas grises por tipo de uso</i>	17
4.6. Tratamiento de aguas grises	17
4.7. Biofiltración	18
Figura N°1: Proceso biofiltración	19
4.8. Biofiltración mediante biorreactores	19
4.9. Tecnología chilena de biofiltración: Yaku SPA	20
4.10. Composición y regulación de aguas residuales textiles en Chile	21
4.11. Industria textil en el mundo	22
4.12. Mohicano Jeans	23
Figura N°2: Lavadoras eco friendly implementadas por la empresa Mohicano Jeans.....	24
.....	24
5. Metodología	24
5.1 Caracterización y monitoreo de agua azul resultante del teñido textil de jeans	25
5.1.2.1. Turbidez	25
Figura N°3: Equipo utilizado para medir turbidez	26
5.1.2.2. Espectrofotometría	26

Figura N°4: Sondeo de absorbancia de muestras de agua residual en el espectro de luz blanca	27
27	
5.2 Diseño un sistema de pretratamiento y tratamiento mediante biofiltro Yaku para ser aplicado en el agua textil.	27
5.2.2. Diseño del sistema de biofiltración a escala de laboratorio	28
Figura N°5: Sistema de biofiltración a escala de laboratorio.....	29
Figura N°6: Setting experimental para evaluar la eficiencia de filtración.....	30
Figura N°7: Rótulo de las muestras biofiltradas.....	31
.....	31
6. Resultados.....	33
6.1. Panorama legislativo aguas textiles: requisitos de tratamiento para su recuperación	33
6.3. Adaptación de los microorganismos al agua residual textil	35
Figura N°10: Turbidez (en NTU) al cabo de 4 y 7 días de tratamiento	35
Figura N°11: Imágenes representativas de los resultados de biofiltración durante las primeras semanas	36
<i>Tabla N°7: Resultados remoción turbidez durante las semanas de acondicionamiento.....</i>	<i>36</i>
6.4. Resultados de tiempos largos de tratamiento	37
Figura N°12: Turbidez (en NTU) a tiempos largos de tratamiento durante las primeras 8 semanas.....	37
Tabla N°13: Remoción de Turbidez a tiempos largos de tratamiento	38
6.5. Resultados de tiempos cortos de tratamiento	38
Figura N°13: Turbidez a tiempos cortos de tratamiento durante las semanas 9 a la 13	38
Figura N°14: Turbidez (en NTU) al cabo de 4 y 7 días de tratamiento	39
.....	39
Tabla N°15: Remoción de Turbidez a tiempos cortos de tratamiento	39
6.6. Efecto de la variación de pH sobre la biofiltración	40
Figura N°15: Evolución turbidez inicial vs la final en el matraz R1 durante las 13 semanas del experimento	41
7. Discusión	42
7.4. Propuesta de pilotaje de sistema de biofiltración Yaku de aguas residuales textiles, para su implementación en Mohicano Jeans.....	45
Figura N°16: Diseño del piloto para la implementación del sistema de biofiltración Yaku en Mohicano Jeans	45

7. Conclusiones	47
------------------------------	----

Índice de tablas

Tabla 1. Composición aguas grises (Fuente: OMS).....	15
Tabla 2. Fuente aguas grises OMS	16
Tabla 3: Requisitos de calidad de aguas grises por tipo de uso.....	17
Tabla 4. Grupos experimentales	28
Tabla 5. Nomenclatura frascos nest.....	31
Tabla 6. Comparación de normativas relacionadas a aguas residuales.....	33
Tabla 7. Componentes del agua residual textil provenientes del proceso industrial en Mohicano Jeans.....	34
Tabla 8. Resultados remoción turbidez durante las semanas de acondicionamiento...	36
Tabla 9. Remoción de Turbidez a tiempos largos de tratamiento.....	38

Índice de figuras

Figura 1: Indicador de estrés hídrico global	13
Figura 2: Proceso biofiltración.....	19
Figura 3. Lavadoras eco friendly implementadas por la empresa Mohicano Jeans	24
Figura 4. Equipo utilizado para medir turbidez	26
Figura 5. Sondeo de absorbancia de muestras de agua residual en el espectro de luz blanca.....	27
Figura 6. Sistema de biofiltración a escala de laboratorio	29
Figura 7. Setting experimental para evaluar la eficiencia de filtración	30
Figura 8. Rótulo de las muestras biofiltradas	31
Figura 9. Turbidez (en NTU) al cabo de 4 y 7 días de tratamiento	35
Figura 10. Imágenes representativas de los resultados de biofiltración durante las primeras semanas	36
Figura 11 Turbidez (en NTU) a tiempos largos de tratamiento durante las primeras 8 semanas.....	37
Figura 12. Turbidez a tiempos cortos de tratamiento durante las semanas 9 a la 13 ...	38
Figura 13 Turbidez (en NTU) al cabo de 4 y 7 días de tratamiento	39
Figura 14 Remoción de Turbidez a tiempos cortos de tratamiento	39
Figura 15. Evolución turbidez inicial vs la final en el matraz R1 durante las 13 semanas del experimento	41
Figura 16. Evolución del pH inicial vs pH final en el matraz R1 durante las 13 semanas del experimento	42
Figura 17. Diseño del piloto para la implementación del sistema de biofiltración Yaku en Mohicano Jeans	45

1. Introducción

Actualmente, la industria textil es una de las más contaminantes en el mundo, contribuyendo con una gran cantidad de gases de efecto invernadero, junto con un intensivo consumo hídrico en sus procesos productivo. En nuestro país, se está impulsando la reutilización de aguas residuales, específicamente, aguas grises domésticas provenientes de duchas, lavado de manos y ropa, a través de la Ley 21.075 que busca normar, y establecer las bases de la reutilización de las aguas grises para diferentes usos.

En este contexto, la startup Yaku SpA ha desarrollado un innovador biofiltro en base a microorganismos especializados en la remoción de los contaminantes del agua gris mediante la biofiltración, permitiendo la reutilización de aguas grises cumpliendo con los parámetros de calidad exigidos por la normativa. La empresa cuenta con sistemas instalados en 3 regiones del país, con tamaños desde los 500L hasta los 8000L. La empresa cuenta con las capacidades para desarrollar nuevas mezclas de microorganismos para filtrar otro tipo de aguas residuales, tales como, aguas del proceso de teñido de jeans.

Por su parte, Mohicano Jeans es una empresa dedicada a la confección y comercialización de jeans nacionales, buscando entregar un sello de sustentabilidad a sus productos. Para lograr reducir su huella hídrica, la empresa requiere un sistema de tratamiento eficiente en remoción de contaminantes, que permita reutilizar el agua del proceso.

En este contexto, en el presente trabajo se abordará el reciclaje de aguas residuales provenientes desde el proceso de teñido de jeans de la empresa Mohicano Jeans, como una propuesta para ahorrar en el consumo de agua y reducir el impacto ambiental de esta actividad productiva. Para ello, durante 12 semanas se realizó muestreo de las aguas provenientes de la fábrica, se caracterizó su composición inicial, y luego se realizaron testeos de la eficiencia del biofiltro Yaku para la remoción de contaminantes de aguas residuales textiles en distintos tiempos de tratamiento, para evaluar la factibilidad de implementación de la tecnología en un sistema de reciclaje de aguas en la planta de Mohicano Jeans.

2. Hipótesis:

La utilización de un filtro de aguas grises para el tratamiento de aguas de la confección de jeans permitirá generar la reutilización de agua proveniente de la industria textil.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Evaluar la eficiencia de un biofiltro Yaku para agua textil provenientes de la confección de jeans para su reciclaje.

3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar y monitorear el agua azul resultante del teñido textil de jeans en la empresa Mohicano
- Diseñar un sistema de pretratamiento y tratamiento mediante biofiltro Yaku para ser aplicado en el agua textil.
- Evaluar los resultados de biofiltración obtenidos para la implementación del reciclaje del agua en el proceso de teñido de jeans.

4. Marco teórico

4.1 Escasez Hídrica, panorama mundial.

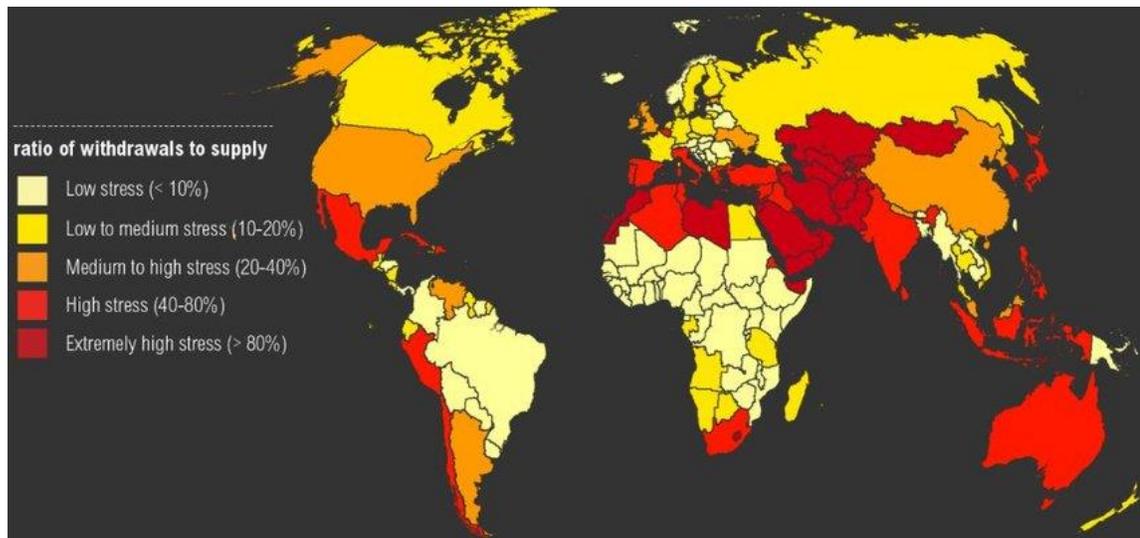
La escasez hídrica es un problema creciente en todo el mundo, y afecta a numerosas regiones de manera diferente. Según el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD, 2018), "la escasez de agua es una de las principales amenazas para el desarrollo sostenible y la seguridad alimentaria en todo el mundo".

El cambio climático es una de las principales causas de la escasez hídrica en distintas partes del mundo. Según el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, 2019), "el cambio climático está afectando la cantidad y la distribución de la disponibilidad de agua en todo el mundo, lo que a su vez está afectando a la agricultura, el desarrollo urbano y la salud humana". Otras causas de la escasez hídrica incluyen la sobreexplotación de los recursos hídricos, la falta de políticas públicas adecuadas para gestionar adecuadamente los recursos hídricos, y la contaminación de los cuerpos de agua.

Lamentablemente, entre el 80–90% del agua residual no se recoge ni se trata en los países en vías de desarrollo, (Corcoran *et al.*, 2010; WWAP, 2017). Peor aún, el agua residual no tratada es una importante fuente de gases de efecto invernadero. De hecho, se calcula que las instalaciones hídricas y de aguas residuales son las causantes de entre 3–7% de las emisiones de gases de efecto invernadero (Trommsdorf, 2015), pero estas estimaciones no incluyen las emisiones asociadas al vertido de las aguas residuales no tratadas.

Diversos organismos y agencias internacionales especializadas han señalado que el agua dulce y los recursos hídricos se hacen cada vez más escasos, como consecuencia del aumento en su demanda por el crecimiento de la población, del desarrollo económico-social y los efectos del cambio climático.

Figura 1: Indicador de estrés hídrico global



(Fuente: Reig et al., 2013)

4.2 Escasez Hídrica, panorama nacional.

La escasez hídrica es un problema importante en Chile, que es reconocido como uno de los 30 estados con mayor estrés hídrico (WRI,2015). Esto especialmente en regiones como el Norte y el Centro del país, donde se ha registrado una sequía prolongada en los últimos años. De hecho, el país ha experimentado una "grave escasez hídrica" desde el año 2014 (Ministerio de Energía de Chile, 2020). Esto se traduce en que más del 50% de las comunas del país se encuentra bajo decreto de escasez hídrica. Estas 188 comunas, en las cuales habitan más de 8 millones 350 mil personas (47.5% de la población de Chile) se encuentran en las regiones de Atacama, Coquimbo, Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins, Maule, Los Ríos, Los Lagos y Aysén, abarcando 9 de las 16 regiones, equivalente a un tercio de la superficie del territorio nacional (231.056 km²) (MOP, 2022).

De acuerdo con la información reportada por la Superintendencia de Servicios Sanitarios, el consumo de agua potable promedio por cliente al mes en zonas urbanas concesionadas ha representado una tendencia a la baja, estimando un consumo promedio en 2020 de 17,4 m³ mensuales. Peor aún, una proporción importante de la población no tiene acceso a este elemento vital para el ser humano y lo que está disponible, muchas veces está contaminado por usos industriales, mineros y por las actividades humanas en general. (Superintendencia de servicios sanitarios, 2020)

Debido al aumento en el consumo de agua en los últimos 30 años, para cubrir las necesidades de los diferentes rubros económicos, se han generado situaciones de conflictividad por su disponibilidad para el abastecimiento humano al interior de varias cuencas del país, especialmente rurales entre las regiones de Tarapacá y Los Lagos, donde ha sido necesario atender severas emergencias de suministro de agua potable a la población por medio de un sistema basado en camiones aljibe, lo cual constituye una solución de alto costo para el país (Rodríguez, 2020).

Si bien la sequía ha afectado principalmente a las zonas rurales y agrícolas, también ha tenido un impacto negativo en la economía del país, poniendo en riesgo otras actividades productivas que dependen del consumo de agua. Por ende, es fundamental que la industria en Chile implemente soluciones para hacer más eficiente el uso de agua en sus procesos.

4.3 Reutilización de aguas grises

Las aguas residuales domésticas, o "aguas residuales", pueden dividirse en dos categorías: las aguas negras que proceden de los retretes y las cocinas, las cuales tienen una contaminación coliforme fecal grave y generalmente tienen altas concentraciones de materia orgánica; y aguas grises que proceden de baños y lavanderías, estas últimas constituyen el mayor flujo de aguas residuales (OMS, 2016). En otras palabras, las aguas grises son aquellas que se generan en la vivienda y que no son negras (procedentes del inodoro) ni grasas (provenientes de lavaplatos). Estas aguas grises pueden incluir el agua de duchas, lavadoras y lavamanos.

Por su parte, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) define el agua gris como el agua que se ha utilizado para fines domésticos y que ha sido tratada para eliminar contaminantes pero que todavía contiene sustancias químicas y nutrientes que pueden ser perjudiciales para el medio ambiente si se vierten sin tratar (EPA, 2012). Por ende, la reutilización de aguas grises requiere tratarlas y filtrarlas para eliminar los contaminantes y hacerlas aptas para su uso posterior. Algunos posibles usos de las aguas grises tratadas son:

- Regar jardines y plantas
- Usar en el inodoro como descarga parcial
- Usar en la industria (para enfriamiento, limpieza, etc.)

La reutilización convierte el gasto en tratamientos en una inversión productiva, pues en lugar de desechar el agua gris, es posible retornar al proceso productivo una fracción de ésta para que sea acondicionada apropiadamente para su reutilización; este hecho tiene un efecto benéfico desde el punto de vista del consumo de agua potable; siendo así que, al reusar el agua gris tratada, las necesidades de entrada al proceso disminuyen y también la cantidad descargada a la red pública (Espinal *et al.*, 2014).

4.4. Composición aguas grises

Actualmente se definen varios criterios dependiendo del país respecto a la composición y parámetros de las aguas grises, en base a normativa internacional y bajo el respaldo de la Organización Mundial de la Salud (OMS), se define una composición, como también límites permisivos.

Tabla 1. Composición aguas grises (Fuente: OMS)

Parámetros	Unidad	Rango
Sólidos suspendidos	mg/L	45-330
Turbidez	NTU	22-200
DBO ₅	mg/L	90-290
Nitrito	mg/L	<0.1 - 0.8
Amonio	mg/L	<0.1-25.4
Nitrógeno total	mg/L	2.1-31.5
Fósforo total	mg/L	0.6-27.3
Sulfato	mg/L	7.9-110
pH	-	6.6-8.7
Conductividad	mS/cm	325-1140
Sodio	mg/L	29-230

Fuente:(Jeppesen, 1994)

Tabla 2. Fuente aguas grises OMS

Fuente de agua gris	Posibles contaminantes
Lavadora	Sólidos suspendidos (suciedad, pelusa), material orgánico, aceite y grasa, cloro, sodio, nitratos y fosfatos del detergente, aumento de la salinidad y el pH
Lavavajillas	Material orgánico y sólidos en suspensión (de los alimentos), bacterias, aumento de la salinidad y el pH, grasas, aceites y grasas, detergente.
Lavamanos y ducha	Bacterias, cabello, material orgánico y sólidos en suspensión (piel, partículas, pelusa), aceite y grasa, residuos de jabón y detergente.
Lavaplatos	Bacterias, materia orgánica y sólidos en suspensión (partículas de alimentos), residuos de grasa, aceite y grasa, jabón y detergente

(OMS, 2006)

4.5. Normativa nacional aplicada a las aguas grises

En Chile, la normativa para el manejo y tratamiento de las aguas grises (también conocidas como aguas servidas o aguas residuales domésticas) está establecida por la Dirección General de Aguas (DGA) del Ministerio de Obras Públicas (MOP). En el año 2018 se promulgó la ley 21.075, donde se regula la reutilización de las aguas grises, definiendo límites y parámetros para la instalación de sistemas de tratamiento.

En el Proyecto de Reglamento de esta ley, se establecen los requisitos y estándares para el tratamiento, reutilización y disposición final de las aguas grises, y también incluye lineamientos necesarios para la construcción y operación de sistemas de tratamiento de aguas grises. La normativa también establece límites máximos permitidos para ciertos contaminantes presentes en las aguas grises y requiere que las aguas grises tratadas cumplan con ciertos niveles de calidad antes de ser descargadas al medio ambiente.

Dentro de los parámetros que se utilizan para determinar la calidad del agua se encuentran la demanda biológica de oxígeno, la turbidez del agua, y la cantidad de cloro contenida, para así ser dispuesta finalmente a regadío de especies que no sean hortalizas y tubérculos, y descargas de baño (Biblioteca del Congreso de Chile, 2018). Esta normativa se aplica a todas las actividades relacionadas con el manejo y tratamiento de las aguas grises en Chile, incluyendo a las industriales, comerciales y residenciales.

Tabla 3: Requisitos de calidad de aguas grises por tipo de uso

Parámetro	Unidad	Urbano		Ornamental
		Límite máximo	Límite máximo (riego Superficial)	Límite máximo
DBO ₅	mg/l	10	30	70
SST	mg/l	10	30	70
CF	UCF/100 ml	10	200	1000
Turbiedad	NTU	5	10	30
Cloro libre residual	mg/l	$0,5 \leq x < 2$	$0,5 \leq x < 2$	----

(Biblioteca del Congreso de Chile, 2018)

4.6. Tratamiento de aguas grises

Las aguas grises son aquellas que han sido utilizadas para actividades domésticas, como ducharse, lavar platos o ropa, y que contienen contaminantes biodegradables. En Chile, algunos de los tratamientos comunes para las aguas grises incluyen:

Según la Subsecretaría de Medio Ambiente de Chile, las aguas grises son "las aguas que han sido utilizadas en los procesos de vida y que han sido tratadas en parte, pero que todavía contienen contaminantes en cantidades superiores a las permitidas para el uso directo sin tratamiento adicional". Estas aguas pueden incluir, por ejemplo, el agua de lavado de manos y el agua de duchas. (MMA, 2018)

- Filtros de arena: son sistemas que utilizan arena y grava para filtrar las partículas sólidas y eliminar la materia orgánica.
- Fosas sépticas: son tanques subterráneos donde se acumula la materia orgánica de las aguas grises y se deja que se descomponga mediante el proceso de biodigestión anaerobia.

- Lodos activados: son sistemas que utilizan bacterias para oxidar la materia orgánica y convertirla en gas metano y dióxido de carbono.
- Plantas de tratamiento de aguas grises: son instalaciones que utilizan procesos químicos y biológicos, tales como la biofiltración, para eliminar contaminantes y purificar las aguas grises antes de que sean descargadas al cuerpo receptor.

Es importante tener en cuenta que las aguas grises deben ser tratadas adecuadamente antes de ser descargadas al medio ambiente, ya que de lo contrario pueden contaminar ríos, mares y acuíferos y afectar la salud humana y el medio ambiente.

4.7. Biofiltración

La biofiltración es una técnica que utiliza plantas o microorganismos para purificar o filtrar el agua. Es una forma natural y sostenible de tratar y eliminar contaminantes del agua, y puede ser utilizada como una alternativa o un complemento a los métodos tradicionales de tratamiento de residuos.

Algunos ejemplos de biofiltración son:

- Utilizar plantas para absorber contaminantes del aire en espacios interiores o exteriores, como en oficinas, edificios públicos, hogares, etc.
- Utilizar bacterias o microorganismos para eliminar contaminantes del agua, como nitratos, fosfatos, metales pesados, etc. Esto se puede hacer en sistemas de tratamiento de agua o en sistemas de purificación de agua en el hogar.
- Utilizar hongos o bacterias para biodegradar y eliminar residuos sólidos, como en vertederos controlados o en sistemas de tratamiento de residuos.

La biofiltración es un método biológico depurador de aguas en el cual el agua es tratada con organismo aeróbicos, en la cual la remoción de los contaminantes se genera a través de una biomasa con microorganismos que van produciendo y actuando en un biorreactor. (HERNANDEZ, 2019)

Figura 2: Proceso biofiltración



4.8. Biofiltración mediante biorreactores

Un biorreactor es un dispositivo o sistema diseñado para sostener y controlar el crecimiento y la actividad de células microbianas o animales, y para promover la producción de productos químicos o biomoléculas de interés. Los biorreactores se utilizan comúnmente en la industria alimentaria, química y farmacéutica para producir alimentos, productos químicos y medicamentos

Los biorreactores pueden ser de dos tipos: sólidos o líquidos. Los biorreactores sólidos se basan en el crecimiento de células en un medio sólido, mientras que los biorreactores líquidos utilizan un medio líquido para el crecimiento de células. Los biorreactores pueden ser también de dos tipos: anaerobios y aerobios. Los anaerobios no necesitan oxígeno para funcionar, mientras que los aerobios sí lo necesitan.

Los biorreactores pueden tener diferentes formas y tamaños, desde pequeños laboratorios hasta grandes plantas industriales. Están diseñados para proporcionar un ambiente controlado y adecuado para el crecimiento y la producción de productos de interés, y pueden incluir sistemas de control y

monitoreo para mantener las condiciones óptimas para el crecimiento de las células (Fang, H. H., & Chen, W. J. 2010)

En el caso particular de la biofiltración de aguas mediante biorreactores, una de las tecnologías más eficientes es el uso de reactores biológicos de lecho móvil. El principio básico del proceso de lecho móvil es el crecimiento de la biomasa en soportes plásticos que se mueven en el reactor biológico mediante la agitación generada por sistemas de aireación (reactores aerobios) o por sistemas mecánicos (en reactores anóxicos o anaerobios) (Leyva Díaz, 2015). La ventaja de este sistema radica en su alta eficiencia en la remoción de contaminantes, con bajos consumos energéticos para el funcionamiento del biorreactor.

Respecto a la ingeniería del proceso de biofiltración en reactores de lecho móvil, el sistema de aireación puede estar formado por una parrilla de tubos perforados de acero inoxidable que evita problemas de pérdida de eficiencia, cambio de difusores, entre otros. En cuanto al proceso de separación de la biomasa de microorganismos procedente del reactor biológico. Por otra parte, y aunque inicialmente comenzaron a emplearse en aguas residuales industriales, también se pueden utilizar sistemas de flotación para la separación en el tratamiento de aguas residuales urbanas. Además, suele ser cada vez más habitual utilizar tecnología de membranas a continuación del reactor biológico. (Larrea *et al.*, 2007).

4.9. Tecnología chilena de biofiltración: Yaku SPA

Yaku SpA es una startup de base científica-tecnológica que ha desarrollado un innovador biofiltro para la reutilización sustentable del agua gris y aguas residuales industriales. Yaku apunta a ser una iniciativa pionera en la reutilización sustentable del agua, implementando su tecnología con patente de invención PCT solicitada (PCT/CL2022/050078), para responder a la crisis hídrica que afecta al territorio nacional y al mundo entero.

En Yaku se desarrolló un innovador biofiltro para la reutilización del agua gris y residual, disminuyendo hasta un 70% el consumo de agua potable. El biofiltro purifica el agua de manera simple, natural y sustentable, con alto nivel de purificación. Permite darle un uso circular al agua, reutilizándola en riego, descarga de inodoro y otras aplicaciones. Utiliza mínimo espacio y se adapta a cualquier inmueble. Además de la tecnología, Yaku ofrece un servicio integral de diseño del sistema, instalación y mantención.

El biofiltro se basa en una mezcla de microorganismos ambientales muy fáciles de crecer y escalar. Se optimizó el proceso de producción, innovando en el

método de crecimiento, lo cual es parte de la solicitud de patente PCT. Esto ha permitido reducir el tiempo de fabricación y los costos y aumentar la eficiencia del proceso. La empresa cuenta con el *know-how* para reproducir a estos microorganismos en cualquier parte del mundo, facilitando su internacionalización y la expansión comercial internacional.

Además, se ha estandarizado la cantidad de microorganismos que se requieren por volumen de agua a tratar. Es decir, se instalan tantos microorganismos como volumen de agua se busca tratar, según los requerimientos del cliente. Los microorganismos se adaptan a todo tipo de condiciones ambientales, pudiendo aplicarse en distintas regiones. Esta capacidad ha permitido incluso filtrar distintos tipos de aguas residuales, entre las que se encuentran las aguas "azules" textiles, provenientes de la empresa Mohicano Jeans, a partir de testeos preliminares en el laboratorio. Por ende, ambas empresas en conjunto buscan testear el uso del biofiltro Yaku para la remoción de contaminantes de estas aguas, como una solución que permita la reutilización de aguas en el proceso de confección de jeans.

4.10. Composición y regulación de aguas residuales textiles en Chile

Las aguas textiles son un subproducto de la industria textil y se producen durante el procesamiento de la fibra textil y la producción de tejidos y prendas de vestir.

La composición de las aguas textiles puede variar significativamente dependiendo de la fuente de la que proceden y de los procesos de producción a los que han sido sometidas. Las aguas textiles pueden contener una amplia variedad de sustancias, tales como: productos químicos utilizados en el proceso de teñido, materiales de origen natural como fibras de algodón y fibras sintéticas para las fibras textiles, residuos de productos de cuidado personal y otros contaminantes.

Según el Ministerio de Medio Ambiente de Chile (2019), las aguas textiles pueden contener "productos químicos utilizados en el proceso de teñido y acabado de textiles, productos de cuidado personal, fibras textiles y otras sustancias". También pueden contener metales pesados y otros contaminantes tóxicos que pueden ser perjudiciales para el medio ambiente y la salud humana si se vierten sin tratar.

Según el artículo "Characteristics and treatment of textile wastewater" de R. Naidu y K. Marcus (2002), las aguas textiles también pueden contener bacterias

y patógenos que pueden ser perjudiciales para el medio ambiente y la salud humana si no se tratan adecuadamente antes de su descarga.

En este contexto, en nuestro país la normativa para el manejo y tratamiento de las aguas textiles está establecida por la Dirección General de Aguas (DGA) del Ministerio de Obras Públicas (MOP). Dicha normativa establece los requisitos y estándares para el tratamiento y disposición final de las aguas textiles y también incluye regulaciones sobre la construcción y operación de sistemas de tratamiento de aguas textiles. Además, la normativa regula los límites máximos permitidos para ciertos contaminantes presentes en las aguas textiles, y las aguas textiles tratadas deben cumplir con ciertos niveles de calidad antes de ser descargadas al medio ambiente.

4.11. Industria textil en el mundo

Según la United Nations Climate Change News (2018) el sector industrial textil genera el 20% del desperdicio total de agua a nivel mundial a causa de los productos de teñido y acabado de estos últimos. (Peces, 2020).

La contaminación textil se refiere a la contaminación ambiental que resulta del procesamiento, producción y disposición final de los productos textiles. El procesamiento de la ropa puede generar una gran cantidad de residuos tóxicos y contaminantes, como productos químicos, tintes y fibras sintéticas. Además, la producción masiva de ropa a gran escala ha contribuido a la sobreexplotación de recursos naturales, como el agua, y ha llevado a la degradación del suelo y la deforestación en algunas áreas.

La disposición final de la ropa también genera un impacto negativo, ya que a menudo se envía a vertederos o se quema, lo que puede liberar contaminantes a la atmósfera. Además, mucha ropa acaba siendo exportada a países en desarrollo donde puede ser difícil gestionar adecuadamente los residuos textiles.

Por su parte, el intensivo consumo hídrico que se presenta durante la confección y teñido de jeans se traduce en uno de los mayores impactos negativos de esta actividad productiva. Como ejemplo, se necesitan 7500 litros de agua para fabricar una sola prenda de jeans. Estas aguas residuales, que pueden denominarse aguas residuales textiles, son el líquido resultante del procesamiento de los productos textiles, como la ropa, y pueden contener una amplia variedad de contaminantes, como productos químicos, tintes y fibras sintéticas. Estos contaminantes específicos, dificultan la posibilidad de reutilizar estas aguas en el proceso textil. (MMA, 2019)

4.12. Mohicano Jeans

Mohicano Jeans es una empresa chilena que confecciona y comercializa jeans en Chile, con más de dos décadas en el mercado. Desde sus inicios se ha destacado por confeccionar vestuario femenino, específicamente jeans. Impone moda y tendencias, entregando un concepto en el vestir y una pieza única a sus clientas. La empresa se distingue por dar un sello de sustentabilidad a sus productos, por lo cual realizan la búsqueda constante para disminuir o mitigar el impacto ambiental que generan.

Dentro de los proyectos medioambientales realizados en la empresa Mohicano Jeans, destacan:

- Uso de paneles fotovoltaicos para la planta ubicada en Recoleta
- Teñido de prendas con compuestos orgánicos reciclados.
- Inversión en máquinas *ecofriendly*, que permiten reducir la huella hídrica de la confección de jeans a 70L por prenda.
- Nano burbujas para reducir la cantidad de agua utilizada en lavadoras (60% ahorro) (Figura 3).

Figura 3. Lavadoras eco friendly implementadas por la empresa Mohicano Jeans



Fuente: Mohicano Jeans

5. Metodología

Ante los antecedentes previamente mencionados, el presente trabajo consiste en una propuesta para evaluar la factibilidad de utilizar un biofiltro Yaku de aguas grises para el tratamiento de aguas residuales textiles provenientes de la empresa Mohicano Jeans, para ser posteriormente implementado como una solución para el reciclaje de aguas en el proceso de confección de jeans.

En el trabajo de 12 semanas se realizó muestreo de las aguas provenientes de la fábrica para caracterizar su composición inicial. Posteriormente se realizaron tests de la eficiencia del biofiltro Yaku para la remoción de contaminantes de aguas residuales textiles provenientes de la fábrica, en distintos tiempos de tratamiento, para evaluar la factibilidad de implementación de la tecnología en un sistema de reciclaje de aguas en la planta de Mohicano Jeans.

5.1 Caracterización y monitoreo de agua azul resultante del teñido textil de jeans

5.1.1. Toma de muestras en fábrica

Desde mayo de 2022, se retiró agua proveniente del proceso de teñido de jeans en la empresa Mohicano Jean para medir sus parámetros en el laboratorio de Yaku, ubicado en Hub Providencia.

La fábrica de Mohicano, está orientada al área de teñido textil, donde las telas que importa pasan a lavadoras industriales eco-friendly, que luego generan la descarga de agua residual textil a un pozo de acumulación a nivel subterráneo, donde las aguas decantan para su posterior descarga final al alcantarillado.

5.1.2. Caracterización de las muestras de agua residual de la fábrica

Las muestras de agua residual textil tomadas desde la fábrica, fueron analizadas en el laboratorio de Yaku. Para ello, se tomaron muestras de 50ml del agua residual textil, para realizar la siguiente caracterización:

- Observación y toma de imágenes de la muestra de agua residual
- Medición de parámetros de calidad de agua: turbidez, cloro, TDS y pH.
- Medición de intensidad del colorante azul mediante espectrofotometría

A continuación, se detalla el procedimiento para la medición de turbidez y de colorante índigo, los cuales son los parámetros que permitirán determinar qué tan efectiva es la remoción de los contaminantes del agua mediante el biofiltro Yaku.

5.1.2.1. Turbidez

La turbidez es una medida indirecta de la cantidad de partículas suspendidas en el agua. En sí, la turbidez es una medida de cuánto la luz se dispersa y absorbe por las partículas presentes en el agua. La turbidez se suele medir en unidades de forma, como NTU (unidades nefelométricas de turbidez) o FTU (unidades de forma de turbidez). Una mayor turbidez indica una mayor cantidad de partículas en el agua, mientras que una menor turbidez indica una menor cantidad de partículas. (Simon, T.D. 2002)

Figura 4. Equipo utilizado para medir turbidez



Turbidímetro VELP

Turbidímetro HANNA

En el presente trabajo, todas las mediciones se realizaron en NTU, utilizando los turbidímetros mostrados en la Fig. 4 El uso de ambos equipos permitió validar los datos, obteniéndose un valor promedio de las mediciones realizadas con ambos turbidímetros. Para ello, se introducen 10ml de la muestra en frascos de vidrio específicos para cada equipo, y se realiza la lectura en el turbidímetro correspondiente. Para descartar variabilidad en el equipo, se midió 3 veces la misma muestra, obteniéndose un promedio de las 3 mediciones para registrar el valor de NTU obtenido en la bitácora.

5.1.2.2. Espectrofotometría

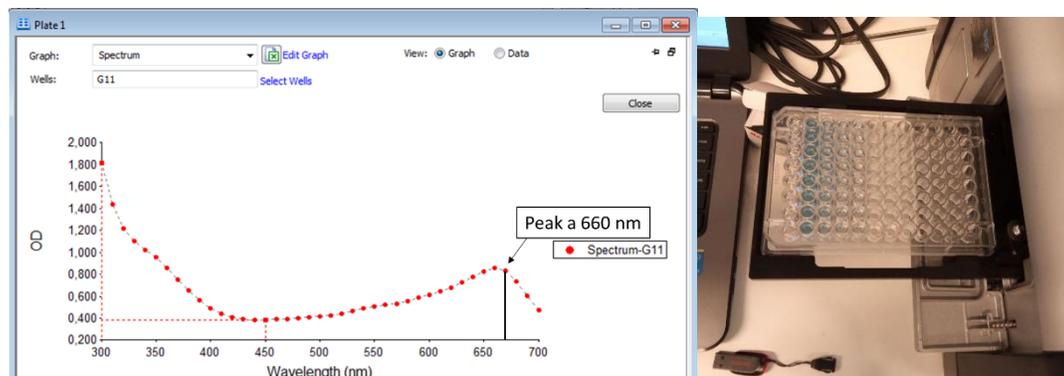
La espectrofotometría es un método analítico que se utiliza para medir la concentración de una sustancia química en una solución acuosa. Se basa en la absorción de la luz por parte de la solución. El instrumento utilizado se llama espectrofotómetro y mide la cantidad de luz que es absorbida por la solución en diferentes longitudes de onda del espectro de luz blanca. (American Chemical Society. (2000)

La espectrofotometría en aguas textiles se utiliza en el análisis de colorantes y auxiliares de proceso, como las sales de mordiente y suavizantes, en la industria textil. También se puede utilizar para controlar la calidad del agua utilizada en el

proceso de fabricación de textiles y para evaluar la efectividad de los tratamientos de agua utilizados para eliminar los contaminantes.

En el presente trabajo, se utilizó espectrofotometría para medir la intensidad del colorante índigo, para caracterizar la composición de la muestra. Para ello, se realizó primero un sondeo, donde se somete la muestra a un haz de luz blanca, para medir la absorción de la muestra en todas las longitudes de onda. Así, se vio que la mayor absorbancia o peak de la curva de absorbancia se obtiene a 660nm, permitiendo determinar que las mediciones del colorante deben realizarse a esa longitud de onda (Fig. 5).

Figura 5. Sondeo de absorbancia de muestras de agua residual en el espectro de luz blanca



5.2 Diseño un sistema de pretratamiento y tratamiento mediante biofiltro Yaku para ser aplicado en el agua textil.

5.2.1. Diseño del pre-tratamiento

A partir de trabajo preliminar realizado en el laboratorio, realizando análisis de las muestras de agua residual textil, se determinó la necesidad de realizar un pretratamiento de las muestras, mediante un filtro mecánico o por tamaño de partícula, que permitiera medir la turbidez inicial de las muestras.

En la escala pequeña de laboratorio, fue necesario pre-filtrar el agua proveniente del teñido, utilizando un pre-filtro de partículas. Para ello se usaron *cell strainer* de 100µm para retener partículas de hasta 100µm, permitiendo obtener una muestra libre de partículas grandes en suspensión.

Para la escala de implementación en la planta, en paralelo al trabajo de la presente tesis, alumnos de diseño UC desarrollaron una propuesta de pre-filtro para ser usado a gran escala, como complemento al tratamiento del biofiltro Yaku.

5.2.2. Diseño del sistema de biofiltración a escala de laboratorio

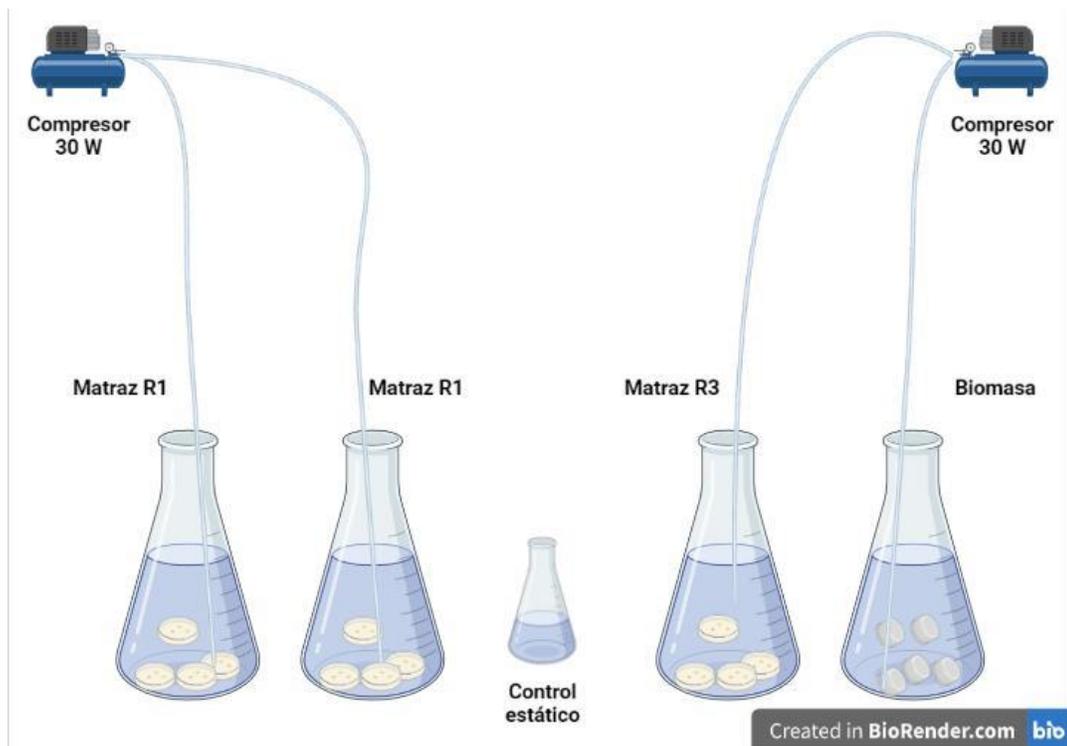
Para evaluar la eficiencia del tratamiento del biofiltro Yaku para aguas residuales textiles, se diseñó un sistema de matraces en los cuales se simula el proceso de biofiltración a una escala más pequeña (8 litros en total).

El sistema a escala de laboratorio consiste en 4 matraces Erlenmeyer de 2 litros cada uno, y un matraz pequeño de 500 ml, los cuales contienen lo siguiente:

Tabla 4. Grupos experimentales

N°	Nombre matraz	Volumen	Condición experimental
1	Réplica 1	2 litros	Biofiltro Yaku que contiene microorganismos y aireación
2	Réplica 2	2 litros	Biofiltro Yaku que contiene microorganismos y aireación
3	Réplica 3	2 litros	Biofiltro Yaku que contiene microorganismos y aireación
4	Control biomasa	2 litros	Sustrato sin microorganismos, con aireación
5	Control estático	0,5 litros	Agua estancada sin microorganismos, sin aireación

Figura 6. Sistema de biofiltración a escala de laboratorio



Matraces Yaku (Elaboración propia, biorender.com)

En este caso, R1, R2 y R3 son réplicas biológicas, es decir, los 3 matraces contienen la misma cantidad de microorganismos filtradores de agua de la empresa Yaku, por lo que se espera que se comporten de forma similar en el tiempo. En paralelo, existen dos matraces que representan un control de las variables experimentales: el matraz control “Biomasa” que contiene bioportadores (sustrato) vacíos sin microorganismos, para evaluar el efecto de la aireación del agua sin microorganismos; y el matraz “Control estático”, para comparar el estado del agua almacenada sin tratamiento.

5.3 Evaluar los resultados obtenidos para su implementación y posterior reincorporación del agua en el proceso de teñido de jeans

5.3.1. Condiciones del experimento

Para evaluar la eficiencia del tratamiento del biofiltro Yaku en la remoción de contaminantes de aguas residuales textiles, se implementó el sistema de biofiltración a escala de laboratorio diseñado en el Objetivo Específico N°2. Para la puesta en marcha del experimento, las muestras de agua residual tomadas en

bidones de 3L fueron distribuidas en los correspondientes matraces (R1, R2, R3, Biomasa o control estático), tal como se muestra en la Figura 7.

Figura 7. Setting experimental para evaluar la eficiencia de filtración



Matraces Yaku (Elaboración propia)

El ciclo de un experimento fue el siguiente:

- Día 0 (D0): primer día del experimento, en que se mide el agua residual textil tal como se encontraba en el pozo de almacenamiento en la fábrica. De esta forma, las mediciones del “DO” corresponden al punto de partida del experimento en cuanto a la calidad del agua.
- Días 1 al 7 (D1 y D7): el agua residual textil inicial se distribuye en los matraces (biofiltros y controles) y es incubada durante esa cantidad de días bajo las condiciones de cada matraz, para evaluar la evolución de la calidad de agua debido a cada condición (con o sin microorganismos, con o sin aireación).

El experimento se repitió durante 13 semanas, por un lado, para aclimatar a los microorganismos y adaptarlos a tiempos cada vez más cortos de tratamiento, y por otro lado, para evaluar la replicabilidad de los resultados en el tiempo. Para

mantener un, estándar para identificar las muestras, se utilizó la siguiente nomenclatura en los rótulos de las muestras y los respectivos resultados:

Tabla 5. Nomenclatura frascos nest

Nombre de muestra:	R1 - R2 - R3 - Control Estático - Biomasa
Tiempo de tratamiento	D0 Tratamiento - D1 - D2 - D3 ... D7.,
Semana experimento:	Semana 0, - 1 - 2 - 3 ... 13.
Fecha muestreo	Fecha de la muestra

Figura 8. Rótulo de las muestras biofiltradas



Tubos etiquetados.

5.3.2. Caracterización de las muestras de agua residual biofiltradas en laboratorio

Las muestras de agua residual textil biofiltradas en los matraces R1, R2 y R3, o las aguas incubadas en otras condiciones (control estático y biomasa), fueron analizadas en el laboratorio de Yaku. Para ello, se obtiene la muestra mediante

una pipeta serológica, la cual pasa a un tubo de 50 ml donde se filtra la muestra mediante un “*cell strainer*”, el cual retiene partículas superiores a 100µm. Luego, las muestras fueron rotuladas y caracterizadas al igual que las aguas residuales iniciales (D0):

- Observación y toma de imágenes de la muestra de agua residual
- Medición de parámetros de calidad de agua: turbidez, cloro, TDS y pH.
- Medición de intensidad del colorante azul mediante espectrofotometría

Para realizar seguimiento al experimento y los resultados generados a diario, se realizó una bitácora, donde se llevó el registro visual de las muestras, junto con observaciones respecto a las condiciones experimentales y los parámetros de calidad medidos. En paralelo, se realizó una planilla de seguimiento de los resultados de calidad de agua medidos semanalmente, que permitió visualizar gráficamente la calidad de la biofiltración y analizar los datos cuantitativos.

5.3.3. Análisis de los resultados

Todos los experimentos fueron realizados con 3 réplicas biológicas (R1, R2, R3), y fueron además repetidos semanalmente para evaluar la replicabilidad de los resultados. Los datos cuantitativos obtenidos en la medición de parámetros de calidad de agua (turbidez, pH y TDS) fueron registrados y analizados en el software Excel.

En cuanto a la interpretación de resultados, por ejemplo, si se observa una disminución significativa de la turbidez después de la biofiltración, indica que la biofiltración ha sido efectiva en eliminar los contaminantes y purificar el agua. Por ende, la visualización gráfica de los resultados de turbidez y pH permitió analizar la evolución de estos parámetros en el tiempo, tanto semanalmente (cada ciclo experimental) como a lo largo de todo el experimento (las 13 semanas del trabajo de tesis presentado).

6. Resultados

6.1. Panorama legislativo aguas textiles: requisitos de tratamiento para su recuperación

Para establecer el marco legislativo en Chile para la reutilización de aguas residuales industriales, se realizó una búsqueda de las distintas normativas vigentes, relacionadas al tratamiento y disposición de aguas residuales. En base a la normativa revisada, se pudo comprobar la inexistencia de una regulación específica para aguas textiles, se realizó comparativa para descarga de aguas grises en la cual se constató su tratamiento previo, instalaciones y su descarga, las cuales comparten similitudes en su composición.

Tabla 6. Comparación de normativas relacionadas a aguas residuales

Ley	Descripción
Ley N° 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente (2005)	Esta ley establece las bases y principios para la protección y conservación del medio ambiente, incluyendo el agua.
Ley N° 19.551 sobre la Gestión Integral del Agua (2009)	Esta ley establece las bases para la gestión integrada del agua en Chile, incluyendo el uso y conservación del recurso.
Decreto N° 391	Establece los requisitos técnicos y ambientales para el tratamiento y disposición final de las aguas residuales industriales (2003): Este decreto establece las normas para el tratamiento y disposición final de las aguas residuales industriales, incluyendo el sector textil.
Ley 21.075 sobre la reutilización de aguas grises	Establece los parámetros y normas para recolección y tratamiento de aguas grises, en las áreas urbanas y rurales, para fines de interés público en el riego de áreas verdes, parques o centros deportivos públicos.

6.2. Caracterización de agua azul resultante del teñido textil de jeans

El agua residual proveniente del proceso industrial de la confección, teñido y desteñido de jeans que se realiza en Mohicano Jeans contiene una serie de componentes químicos, los cuales son añadidos en alguna de las fases del proceso como desinfectantes, conservantes, oxidantes, entre otros. A partir de la investigación, se pudo obtener los principales componentes que contienen sus aguas residuales de Mohicano Jeans, los cuales se detallan en la Tabla N°7.

Tabla 7. Componentes del agua residual textil provenientes del proceso industrial en Mohicano Jeans.

Componente	Función
Hipoclorito de sodio	Blanqueador, desinfectante, remueve residuos durante la producción de textiles.
Metabisulfito de sodio	Blanqueador, conservante para evitar oxidación de fibras textiles, como también desinfectante para eliminar bacterias, virus y hongos presentes en telas
Permanganato de potasio	Se utiliza como oxidante para blanquear y decolorar fibras textiles, especialmente en el proceso de teñido. También se utiliza para eliminar manchas y suciedad de las fibras, y para prevenir la degradación de las fibras durante el proceso de blanqueo.
Peróxido de hidrogeno	Se utiliza como un oxidante débil y como un blanqueador suave para teñir y decolorar. También se utiliza para eliminar manchas y suciedad de las fibras y para prevenir la degradación de las fibras.
Ácido acético	Agente de aclarado y blanqueo suave en el proceso de teñido de fibras textiles. También se utiliza para eliminar manchas y suciedad de las fibras y para regular el pH durante el proceso de teñido. Además, el ácido acético se utiliza para ajustar el pH de las soluciones de teñido y para prevenir la degradación de las fibras durante el proceso de teñido.
Ceniza de soda	La ceniza de soda se utiliza en la industria textil como un agente alcalinizante y regulador de pH en el proceso de teñido de fibras textiles. También se utiliza para eliminar manchas y suciedad de las fibras y para mejorar la solubilidad de los colorantes en el proceso de teñido. Además, la ceniza de soda se utiliza como agente de blanqueo suave en el proceso de blanqueo de la ropa.
Detergentes	
Dispersante	Se utilizan para mejorar la uniformidad y la estabilidad de las soluciones de colorantes y para evitar la formación de grumos y sedimentos. También se utilizan para mejorar la penetración y la retención de los colorantes en las fibras textiles y para mejorar la calidad y la durabilidad de los tejidos.
Suavizante	
Enzimas	Catalizadores biocidas que mejoran el rendimiento y reducen el tiempo y el costo de los procesos de producción de textiles. Las enzimas se utilizan en una amplia variedad de procesos, como el blanqueo, el teñido, la eliminación de manchas y suciedad, el acabado y el procesamiento de fibras naturales y sintéticas. Las enzimas también se utilizan para mejorar la suavidad, la flexibilidad y la resistencia de los tejidos.
Neutralizantes	Sustancias químicas utilizadas para neutralizar ácidos o alcalis en el proceso de producción de textiles. Se utilizan para ajustar el pH de las soluciones y para prevenir la degradación de las fibras durante el proceso de teñido y otros procesos de producción de textiles. Las neutras también se utilizan para mejorar la

	solubilidad de los colorantes y para mejorar la calidad y la durabilidad de los tejidos.
--	--

6.3. Adaptación de los microorganismos al agua residual textil

Durante las primeras 3 semanas fue clave el acondicionamiento de los microorganismos a las aguas textiles residuales, es decir, la adaptación de los microorganismos especializados para remover contaminantes desde aguas grises hacia el tratamiento de contaminantes de aguas residuales textiles. Por esto fue necesario revisar la cantidad de bioportadores presentes en el matraz, regular la aireación para lograr una correcta disponibilidad de oxígeno, como también ir seleccionando los difusores que generarán mayor disponibilidad de microburbujas en los matraces.

Durante la semana 0, 1 y 2, se optimizaron las condiciones de aireación en el sistema de biofiltración a escala de laboratorio, favoreciendo que los microorganismos se adaptaran al nuevo tipo de aguas residuales. En base a las últimas acciones, los microorganismos se adaptaron de manera favorable, logrando disminuir considerablemente la turbidez inicial del agua residual, al cabo de los primeros 4 días de tratamiento, según muestra la Figura 10.

Figura 9. Turbidez (en NTU) al cabo de 4 y 7 días de tratamiento

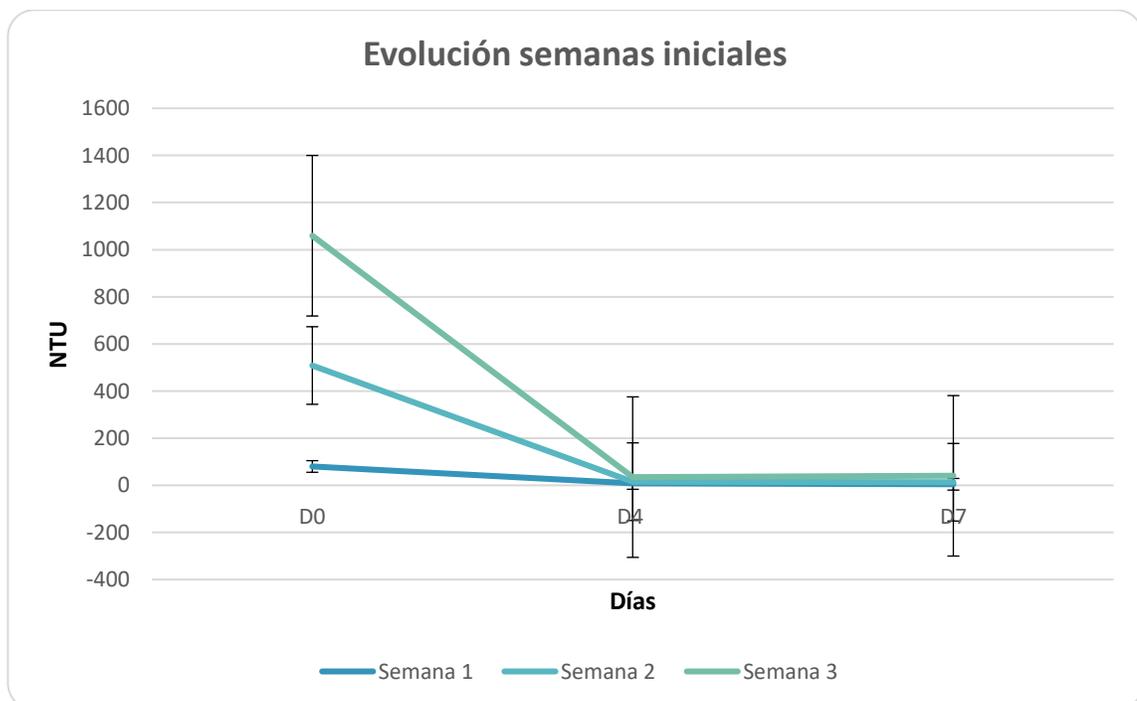


Figura 10. Imágenes representativas de los resultados de biofiltración durante las primeras semanas



Debido a que la muestra de agua residual textil inicial es de calidad y composición variable, ya que depende de los procesos que se estén llevando a cabo en la operación de la fábrica, se normalizaron los datos de turbidez transformándolos en porcentaje de remoción de turbidez respecto a la muestra inicial. De esta manera, la muestra inicial presenta un 0% de remoción, y a medida que la biofiltración va tratando el agua, la remoción de turbidez aumenta, alcanzando más del 90% luego de 4 días en los matraces R1, R2 y R3 que contienen el biofiltro Yaku.

Tabla 8. Resultados remoción turbidez durante las semanas de acondicionamiento

	Semana 0	Semana 1	Semana 2
D0	0%	0%	0%
D4	90%	94%	97%
D7	94%	98%	95%

En promedio, la remoción de turbidez de forma semanal fue la siguiente:

Semana 0: Reducción turbidez 0%

Semana 1: Reducción turbidez 96%

Semana 2: Reducción turbidez 96%

A partir de estos resultados, se definió evaluar primero la eficiencia del biofiltro Yaku a tiempos largos de tratamiento (entre 4 y 7 días), para ver la replicabilidad de los resultados obtenidos en estas primeras semanas de adaptación de los microorganismos al nuevo tipo de agua residual.

6.4. Resultados de tiempos largos de tratamiento

Durante las primeras 8 semanas se realizaron mediciones de la calidad del agua al cabo de 4 y 7 días de tratamiento, esto con el objetivo definir el tiempo mínimo de tratamiento requerido para alcanzar una calidad del agua que permita su posterior reutilización.

Figura 11 Turbidez (en NTU) a tiempos largos de tratamiento durante las primeras 8 semanas



Tal como se observa en la Figura N°11, las muestras provenientes del matraz “control estático”, que contenía agua estancada sin tratamiento, presentan una alta turbidez durante las 8 semanas del experimento, mayor a la turbidez de las aguas tratadas con el biofiltro Yaku al día 4 (D4), cuyos valores son más cercanos a 0 NTU. Al normalizar los datos utilizando el porcentaje de remoción de contaminantes

Tabla 9. Remoción de Turbidez a tiempos largos de tratamiento

	D4	D7
Semana 1	90%	94%
Semana 2	94%	98%
Semana 3	97%	95%

Dado que todas las semanas se replicó este resultado, es decir, que luego de 4 días de tratamiento con el biofiltro las aguas ya cumplían con una calidad apta para su reutilización, la siguiente fase fue determinar la eficiencia del biofiltro a tiempos cortos de tratamiento.

6.5. Resultados de tiempos cortos de tratamiento

Para determinar la eficiencia del biofiltro en tiempos acotados de tratamiento, se testeó la calidad del agua semanalmente, luego de 1 y 2 días de tratamiento. Durante las semanas 9 a la 13, se realizaron mediciones más frecuentes, donde se evidenció la eficiencia del biofiltro a las 24 y 48 horas de tratamiento.

Figura 12. Turbidez a tiempos cortos de tratamiento durante las semanas 9 a la 13

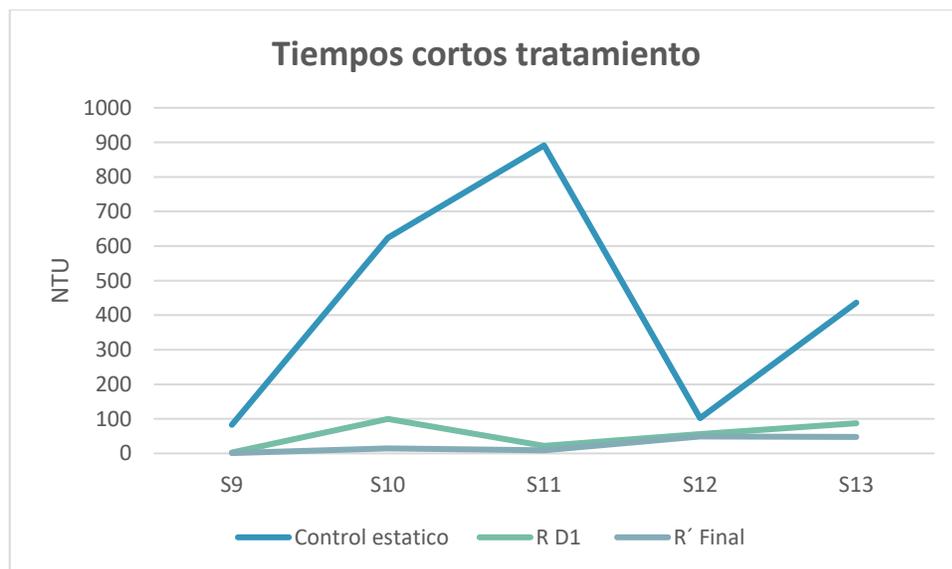


Figura 13 Turbidez (en NTU) al cabo de 4 y 7 días de tratamiento

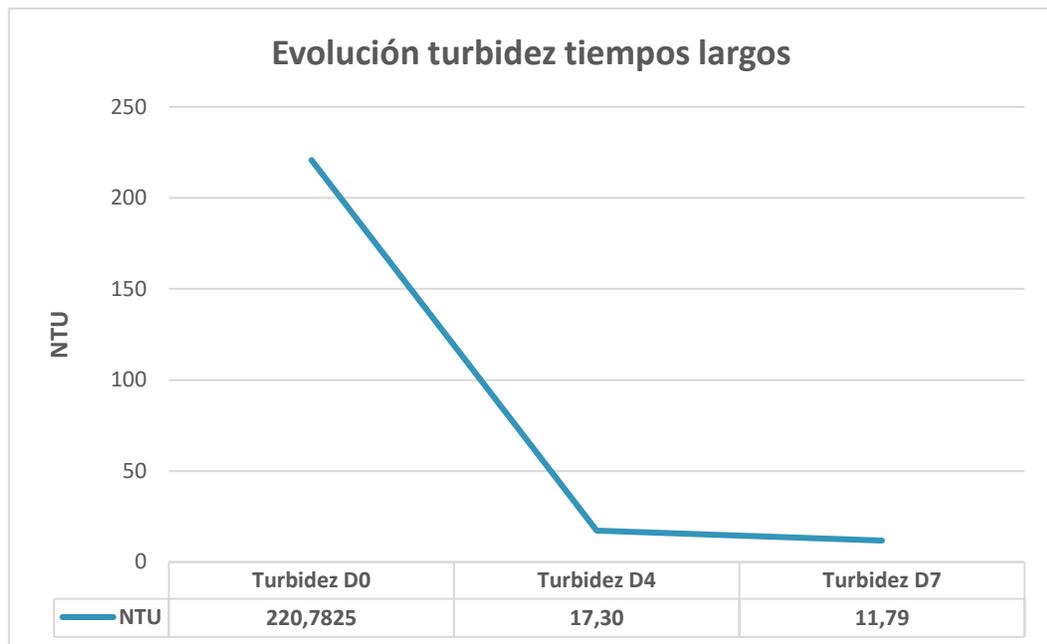
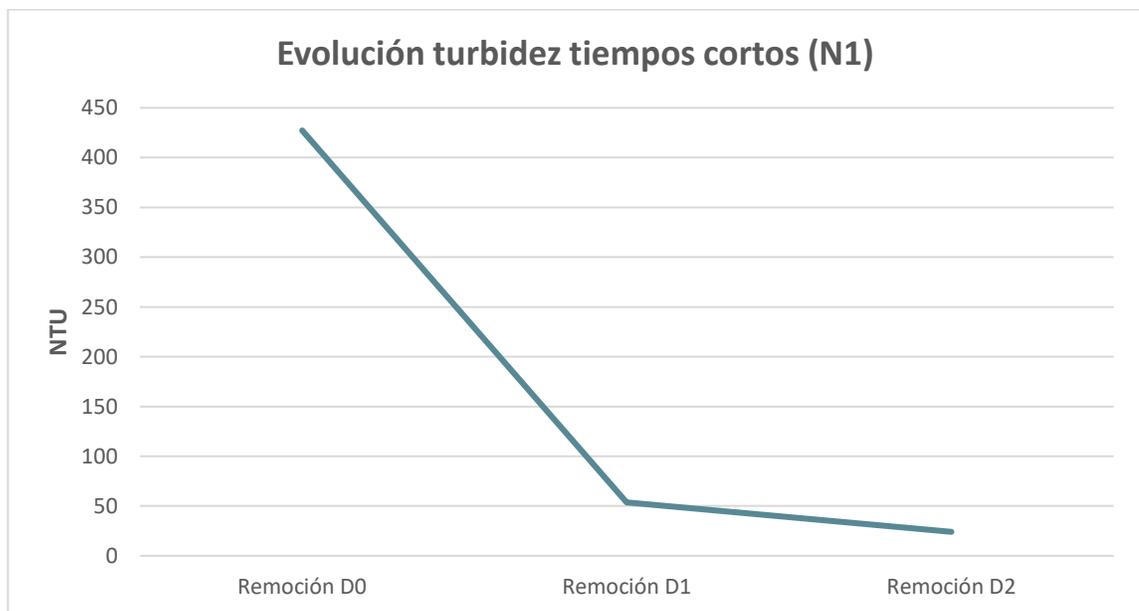
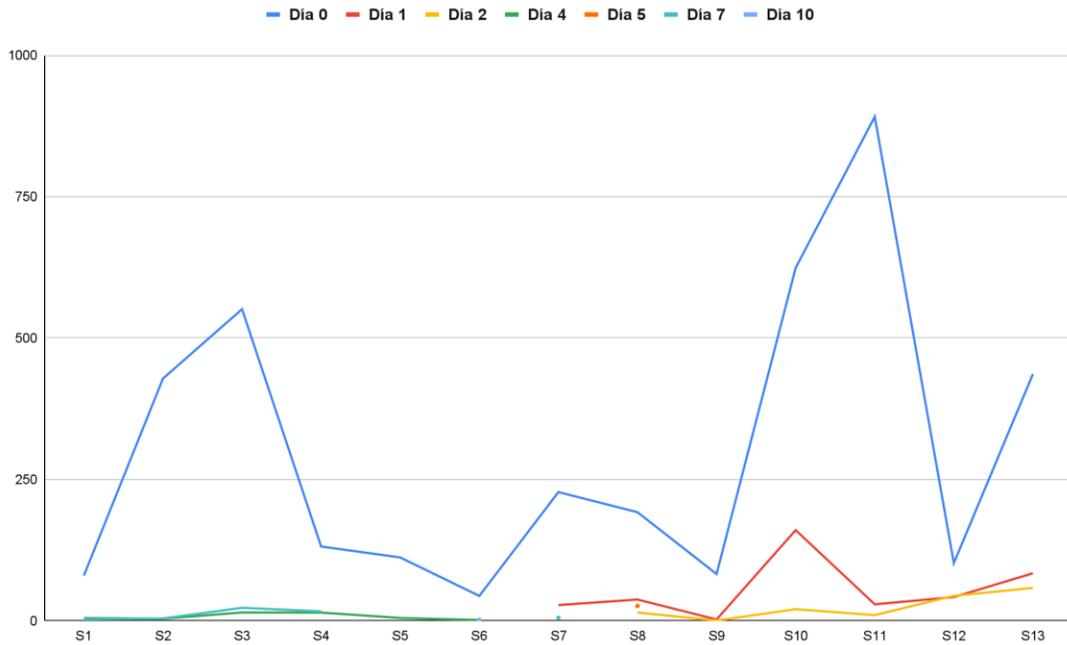


Figura 14 Remoción de Turbidez a tiempos cortos de tratamiento



Tal como se observa en la Figura N°14 y la Tabla N°15, la turbidez de las muestras biofiltradas bajó considerablemente luego de 1 y 2 días de tratamiento, alcanzando un XXXX% y un XXXXX% de remoción de turbidez respectivamente. Esto permite proponer un sistema de biofiltración que permita tratar el agua residual textil de Mohicano Jeans en un tiempo máximo de 2 días.

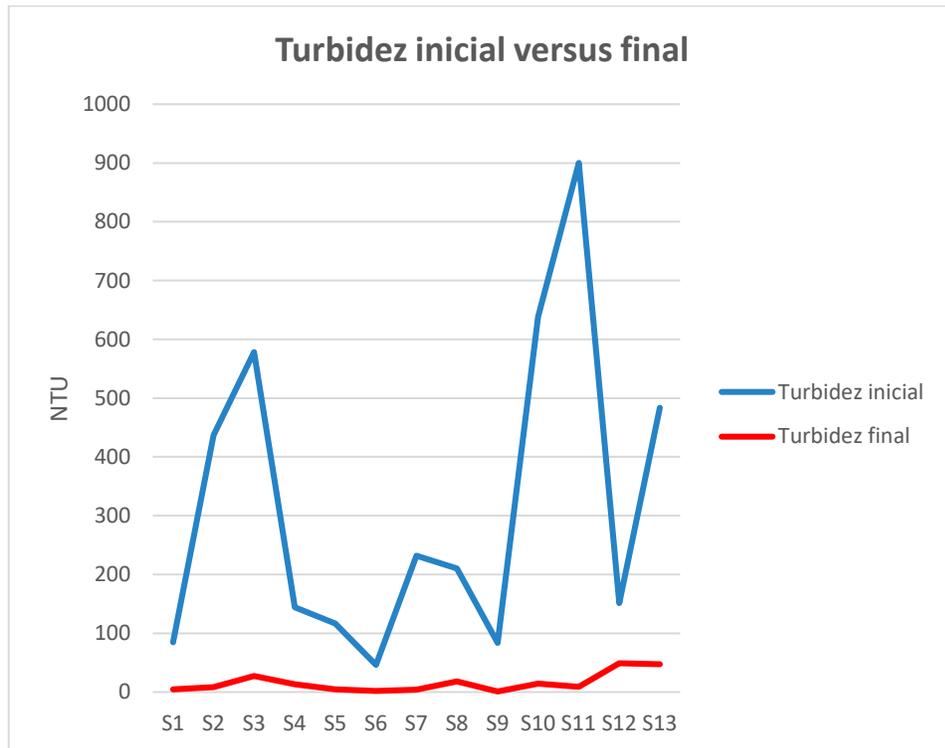


6.6. Efecto de la variación de pH sobre la biofiltración

Los resultados de biofiltración del agua residual textil a tiempos largos y cortos de tratamiento demostraron que la tecnología del biofiltro puede utilizarse para la reutilización de estas aguas, con una eficiencia de remoción de 91% luego de 48 h de tratamiento.

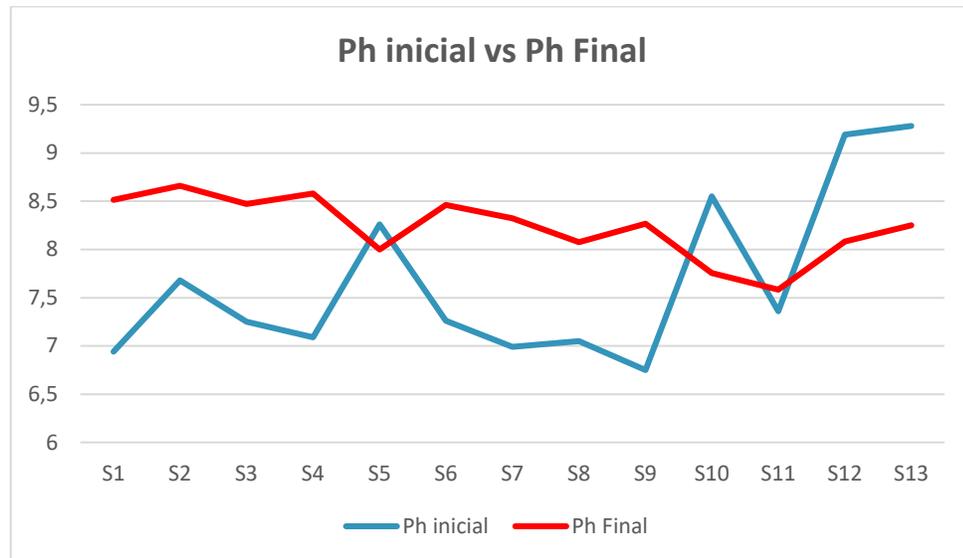
Al analizar la replicabilidad de los resultados durante las 13 semanas del experimento, determinado por la turbidez del agua (Figura N°15), es posible observar que durante la semana 10 y 11 la turbidez final fue más alta comparada a todas las semanas anteriores del experimento, a pesar de que la turbidez inicial se encontraba en rangos similares a las semanas anteriores.

Figura 15. Evolución turbidez inicial vs la final en el matraz R1 durante las 13 semanas del experimento



Para determinar si este fenómeno se relacionaba con una variación en la composición o calidad del agua residual industrial, se analizó la variación del pH medido durante las 13 semanas del experimento (Figura N° 16).

Figura 16. Evolución del pH inicial vs pH final en el matraz R1 durante las 13 semanas del experimento



Durante las primeras semanas, se observa que el pH inicial del día 0 tiende a aumentar en su respectiva semana. En cambio, en las últimas semanas, a medida que el agua llegaba más alcalina o con mayor pH, los microorganismos tendían a acidificar el agua o bajar el pH, logrando estabilizar el agua entre un pH 7 y 8.

7. Discusión

7.1. Caracterización de las aguas residuales textiles y el marco regulatorio para su reutilización en Chile

El presente trabajo de tesis permitió evaluar la eficiencia de tratamiento del biofiltro Yaku, para la remoción de contaminantes de aguas residuales textiles provenientes de Mohicano Jeans. Para ello, primero se caracterizaron las aguas residuales industriales, las cuales tienen una coloración azul intensa, alta turbidez, pH variable, y una serie de compuestos químicos utilizados en el proceso de confección, teñido y desteñido de los jeans. Algunos de estos compuestos podrían presentar altos riesgos para la salud de las personas y el medio ambiente, reforzando la relevancia de una solución que remueva dichos contaminantes del agua, para permitir la reutilización y reciclaje seguro de estas aguas.

En cuanto a la normativa, se revisaron las principales regulaciones relacionadas con aguas residuales industriales. Si bien las aguas residuales de la industria textil están bajo el marco de la normativa vigente, actualmente en dicha normativa no se encuentran directrices que permitan su reutilización en el proceso productivo. Por ende, en caso de buscar la aprobación sanitaria de un proyecto de reutilización de aguas residuales textiles en la planta de Mohicano Jeans, se requiere solicitar una audiencia directa con la autoridad sanitaria (Secretaría Regional Ministerial de Salud, Región Metropolitana) para que pueda establecer los requisitos para su aprobación.

7.2. Diseño e implementación del sistema de biofiltración de aguas residuales textiles a escala de laboratorio

A partir de la caracterización del agua residual inicial, se diseñó un sistema de pre-tratamiento y biofiltración de aguas residuales textiles, para ser implementado a escala de laboratorio. Para ello, se establecieron los grupos experimentales distribuidos en matraces, para estudiar el efecto que tienen los microorganismos filtradores de Yaku y la aireación del agua, sobre la calidad del agua. De esta manera, se estableció la metodología experimental para el seguimiento del proceso de biofiltración durante 1, 2, 4 o 7 días, a partir de la medición de parámetros de calidad de agua en cada matraz.

Durante las primeras semanas fue necesario aclimatar a los microorganismos que originalmente estaban especializados en el tratamiento del agua gris, para utilizarlos en el tratamiento de agua proveniente de las lavadoras industriales de Mohicano Jeans. Para esto fue necesario ir iterando entre la cantidad de bioportadores colonizados, es decir, sustrato con microorganismos crecidos sobre su superficie, que se utilizó en los matraces R1, R2 y R3. En paralelo, también fue necesario aumentar la potencia y regular la frecuencia de aireación en los matraces, para asegurar que la variable se comportara de forma uniforme a lo largo de las 13 semanas del experimento.

Por otro lado, a partir de las caracterizaciones del agua residual inicial y tratada en los matraces, se confirmó la necesidad de un pre-filtro para remover partículas de mayor tamaño, tales como fibras de la ropa, para lograr la lectura de las muestras en el turbidímetro. Para ello, en la etapa de laboratorio se utilizó un *cell strainer*, que consiste en una malla que retiene partículas por sobre los 100µm de tamaño, logrando separar los sólidos en suspensión de las muestras para ser analizadas en el turbidímetro.

A partir de esta observación, se realizó un proyecto complementario por parte de estudiantes de diseño UC, para diseñar un pre-filtro en base a fibras de algodón reciclado, que permita retener partículas de mayor tamaño presentes en el agua

residual textil, y así facilitar el tratamiento biológico que realiza la tecnología del biofiltro Yaku.

7.3. Eficiencia del biofiltro Yaku para la remoción de contaminantes de aguas residuales textiles

A partir de los resultados de las 13 semanas de experimento, se evidenció la eficiencia del tratamiento del biofiltro Yaku ya que la turbidez disminuía respecto al agua inicial (D0) luego de 1, 2, 4 o 7 días de tratamiento. En paralelo, se comprobó que el agua estancada estudiada en el “control estático” no lograba disminuir la turbidez de forma significativa, e incluso, al final de cada semana el agua presentaba malos olores.

En particular, se comprobó que el biofiltro Yaku tiene una alta eficiencia de purificación del agua residual de Mohicano Jeans, obteniendo una remoción de la turbidez del 93% al día 4, y una remoción del 96% al día 7 en la primera etapa (tiempos largos), y un 89% al día 1 y 93% al día 2 en la segunda etapa (tiempos cortos). De esta manera, se valida técnicamente el uso de esta tecnología para el tratamiento de este tipo de aguas, obteniéndose un agua prácticamente transparente, libre de malos olores, con pH en rango neutro, y una turbidez cercana a 0 NTU.

Si bien el agua residual inicial no siempre fue estable, e incluso, fue posible evaluar la variabilidad de su calidad a lo largo de las 13 semanas, el experimento tuvo resultados replicables en cuanto a la eficiencia del biofiltro Yaku. Es por esto que fue necesario normalizar los datos, para poder comparar entre distintas semanas, a través del cálculo del porcentaje de remoción de turbidez respecto al día inicial o D0. A su vez, el uso del *cell strainer* para filtrar el agua previo a su medición en el turbidímetro, permitió estandarizar las características del agua para hacer más comparables los resultados en distintos tiempos.

De todas maneras, la variabilidad en la muestra de agua inicial es justamente uno de los desafíos tecnológicos que esta industria requiere resolver para lograr el reciclaje de sus aguas en los procesos productivos. En este sentido, cabe destacar el fenómeno observado entre la semana 10 y 12 en que el aumento de pH inicial provocó que la remoción de turbidez fuera menor a lo esperado. Esta observación da cuenta del posible mecanismo de funcionamiento de los microorganismos filtradores, los que deben primero acondicionarse al alto pH para luego neutralizarlo, llevándolo a valores cercanos a 7 y 8, para posteriormente poder trabajar en la remoción de turbidez del agua. Este fenómeno se ha observado en otros sistemas biológicos de tratamiento de agua

Los resultados de este trabajo permiten comprobar que el biofiltro Yaku logra tratar el agua residual textil, dejándola con una calidad apta para su reciclaje. Para ello, el biofiltro requiere condiciones óptimas de biomasa de microorganismos iniciales, aireación constante, y pH en un rango entre 7 y 8, para lograr un tratamiento del agua en menos de 24 horas.

7.4. Propuesta de pilotaje de sistema de biofiltración Yaku de aguas residuales textiles, para su implementación en Mohicano Jeans

Gracias a la validación técnica del biofiltro para el tratamiento de las aguas residuales textiles, se desarrolló una propuesta para el pilotaje del sistema de biofiltración en la planta de Mohicano Jeans, en Recoleta. En la Figura 16 se puede observar de qué forma sería instalado el biofiltro en la fábrica, donde inicialmente se instalaría un estanque de 500 litros para comenzar con el tratamiento de las aguas textiles a una pequeña escala, permitiendo un pilotaje de bajo costo para la empresa.

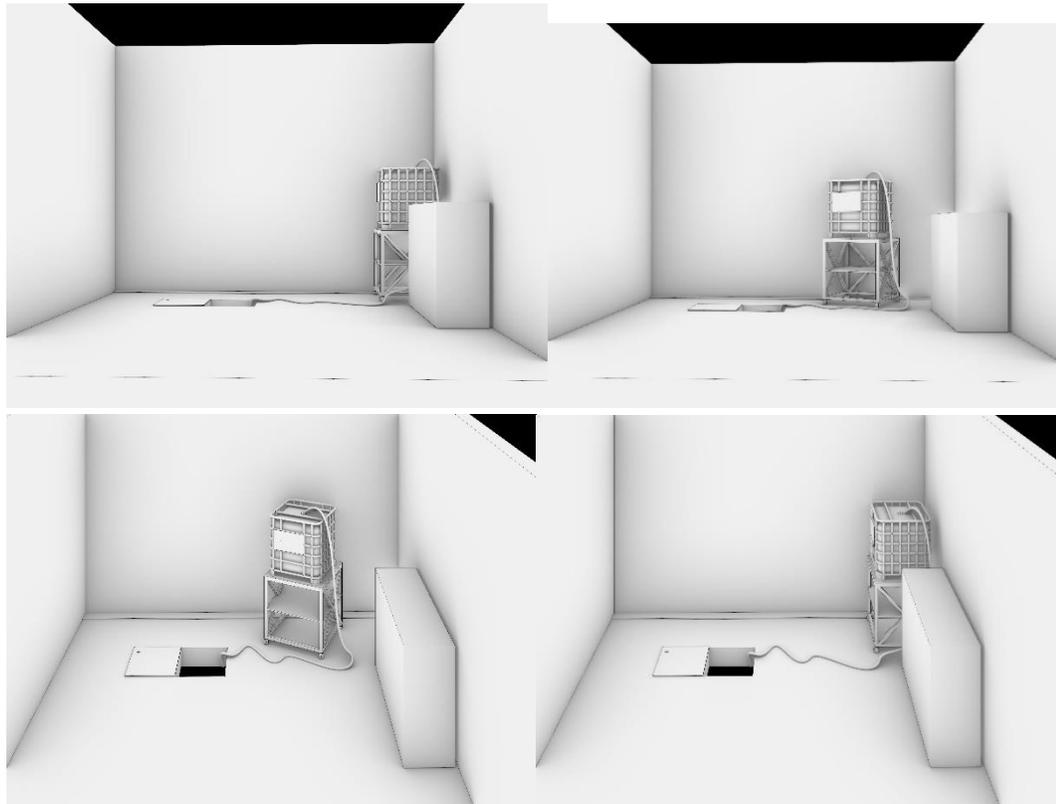


Figura 17. Diseño del piloto para la implementación del sistema de biofiltración Yaku en Mohicano Jeans

Para esta propuesta se requieren los siguientes componentes:

- Estanque plástico 500 L para el tratamiento del agua
- Estanque plástico de 300L para el traslado de aguas ya tratadas
- Plataforma para traslado del estanque de acumulación de aguas tratadas
- Compresor de aire de 150W de potencia
- Biofiltro Yaku para 500L, que contiene microorganismos acondicionados para el agua textil

Esta propuesta de piloto se ha presentado a la empresa Mohicano Jeans, y se espera llevar a cabo durante el primer semestre de 2023 en la planta en Recoleta. En este pilotaje, se deben cumplir los siguientes requerimientos por parte de la fábrica:

- Lograr el tratamiento del agua residual textil (+90% de remoción de turbidez) en máximo 14 horas, que es el tiempo de reposo de la operación en la fábrica
- Validar que el agua biofiltrada puede reutilizarse en las máquinas lavadoras de jeans eco-friendly de Mohicano Jeans

7. Conclusiones

Los resultados del experimento sostienen que el método de biofiltración es muy efectivo para tratar las aguas textiles, con una tasa de eliminación de contaminantes del 90% o superior durante la mayoría de las semanas.

Respecto a la normativa vigente el agua textil presenta parámetros similares a la composición de aguas grises, las cuales regulan su reutilización de turbidez, un requerimiento desde los 30 y 5 NTU, por lo cual sería posible generar una regulación que estipule un parámetro de turbidez para la posterior reutilización de aguas textiles.

Debido a la variabilidad que presento el pH en las semanas de muestreo se pudo constatar que el pH ideal para realizar la biofiltración es entre 8 y 6, no obstante, cuando la muestra se insertaba en los biorreactores con un pH superior a 8, se mantenía la turbidez, pero se estabilizaba el pH antes de bajar la turbidez.

Se recomienda para un proyecto futuro filtrar partículas gruesas mediante un prefiltro, debido a que con eso se mejoran los tiempos de tratamiento, llegando a ser posible una reutilización del agua en un periodo de 24 horas.

En base a los resultados obtenidos, se recomienda que la empresa adquiera el filtro de biofiltración utilizado en este estudio. Los resultados mostraron una efectividad del 91% en la eliminación de contaminantes, lo que demuestra la alta calidad del filtro y su capacidad para mejorar la calidad del agua tratada. Además, el filtro tiene un costo relativamente bajo y su mantenimiento es sencillo, lo que lo hace una opción atractiva para la empresa. En resumen, la adquisición del filtro de biofiltración sería beneficiosa para la empresa tanto en términos de calidad del agua como en términos económicos ya que se ahorraría la disposición final del agua tratada.

8. Bibliografía

Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA). (s.f.). ¿Qué es el agua gris?

Recuperado de <https://www.epa.gov/graywater/what-graywater>

Biblioteca del Congreso de Chile. (2018). *Ley 21075 (15-feb-2018) M. de Obras Públicas*

| *Ley Chile. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile*. BCN. Recuperado de

<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1115066&idParte=9886827&idVersion=2018-02-15>

Espectrofotometría. (n.d.). En Merriam-Webster.com Retrieved December 1,

2022, Recuperado de <https://www.merriam-webster.com/dictionary/spectrophotometry>

Fang, H. H., & Chen, W. J. (2010). Performance of a sequencing batch reactor for treating domestic greywater. *Water Science and Technology*, 61(11), 2743-2749. doi: 10.2166/wst.2010.355

Hernández, A. (2019, December 18). *BIOFILTRACIÓN, una tecnología con mucho futuro*

- *Jorge Chamorro Alonso*. *Aguasresiduales.info*. Recuperado de

<https://www.aguasresiduales.info/expertos/tribuna-opinion/biofiltracion-una-tecnologia-con-mucho-futuro-JrHnI>

Jeppesen, B. (1994). *Model guidelines for domestic greywater reuse for Australia / Barry*

Jeppesen. National Library of Australia. Recuperado de

<https://catalogue.nla.gov.au/Record/1309202>

Larrea, L., Albizuri, J., Abad, A., Larrea, A., & Zalakain, G. (2007, October 29). *Optimizing and modelling nitrogen removal in a new configuration of the moving-bed biofilm reactor process*. *Water science and technology*. Recuperado de <https://doi.org/10.2166/wst.2007.273>

Leyva Díaz, J.C. (2015, March 6). *Estudio cinético de biorreactores de membrana con y sin lecho móvil aplicados al tratamiento de aguas residuales urbanas*. DIGIBUG Principal. Recuperado de <https://digibug.ugr.es/handle/10481/40050>

Ministerio de Medio Ambiente. (2018). Escasez hídrica en Chile: causas y soluciones. Recuperado de <https://www.mma.gob.cl/escasez-hidrica-en-chile/>

Ministerio de Medio Ambiente. (2019). Tratamiento de aguas textiles. Recuperado de <https://www.mma.gob.cl/tratamiento-de-aguas-textiles/>

MOP. (2022). *Ministerio de Obras Públicas*. Ministerio de Obras Públicas - Dirección de General de Aguas. Recuperado de <https://dga.mop.gob.cl/administracionrecursoshidricos/decretosZonasEscasez/Paginas/default.aspx>

OMS. (2006). *Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater in agriculture and aquaculture*. World Health Organization (WHO) Recuperado de <https://apps.who.int/iris/handle/10665/78265?locale-attribute=es&>

OMS. (2016). *Overview of greywater management health considerations*. World Health Organization (WHO). Recuperado de <https://apps.who.int/iris/handle/10665/116516>

Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC). (2019). Cambio climático y agua. Recuperado de <https://www.ipcc.ch/srccl/chapter/summary-for-policymakers/>

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2018). Escasez hídrica: un desafío global para el desarrollo sostenible. Recuperado de <http://hdr.undp.org/es/content/scarcity-water-global-challenge-sustainable-development>

Reig, P., Gassert, F., Luo, T., & Maddocks, A. (2013, December 12). *Water Stress by Country*. World Resources Institute. Recuperado de <https://www.wri.org/data/water-stress-country>

Rodriguez, J. (2020). Impacto del consumo de agua en la disponibilidad para el abastecimiento humano. *Boletín Hídrico*, 32(2), 23-45.

Superintendencia de Servicios Sanitarios. (2020). Consumo de agua potable promedio por cliente al mes en zonas urbanas concesionadas [Informe].

Subsecretaría de Medio Ambiente. (n.d.). Qué son las aguas grises. Recuperado de <https://www.mma.gob.cl/aguas-grises/>

Simon, T.D., & Wong, K.H. (2002). Water Quality: An Introduction. John Wiley & Sons. ISBN: 9780471491953. Espectrofotometría. (n.d.). En Merriam-Webster.com. Recuperado de <https://www.merriam-webster.com/dictionary/spectrophotometry>