

Informe de avance Pasantía Full Time
Reducción de huella hídrica para la empresa Australis Sea foods.

Alumno: Gabriel Quezada Vargas
Carrera: Ingeniería Civil en Bioingeniería
Profesora: Francisca Martinich
Fecha: 24/12/2023

Índice

Resumen

ejecutivo.....3

Introducción4

a) Contexto de la empresa4

b) Contexto del problema.....5

Objetivos11

a) Objetivo general..... 11

b) Objetivos específicos..... 12

Estado del Arte..... 12

Metodología.....19

Medidas de

desempeño.....21

Plan de

implementación.....22

Evaluación

Económica.....25

Conclusiones.....26

Bibliografía.....29

Anexo.....34

Resumen Ejecutivo

Australis Seafoods es una empresa dedicada al cultivo y producción del salmón, ofreciendo sus productos a diferentes mercados. Pertenece a una industria que se ha visto directamente afectada por el cambio climático, teniendo que ajustarse a las nuevas tendencias y presiones productivas. Es por esto, que Australis ha declarado estar comprometida con una producción con un menor impacto ambiental, en específico su huella hídrica. Además, durante el último año no ha cumplido con los parámetros establecidos en la certificación internacional BAP de calidad de efluente en pisciculturas, específicamente con el fósforo. Donde, el efluente ha tenido una concentración superior 0,5 mg/L, poniendo en riesgo la certificación y dañando al medio ambiente. El objetivo de este proyecto es plantear un proyecto teórico de un humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal para el tratamiento de las aguas provenientes de una piscicultura de la compañía para obtener tasas de remoción de fósforo de a lo menos un 40%, y así, para además de cumplir con estándares de calidad de aguas vertidas a cuencas de aguas como BAP, reduciendo la huella hídrica de la empresa. Obteniendo resultados teóricos favorables para el sistema de tratamiento de aguas, con un menor consumo energético.

Abstract

Australis Seafoods is a company dedicated to the cultivation and production of salmon, offering its products to different markets. It belongs to an industry that has been directly affected by climate change, having to adapt to new trends and production pressures. For this reason, Australis has declared its commitment to a production with a lower environmental impact, specifically its water footprint. Additionally, during the last year, it has not complied with the parameters established in the international BAP certification for effluent quality in fish farms, specifically with phosphorus. The effluent has had a concentration exceeding 0.5 mg/L, jeopardizing the certification and harming the environment. The objective of this project is to propose a theoretical project of a subsurface horizontal flow artificial wetland for the treatment of water from a company's fish farm to achieve phosphorus removal rates of at least 40%, in addition to complying with water quality standards such as BAP, thus reducing the company's water footprint. The aim is to obtain favorable theoretical results for the water treatment system with lower energy consumption.

Introducción:

a) Contexto de la empresa

El holding Australis Seafoods S.A., es una empresa dedicada al cultivo y procesamiento de salmones. Fue fundado el año 2007 por el empresario chileno Isidoro Quiroga. No obstante, los inicios de la compañía se remontan a 2003, cuando el empresario mencionado anteriormente adquiere la empresa Australis S.A., productora de smolts -etapa del ciclo de vida del salmón una vez que está preparado para estar en agua salada- que ya contaba con 10 años de experiencia.

Actualmente, Australis posee su cadena productiva desde la ova hasta el consumidor final, como se puede ver en la siguiente imagen:



Ilustración 1: Cadena productiva Australis. (Reporte de sostenibilidad 2020, 2021)

Por su parte, el principal mercado de Australis es el exterior, como se puede ver en la siguiente imagen, Estados Unidos es el principal mercado de la empresa, concentrando un 30% de las ventas de la empresa, seguido de Europa con un 27%.

Gestión Comercial

Nuestros principales clientes son supermercados, procesadores y distribuidores mayoristas. No obstante, nos hemos posicionado fuertemente en el mercado Retail nacional durante los últimos años.

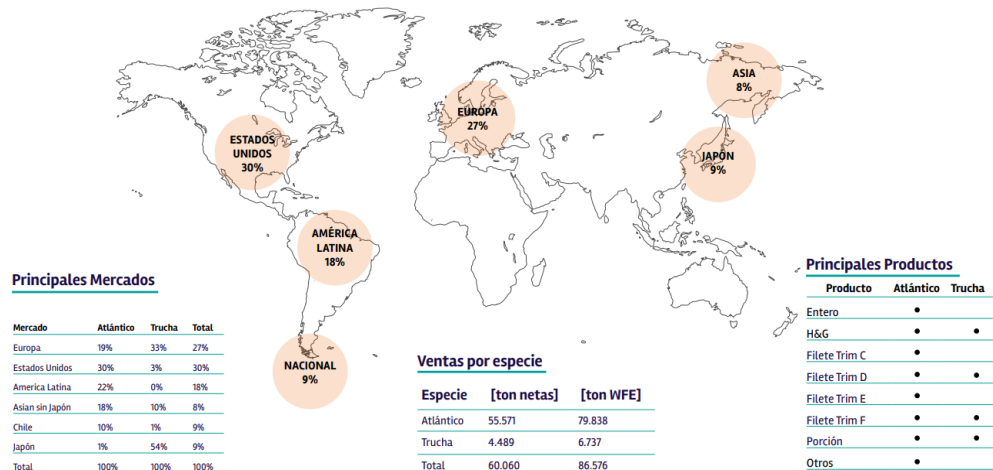


Ilustración 2: Principales mercados Australis. (Reporte de sostenibilidad 2022, 2023)

b) Contexto del problema

En la actualidad, el cambio climático se ha convertido en uno de los principales desafíos para la humanidad, donde se deben tomar medidas para revertir los efectos generados por las diferentes industrias y modelos de consumo. En especial, los relacionados al calentamiento global, escasez hídrica y gases de efecto invernadero (IPCC, 2023). Luego de la pandemia por el virus COVID-19, los países y en especial las industrias, tienen la oportunidad de revertir el cómo venían produciendo, con nuevos patrones de consumo y producción hacia un futuro más sostenible (Moran, 2023).

Por su parte, el cambio climático afecta al agua que está presente en el planeta de diferentes formas, modificando patrones de precipitaciones, o sea, que lugares donde llovía más ahora no llueva tanto o reduciendo las capas de hielo, reduciendo la cantidad de agua potable en el planeta, haciendo hoy en día imperativo tener un uso responsable del agua (United Nations, s.f.). En Chile, se han experimentado períodos de sequías, donde en el verano del 2018 la Dirección General de Aguas estimaba que el 14,89% de la población se vio afectada por las sequías (Valencia, 2019). Por lo que, es imperativo utilizar este recurso de forma responsable, sobre todo para industrias que su producción está directamente ligada al recurso hídrico.

Para la industria acuícola, el cambio climático representa una amenaza directa para sus producciones, tanto en la fase de agua dulce como agua mar. En la primera fase, por la accesibilidad a los insumos necesarios para poder cumplir con las producciones, en especial el agua dulce. Por otra parte, en aguamar, la

acidificación de los océanos o el aumento de temperatura del mar, son ejemplos de condiciones que están afectando el funcionar de la industria. (Global Seafood Alliance, 2021)

Es por esto, que Australis creó su Estrategia de Sostenibilidad en el 2020. Esta estrategia, viene del trabajo que se está realizando desde el 2016, cuando se creó el primer reporte de sostenibilidad. En la estrategia se expresa: “Las nuevas tendencias y exigencias en el mundo actual de los negocios nos mantienen enfrentados a diferentes desafíos y procesos de adaptación, donde las temáticas ambientales y sociales tienen la misma importancia que los resultados económicos.” (Reporte de Sostenibilidad 2020 Australis, 2021)

Esta estrategia, posee 6 pilares fundamentales, donde las decisiones que se tomen a nivel de empresa deben estar alineadas con dichos pilares. Es en el pilar de Buen Entorno donde se encuentra representado el compromiso ambiental, que busca reducir los impactos ambientales en la cadena productiva, con iniciativas como reducir la huella de carbono, reducir uso de envases y embalajes plásticos o reducción de huella hídrica, por ejemplo. A su vez, estos pilares están alineados con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) de la ONU, por ejemplo, vida submarina, acción por el clima, entre otros (Reporte de Sostenibilidad Australis, 2022).

Australis, posee diferentes tipos de certificaciones internacionales, que enfocan el proceso productivo completo del salmón, con indicadores que abarcan el desempeño ambiental, económico y social. Las principales certificaciones son Aquaculture Stewardship Council (ASC) y Best Aquaculture Practices (BAP). Estas certificaciones, demuestran el compromiso que presenta la empresa de una producción sostenible, por ejemplo, tanto BAP como ASC tienen exigencias en los tratamientos de aguas de las pisciculturas, con exigencias de concentraciones de parámetros como fósforos más exigentes que la normativa chilena. BAP, tiene como límite máximo 0,5 mg-P/L, mientras que el Decreto Supremo 90/2000, como se puede ver en la figura 1 del anexo, presenta un límite de este parámetro de 10 mg-P/L. (Hatchery Standard BAP, 2023)

Durante el año 2021, el gremio SalmonChile junto a la Agencia de Sustentabilidad y Cambio Climático, crean el Acuerdo de Producción Limpia (APL): “Estrategia de Cambio Climático y Economía Circular para el Sector Salmonero de las regiones de Los Lagos y Aysén”. El APL posee diferentes tipos de metas en el ámbito ambiental, desde la gestión de residuos a la contaminación del fondo marino. Dentro de las metas encontramos la medición de la huella hídrica, donde dentro de los objetivos específicos del APL, está: Diseñar una bola climática de proyectos

ambientales, que permita compensar el impacto ambiental de las empresas, huella de carbono e hídrica (Noticias, 2023).

Por su parte, Australis creó una política de medio ambiente, donde se enfatiza el compromiso con el desarrollo sostenible de la industria salmonera, buscando reducir el impacto que sus operaciones puedan causar al medio ambiente y las comunidades. Es más, en el compromiso 2.5 Relación con el recurso hídrico, se menciona: “La compañía (...) implementa medidas para identificar y mitigar los impactos que su operación causa en el agua, así como para reducir el consumo del recurso hídrico” (Política de medio ambiente Australis, 2023).

Así, podemos ver el compromiso que tiene la empresa por reducir su huella hídrica para que, en consecuencia, se reduzca su impacto ambiental, donde actualmente, no hay proyectos o se han realizado proyectos que busquen reducir o mitigar la huella hídrica.

Australis, ha medido su huella hídrica utilizando la metodología Water Footprint Network (WFN). Es un indicador del uso del agua, que incorpora tanto el uso directo como indirecto y la contaminación de esta, en la elaboración de un producto o servicio, en este caso, una tonelada de salmón whole fish equivalent (WFE), que significa el peso del salmón sin vísceras ni sangre (Bjørndal & Mrdalo, 2023).

Hasta la fecha, la última medición de huella hídrica corresponde al año 2021. La empresa midió la huella hídrica a través de la metodología WFN, respecto de la producción de 1 tonelada de salmón WFE. El resultado obtenido fue de 583 metros cúbicos por tonelada de salmón WFE. Esta medición abarcó desde la fase de agua dulce hasta las plantas de proceso y su logística, sin embargo, no consideró el alimento consumido por los peces, que representa el 98% de la huella hídrica dentro de la industria acuícola (Guzmán et al., 2017).

La huella hídrica está compuesta por tres componentes: Huella Azul, Huella Gris y Huella Verde. (Hoekstra et al., 2012)

- **Huella Azul:** Se refiere a los recursos globales de agua dulce, subterráneas y superficiales consumidos en la cadena productiva.
- **Huella Gris:** Hace referencia al agua contaminada, definida como el volumen de agua dulce que se requiere para asimilar una carga de contaminantes, dadas las concentraciones naturales y estándares ambientales de calidad de agua.

- **Huella Verde:** Hace relación al consumo de aguas provenientes de la lluvia que no se convierte en escorrentía, sino que se incorpora en productos agrícolas.

En el caso de Australis, la huella que presenta el mayor consumo es la azul, con un 53,18%, seguida de la gris con un 46,01%.

Es en las pisciculturas donde se encuentran las mayores huellas hídricas dentro de la cadena productiva en Australis, específicamente en la huella hídrica gris. La huella gris de las pisciculturas durante el año 2021 tuvo un volumen de 267 metros cúbicos por tonelada de salmón WFE. (Reporte Huella Hídrica Australis Seafoods, 2021)

La huella gris se calcula dependiendo de la normativa de cada país (Hoekstra et al., 2012), en el caso de Chile, es el Decreto Supremo 90/2000 el que indica cuáles son los parámetros considerados para el cálculo de la huella gris. En el anexo 1, se puede apreciar los parámetros considerados en el DS 90. Es en esta huella donde se encuentra una oportunidad de mejora, ya que, al reducir esta huella, se reduce la huella hídrica de la empresa.

Este parámetro, también es medido en una certificación internacional que Australis busca adquirir cada año, Best Aquaculture Practices (BAP). El mercado estadounidense, en general, posee una tendencia a comprar productos salmónidos con las cuatro estrellas de certificación. Cada estrella significa que se han cumplido ciertos estándares cada una de las cuatro fases productivas del salmón: alimento, fase agua dulce, fase agua mar y finalmente, planta de procesos. Al ser el principal mercado de la empresa, es que esta certificación se vuelve una de las más relevantes dentro de la compañía.

BAP, posee estándares exigentes en cuanto a los efluentes de pisciculturas de flujo abierto, comparándolos con los de la normativa nacional. Por ejemplo, el fósforo soluble como se puede apreciar en la siguiente tabla:

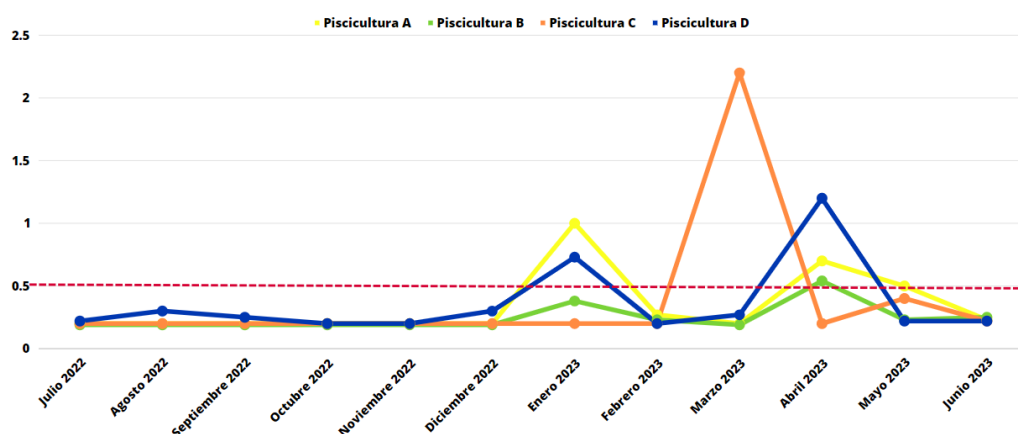
Tabla 1: Parámetros de calidad efluentes BAP. (Hatchery Standard Issue 2.1, 2023)

| Variable (units) | Ponds and Non-Coastal Flow through Systems | RAS* | Minimum Collection Frequency |
|--|---|---|------------------------------|
| pH (unit) | 6.0 – 9.5 | 6.0 – 9.5 | Monthly |
| Total Suspended Solids (mg/L) | Less than 50 | Less than 25 | Quarterly |
| Soluble Phosphorus (mg/L) | Less than 0.5 | N/A | Monthly |
| Total Phosphorus (mg/L) | N/A | Less than 10 | Quarterly |
| Total Ammonia Nitrogen (mg/L) | Less than 5 | Less than 5 | Monthly |
| Nitrate – N (mg/L) | N/A | Less than 50 | Quarterly |
| 5-day biochemical oxygen demand (mg/L) | Less than 50 | Less than 25 | Quarterly |
| Dissolved oxygen | More than 5 (mg/L) or \geq 70% saturation** | More than 5 (mg/L) or \geq 70% saturation** | Monthly |
| Chloride | No discharge above 800 mg/L chloride into freshwater*** | No discharge above 800 mg/L chloride into freshwater*** | Monthly |

Australis, ha medido las concentraciones de este contaminante desde el año 2018, en sus instalaciones de pisciculturas con flujo abierto. Estas, son las que extraen el agua desde un cuerpo de agua, para luego devolver el 100% de lo utilizado al mismo cuerpo de agua, una vez tratada el agua (Lekang, 2013). Como se puede ver en el anexo III, que se aprecia como la piscicultura capta el agua de un río para utilizarla en su proceso productivo, y luego tratarla para ser devuelta al cuerpo de agua.

Durante los últimos 12 meses, las mediciones han sido las siguientes:

Gráfico 1: Elaboración propia a partir de mediciones de efluentes en pisciculturas de la compañía.



Como se puede apreciar, hay pisciculturas que han sobrepasado los límites de 0.5 mg/L (línea punteada en rojo) de fósforo soluble. La certificación, permite que la empresa tenga por instalación hasta 3 no cumplimientos de los límites máximos por contaminante donde, por ejemplo, hay pisciculturas que ya han superado en dos ocasiones, con una tercera teniendo el límite exigido por la casa certificadora (Hatchery Standard, 2023).

El fósforo soluble, hace referencia al que se encuentra disponible para organismos en forma de iones en el agua. En general, en las aguas residuales provenientes de la industria acuícola, el fósforo se encuentra en su mayoría como fosfatos (PO_4^{-3}) que su degradación corresponde principalmente a la incorporación de tejidos celulares. Esta forma de fósforo es la que se le atribuye a la eutrofización. (Childers et al., 2011; Correia et al., 2013)

Según información proporcionada por la empresa, estas alzas en las mediciones de fósforo no se atribuyen a modificaciones en la biomasa de las piscinas de la piscicultura o diferencias en el alimento entregado y consumido por los peces. Asimismo, cuando ocurren estas alzas en las mediciones, la empresa mide la calidad del afluente para descartar que este aumento sea responsabilidad de sus actividades productivas, sin embargo, estas mediciones no presentaron alteraciones.

Cuando se sobrepasa este límite en más de tres ocasiones, ocasiona tener una “no conformidad”, lo que se traduce en perder la certificación, aquí la importancia y necesidad de disminuir lo más posible los contaminantes en el efluente de las pisciculturas.

Por otra parte, se debe considerar la calidad del agua que presenta el afluente, los parámetros que posee el agua de la cuenca aguas arriba. Como objeto de estudio, se va a utilizar la piscicultura D que utiliza agua del río Rahue, en la región de Los Lagos. En un estudio realizado por la Municipalidad de Osorno, se realizó un diagnóstico de diferentes parámetros a lo largo de la cuenca de agua. Dentro de los parámetros estudiados en el cuerpo de agua está el fósforo, donde en la zona de extracción de agua del río por parte de la piscicultura es de 0,006 mg-P/L. (Fuentes et al., 2021)

Por lo tanto, a pesar de que la empresa cumple con el DS 90/2000 en la concentración de fósforo, la concentración de este parámetro, debido a las actividades productivas de la empresa, aumenta en promedio más de 40 veces su concentración inicial, considerando que dicha piscicultura posee un promedio

de 0,25 mg-P/L en su efluente en los últimos 12 meses. Entonces, el agua no está siendo de vuelta al cuerpo de agua en un estado similar al original.

Así, podemos ver que la empresa está comprometida y en búsqueda de una producción más sostenible del salmón atlántico, adecuándose a las tendencias y exigencias tanto de los gremios como de las certificaciones internacionales a las que voluntariamente se adhieren. Asimismo, tanto en la empresa como en la industria existe un alto daño reputacional con respecto al cómo opera esta industria, con una mala imagen pública (Oceana, 2022). Entonces, Australis busca cambiar esta imagen que tiene la sociedad con respecto a la industria. A su vez, existe un mercado nacional, que a pesar de ser cerca de un 10% de las ventas totales, presenta una tendencia hacia el consumo de productos con un menor impacto ambiental (SERNAC, 2022).

Finalmente, ante los muestreos realizados en el efluente de las pisciculturas en los últimos 12 meses, existe una posibilidad de la pérdida de la certificación BAP. Perder esta certificación genera una problemática para la empresa, porque como se mencionó anteriormente, es la certificación exigida por Estados Unidos, el principal mercado de la empresa, donde además de perder ese mercado, se pierde dinero en el proceso de certificación que no se llevaría a cabo.

Objetivos:

Así, se deduce el siguiente objetivo general SMART para el desarrollo del proyecto, con sus objetivos específicos.

a) Objetivo general:

Plan teórico para reducir el fósforo soluble un 40% en el efluente de una piscicultura modificando el proceso de tratamiento de aguas, para reducir la huella hídrica y cumplir con los estándares de la certificación BAP, a través del análisis bibliográfico, en un plazo de 4 meses.

b) Objetivos específicos:

1. Búsqueda en el Estado del Arte sobre tecnologías de tratamiento de aguas para reducir fósforo.
2. Analizar factibilidad económica y técnica de la tecnología escogida.

3. Diseñar implementación de tecnología en una piscicultura.
4. Cuantificar impacto de implementación en la huella hídrica.

Estado del Arte:

El tratamiento de aguas residuales debe ser revisado de acuerdo con las condiciones técnicas, económicas y sociales, ya que, son diferentes las industrias que deben tratar el agua utilizada en sus procesos para poder ser vertidas en cuencas de agua (Pardo et al., 2006). Donde, una de estas industrias es la acuícola, en específico los centros de agua dulce, las pisciculturas. Una de las principales problemáticas de estas instalaciones es la concentración de materia orgánica, altas concentraciones de nutrientes como nitrógeno y fósforo, sólidos en suspensión, entre otras (Amelia, 2021; Guillermo, s.f.).

Dentro de las formas de reducir las concentraciones de los contaminantes en las aguas del efluente, se encuentra el mejoramiento de las dietas de los peces, tanto en la composición del alimento, como del alimento entregado, evitando la pérdida de alimento no consumido reduciendo su presencia en efluentes (Humberto, 2020). A pesar de que se mejoren las dietas de los peces, se debe de igual manera tratar el agua proveniente de los estanques de peces, ya que vienen con carga orgánica como heces (Sanz, 2009). Es por esto, que la acuicultura ha desarrollado diferentes metodologías para tratar las aguas provenientes de las pisciculturas, donde existen metodologías que son utilizadas desde sus inicios hasta nuevos métodos que se han desarrollado a través de los años. (*Pisciculturas: el impacto de los efluentes en el medio ambiente*, 2019)

La piscicultura que se utilizará como modelo es de flujo abierto, como se puede ver en el anexo III, se está constantemente extrayendo agua del río, para luego, ser devuelta en su totalidad a la cuenca de agua, con previo tratamiento para que el agua sea de vuelta de la forma más similar a la que fue extraída posible. Para así, cumplir con normativas como el Decreto Supremo 90/2000 y certificaciones como BAP y ASC. (Briceño et al., s.f.)

Dentro de las metodologías empleadas para el tratamiento de efluentes de pisciculturas encontramos: ósmosis (Liu, 2013), recirculación, filtros de grava (Fernández et al., 2009), biofiltración, sedimentación, reactores aerobios y fitorremediación. (Zachritz et al., 2008; Henry-Silva & Camargo, 2006)

Los tratamientos de aguas residuales se clasifican entre primarios, secundarios y terciarios. Cada uno enfocado en tratar o disminuir diferentes tipos de parámetros. El tratamiento primario, tiene como objetivo principal la remoción

de los sólidos suspendidos y carga orgánica, donde la sedimentación es el método que predomina. Por otra parte, el tratamiento secundario está enfocado en la reducción de compuestos orgánicos a través de procesos biológicos, en general, lodos activados (Rojas, 2002). Por su parte, los tratamientos terciarios buscan una limpieza exhaustiva del agua, buscando purificar el recurso hídrico (Mateus y Torres, 2019)

Una de las formas de tratar aguas son las piscinas de decantación, donde la disminución de los parámetros de interés se debe a la decantación, dando por resultado los llamados lodos activos, que contienen los contaminantes provenientes del agua utilizada en el proceso productivo, tales como: heces, alimento, nutrientes, entre otros (Márquez, 2016; Acosta, 2010). En el caso de la piscicultura de estudio, cuenta con dos piscinas de decantación de 720 metros cúbicos cada una, como se puede apreciar en la ilustración 3, con una superficie de 600 metros cuadrados. Donde, este lodo es retirado de acuerdo se vaya saturando, que en promedio es cada dos meses. (Información proporcionada por la empresa)



Ilustración 3: Piscina de decantación de piscicultura D.

Dentro de la industria acuícola, los filtros rotatorios se encuentran dentro de las metodologías más utilizadas. Estos sistemas poseen mallas con coberturas a escala de micras, desde las 20 hasta 500 micras en sus filtros, teniendo una alta eficiencia tanto en la remoción de sólidos suspendidos como en la de nutrientes, nitrógeno y fósforo, con eficiencias promedio de 74%. El funcionamiento de estos filtros es que está rotando constantemente, donde en su parte inferior está en contacto con el agua a tratar, mientras que, en su parte superior cuenta con un sistema de lavado de los filtros, como se puede ver en la ilustración 4. Asimismo, es útil para tratar grandes volúmenes de agua, de hasta 780 litros por segundo. Sin embargo, poseen un alto consumo energético. (Biolight, 2018)

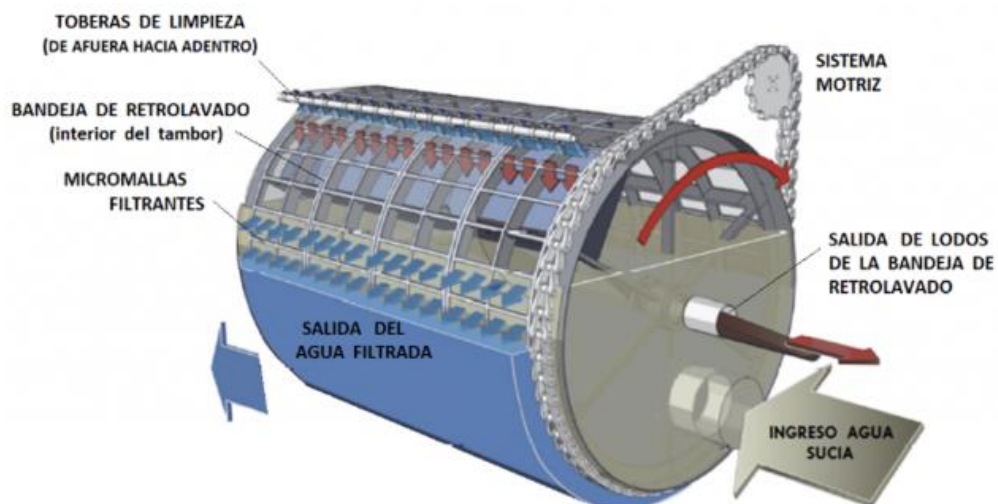


Ilustración 4: Ejemplo de filtro rotatorio. (Biolight, 2018)

Otra metodología utilizada en diversas industrias como la minera y acuícola, aunque en menor medida en esta última, para el tratamiento de diversas aguas residuales es la electrocoagulación (EC), donde, los contaminantes son removidos induciendo corriente eléctrica a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales y no se hace uso de un coagulante químico. La corriente eléctrica provoca reacciones químicas, cuyo resultado final es la estabilidad de las moléculas contaminantes. Con ánodo de aluminio y cátodo de hierro, se logra optimizar el proceso de EC para depurar el lactosuero ácido obteniendo de forma simultánea un 63% de remoción de la DQO y un 83% de recuperación de fósforo en forma de fosfato a partir de los lodos obtenidos. Sin embargo, este tipo de método tiene complicaciones al tratar grandes caudales de agua, además de realizar un alto consumo energético. (Heffron et al., 2019; Jhuesa, 2021; Medel et al., 2019; Mook et al., 2012)

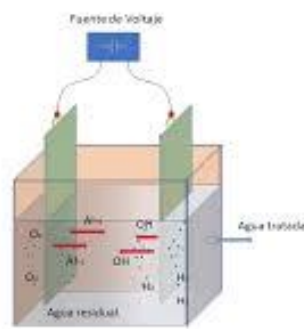


Ilustración 5: Ejemplo de electrocoagulación. (Jhuesa, 2021)

Finalmente, está la fitorremediación, que es la utilización de especies vegetales para reducir contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en el agua. Esta metodología se ha utilizado en tratamientos de aguas residuales acuícolas, y a su

vez, otras industrias. Presenta ventajas de que es capaz de tratar volúmenes grandes de agua, un bajo consumo energético y reducciones de nutrientes entre 40-70% (Hu et al., 2017; Vymazal 2009). Sin embargo, para esto requiere de un gran espacio, ya que el agua debe tener un tiempo de retención de entre 1 a 15 días en las plantas para poder ser tratada. (Llagas y Guadalupe, 2006; Hu et al., 2017; Arteaga-Cortez et al., 2019; Vymazal, 2009)

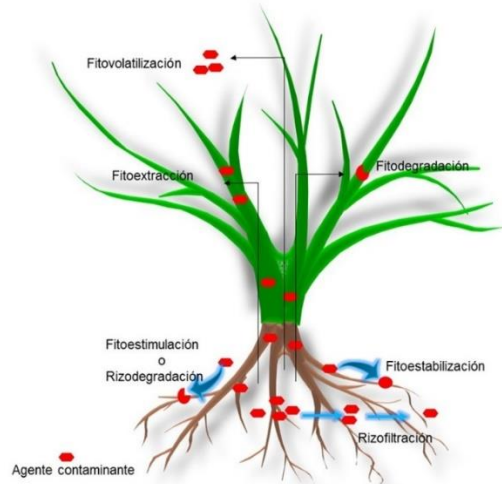


Ilustración 6: Procesos de fitorremediación. (Mendarte-Alquisira, 2021)

Como se puede ver en la ilustración anterior, dentro de la fitorremediación encontramos diferentes tipos de procesos para la captación de contaminantes. Dentro de los que encontramos: rizofiltración, fitoestabilización, fitodegradación, fitoestimulación o fitovolatilización (Mendarte-Alquisira, 2021).

Solución Escogida:

Para escoger la metodología que mejor se adaptara a las necesidades de la empresa, se debe considerar que de acuerdo con la ley 21.305 en su artículo 2° las empresas que durante el año calendario anterior un consumo energético igual o superior a 50 tera-calorías, serán catalogadas como “Consumidores con Capacidad de Gestión de Energía” (CCGE). Lo cual, significa que deberán implementar un sistema de gestión energético, teniendo que reducir sus consumos energéticos, con un uso eficiente de esta. Es por esto, que se consideró la fitorremediación, ya que cuenta con la característica de tener un bajo consumo energético en comparación con las otras metodologías existentes, con tasas de remoción de contaminantes similares. Además, de ser más económico tanto en la implementación como en la mantención. (Winston, 2021; Martínez, 2018)

Para la fitorremediación de aguas residuales industriales, se utilizan los humedales artificiales (Hu et al., 2017). Dentro de los humedales artificiales,

existen dos tipos: flujo subsuperficial y flujo libre. El fósforo se encuentra casi exclusivamente como fosfatos en aguas residuales de origen acuícola, tales como PO_4^{-3} , donde su remoción se debe tanto a la adsorción de en el sustrato, como a su absorción por parte de la planta (Delgadillo et al., 2010). Estos sistemas de tratamiento depuran el fósforo presente en el agua residual por filtración, sedimentación, adsorción y asimilación por parte de las raíces y microorganismos presentes en estas. (Arias y Brix, 2003)

El humedal de flujo superficial o libre, como se puede ver en la ilustración 7, son aquellos donde el agua circula por encima del sustrato, a través de los tallos de las plantas. En este tipo de humedales, las raíces y microorganismos presentes en estas no están en contacto directo con el agua a tratar, por lo que, presentan menor efectividad en la remoción de contaminantes. (Delgadillo et al., 2010; Lin et al., 2002; Martínez et al., 2019; Hu et al., 2017)

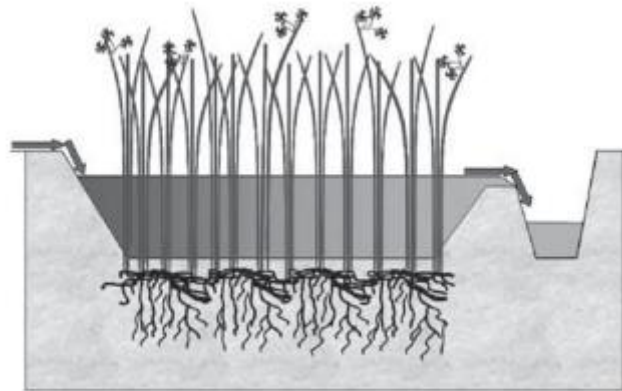


Ilustración 7: Ejemplo de humedal de flujo superficial. (Delgadillo et al., 2010)

Delgadillo, 2010

Por otra parte, el humedal de flujo subsuperficial, como se puede apreciar en la ilustración 8, se refiere a que el agua circula a través de un medio granular, donde se encuentran las raíces de las plantas (Martínez et al., 2019). Así, el agua está en contacto con el sustrato, rizomas y raíces de los organismos vegetales. Donde los microorganismos, raíces y sustrato, los componentes que se encargan de la reducción de los contaminantes. En comparación con los humedales de flujo superficiales, estos presentan mayores tasas de eficiencia en remoción de contaminantes. (Delgadillo et al., 2010; Lin et al., 2002; Vymazal, 2009)

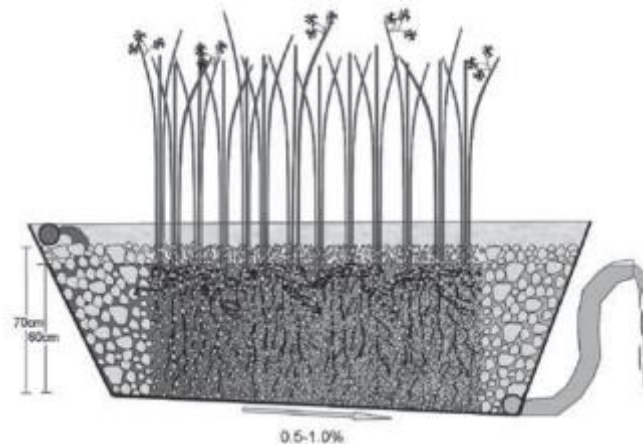


Ilustración 8: Ejemplo humedal de flujo subsuperficial. (Delgadillo et al., 2010)

Los humedales de flujo subsuperficiales se clasifican en dos, dependiendo del sentido del flujo del agua, horizontal y vertical. Los de flujo vertical, son aquellos en los cuales el agua atraviesa el sustrato y raíces desde arriba hacia abajo. Estos sistemas no son continuos, se debe realizar por cargas y descargas de agua, viéndose en la necesidad de utilizar una bomba de agua para esto, teniendo un mayor consumo de energía.

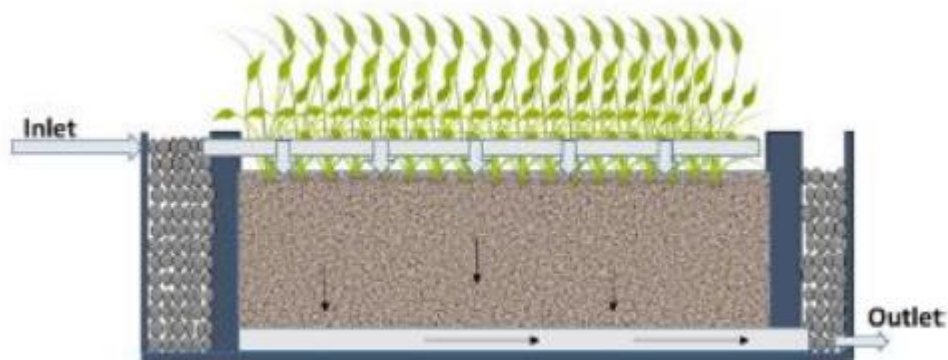


Ilustración 9: Humedal artificial flujo subsuperficial vertical. (Parde et al., 2021)

En cuanto a los sistemas de flujo horizontal, el agua se mueve de forma lateral por el humedal, como se puede ver en la ilustración 10.

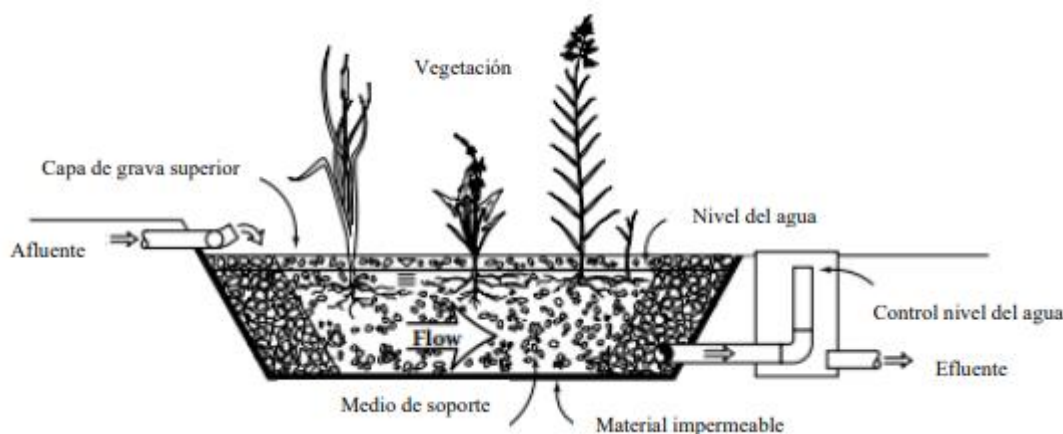


Ilustración 10: Humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal. (Vymazal, 2009)

El humedal subsuperficial de flujo horizontal presenta mayores tasas de eficiencias en la remoción de contaminantes (Hu et al., 2017; Parde et al., 2021; Lin et al., 2002). Es por esto y el menor consumo de energía para su uso, que se opta por un humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal.

Dentro de los aspectos a considerar para la construcción del humedal es el sustrato que lo conformará. El sustrato está formado por arena, grava, roca y sedimentos. Debe ser permeable para que el agua pueda circular sin dificultad a través de este. Dentro de los aspectos a considerar para la construcción del humedal es el clima de la zona. La piscicultura D, está ubicada en una zona con clima templado lluvioso, con temperaturas que oscilan con mínimas de 5°C en invierno con hasta máximas de 22°C en verano. (Michaelaschloegl, s.f.)

Otro de los aspectos importantes para la construcción de un humedal artificial son las especies vegetales que serán parte de este (Winston, 2021). Estos organismos, llevan a cabo la depuración del agua, determinando la eficiencia de la fitorremediación. (Núñez et al., 2004)

Entre las especies vegetales que se utilizan en la literatura, están: *Scirpus holoschoenus* (Junco), *Lemma minor* (Lenteja de agua), *Scirpus californicus* (Totorá), cada una con características que les permite depurar el agua, tales como la fitoabsorción, donde la planta captura los iones de fosfato a través de sus raíces, para luego, utilizarlo en los procesos metabólicos propios de la planta (Arteaga, 2018; Delgadillo et al., 2010; García, 2016).

Tabla 2: Elaboración propia a partir de características de especies vegetales. (García, 2016; Arteaga, 2018; Delgadillo et al., 2010)

| Especie | Características | Capacidad de disminución de nutrientes |
|-----------------|--|--|
| Junco | Alta capacidad adaptativa de ambientes, tolerando bajas a altas temperaturas, un amplio rango de tolerancia al pH y concentraciones de contaminantes. Tamaño entre 0,7 a 1 metro de largo. | Alta |
| Lenteja de agua | Baja capacidad adaptativa a temperaturas, resistentes a oscilaciones de pH. Planta pequeña. | Alta |
| Totora | Alta capacidad adaptativa a diferentes temperaturas y concentraciones de contaminantes. Tamaño entre 0,6 a 1,2 metros de largo. | Alta |

De las tres plantas expuestas en la tabla, tanto el junco como la totora cumplen los requerimientos para la construcción del humedal. Por las características del humedal subsuperficial de flujo horizontal, se debe realizar un deshierbe durante el primer año, luego, se deben retirar restos de plantas muertas que vayan quedando en el sistema una vez al año. (Carvajal et al., 2020; Delgadillo et al., 2010)

Metodología:

Un humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal (FSSH) tiene un comportamiento similar a un reactor de flujo de pistón con cinética química de eliminación de contaminantes de primer orden (Delgadillo et al., 2010; Mateu, 2015; Idris et al., 2010), por lo que, se asume un flujo en condiciones uniformes y flujo continuo.

En primer lugar, se realiza el diseño biológico del humedal (Delgadillo et al., 2010; Mateu, 2015), donde el cálculo se realiza en función del contaminante que se desea reducir en el agua utilizada y el caudal (Delgadillo et al., 2010). Para esto, se utiliza la siguiente ecuación:

$$A = \frac{Q \times \ln\left(\frac{1}{1-E}\right)}{K \times h \times \eta} [m^2] \quad (1)$$

(Delgadillo et al., 2010; Mateu, 2015)

Donde:

A: Área Superficial del FSSH. [m^2]

Q: Caudal de piscicultura. [m^3/d]

E: Tasa de eficiencia de remoción esperada en porcentaje.

K: Constante de reacción de primer orden dependiente de la temperatura. [d^{-1}]

h: Altura del humedal [m]

η : Porosidad del medio granular

Para calcular la constante K, se utiliza la siguiente ecuación:

$$K_T = 1,104 \times 1,06^{T-20} [d^{-1}] \quad (2)$$

(Delgadillo et al., 2010)

Donde:

T: Temperatura promedio del agua [$^{\circ}C$]

Luego, se utiliza ley de Darcy de flujo en medio poroso, como se muestra a continuación:

$$A_c = \frac{Q}{K_s \times S} [m^2] \quad (3)$$

(Delgadillo et al., 2010; Ortega et al., 2010)

Donde:

A_c : Área transversal del humedal [m^2]

Q: Caudal a tratar [m^3/d]

K_s : Conductividad hidráulica [m/d]

S: Pendiente (m/m)

Después, se debe calcular el ancho del humedal en función del área transversal y la profundidad del humedal, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$W = \frac{A_c}{h} [m] \quad (4)$$

(Delgadillo et al., 2010; Ortega et al., 2010)

Donde:

W: Ancho del humedal [m]

A_c : Área transversal del humedal [m^2]

h: Altura del humedal [m]

Finalmente, el largo del humedal se calcula con la siguiente ecuación:

$$L = \frac{A}{W} [m] \quad (5)$$

(Delgadillo et al., 2010; Ortega et al., 2010)

Donde:

L: Largo del humedal [m]

A: Área Superficial del FSSH. [m^2]

W: Ancho del humedal [m]

Para calcular el tiempo de retención hidráulico del FSSH, se obtiene de la siguiente ecuación:

$$t = \frac{V}{Q} [d] \quad (6)$$

(Delgadillo et al., 2010; Ortega et al., 2010)

Donde:

t: Tiempo de retención hidráulico [d]

V: Volumen del humedal [m^3]

Q: Caudal a tratar [m^3/d]

Medidas de Desempeño:

Las medidas de desempeño asociadas a cada uno de los objetivos específicos, que son las cuales se medirán para evaluar el desempeño de la solución propuesta. Estos son:

1. Reducción de la huella hídrica, que se calcula como la sumatoria de las huellas hídricas de cada proceso: azul, verde y gris. Dividido por la cantidad del producto producido, o sea, 1 tonelada de salmón WFE (Hoekstra, 2012), con la siguiente fórmula:

$$HH_{prod}[\rho] = \frac{\sum HH_{proc}[S]}{P[\rho]} \left[\frac{volumen}{masa} \right] \quad (7)$$

Donde:

$HH_{proc}[S]$: huella hídrica de la etapa S del proceso. (volumen/tiempo)

$P[\rho]$: cantidad producida del producto ρ . (masa/tiempo)

Como la compañía no ha realizado medidas para reducir su huella hídrica, para esta, el reducirla en un 1% ya es visto como éxito.

2. Reducción de la concentración de fósforo en el efluente en un 40%, que se mide calculando la concentración de fósforo en miligramos por litro con el método SM 4500-P C.

$$RT = \frac{C_o - C_f}{C_o} \times 100 \quad (8)$$

Donde:

C_o : Concentración de fósforo antes del tratamiento nuevo aplicado. (mg/L)

C_f : Concentración de fósforo después del tratamiento. (mg/L)

3. Reducción de huella hídrica gris, que cuando no existe un uso consuntivo del agua se calcula como la diferencia del contaminante extraída menos su medición en el efluente, dividida en la concentración máxima permitida menos la concentración natural. (Hoekstra, 2012)

$$HH_{proc,gris} = \frac{C_{efl} - C_{real}}{C_{m\acute{a}x} - C_{nat}} \times Efluente \left[\frac{volumen}{tiempo} \right] \quad (9)$$

Donde:

$Efluente$: volumen del efluente. (volumen/tiempo)

C_{efl} : Concentración del contaminante en el efluente. (masa/volumen)

C_{real} : Concentración del contaminante en el afluente

$C_{m\acute{a}x}$: Concentración por normativa máxima en el efluente del contaminante.

C_{nat} : Concentración natural del contaminante en el cuerpo de agua.

En la huella gris, al igual que con la huella hídrica, una reducción en al menos 1% se ve visto como éxito para la empresa.

Plan de Implementación

Para realizar el diseño del humedal se debe tener las condiciones iniciales del agua antes de ingresar al humedal (Delgadillo et al., 2010; Ortega et al., 2010), estas condiciones en la piscicultura D se presentan en la tabla 3:

Tabla 3: Condiciones iniciales del agua antes de ingresar al humedal

| Parámetro | Valor |
|--|-------------------------------|
| Caudal medio (Q) | $11.972 \text{ m}^3/\text{d}$ |
| Concentración inicial media de fósforo (C_o) | 0,35 mg-P/L |
| Temperatura media del agua (T) | 23 °C |

Para poder calcular el área del humedal, primero se debe calcular la constante de reacción de primer orden dependiente de la temperatura con la ecuación 2, que nos da un resultado $K=1,315 \text{ d}^{-1}$. Asimismo, definir las condiciones con las que va a trabajar el FSSH, definidas en la tabla 4:

Tabla 4: Condiciones de funcionamiento FSSH

| Condiciones FSSH | |
|-------------------------------|---|
| Altura (h) | 2 m (Delgadillo et al., 2010; Hu et al., 2017; Mateu, 2015) |
| Constante de reacción (K) | $1,315 \text{ d}^{-1}$ |
| Porosidad sustrato (η) | 0,4 (Delgadillo et al., 2010; Mateu, 2015; García, 2016) |

Así, aplicando los valores mencionados en la ecuación 1 obtenemos el área superficial necesaria para la remoción del fósforo en un 40%, dando como resultado un área necesaria de 5.837 m^2 .

Para el cálculo del área transversal se usa la ecuación 3, con una conductividad hidráulica de 50000 m/d en la que coinciden ambos sustratos, mientras que, se utiliza una pendiente de 1% (Vymazal, 2009; Delgadillo et al., 2010; García, 2016). Con estos valores, nos da un área transversal de 24 m^2 .

Con estos valores obtenidos, a través de la ecuación 4, se obtiene el ancho del humedal, con un valor de 12 m. Asimismo, con la ecuación 5 se obtiene el largo del humedal, 488 m. Sin embargo, estos valores no cumplen la proporción 3 es a 1, el largo debe ser tres veces el ancho para que el humedal tenga una mayor eficiencia de remoción y maximizar el contacto entre el agua con las raíces (Delgadillo et al., 2010; Mateu, 2015; García, 2016; Ortega, 2010). Por lo que, se ajustan a un largo de 150 m y un ancho de 40 m.

El tiempo de retención hidráulica nos indica el tiempo necesario que requiere el FSSH retener el agua para poder depurarla, que se calcula con la ecuación 6. Donde, se obtiene un valor de 1 día.

Finalmente, la especie vegetal a utilizar es el junco, ya que, es una planta que se ha utilizado en la bibliografía, comprobándose su efectividad en la remoción de contaminantes, como se puede ver en la tabla 2. Se utilizan 10 plantas por metro cuadrado, dando un total de 58.370 plantas a utilizar para el humedal. (Llagas y Guadalupe, 2006; Hu et al., 2017; Arteaga-Cortez et al., 2019; Delgadillo et al., 2010)

Así, el humedal quedaría ilustrado como se puede ver en la siguiente ilustración:

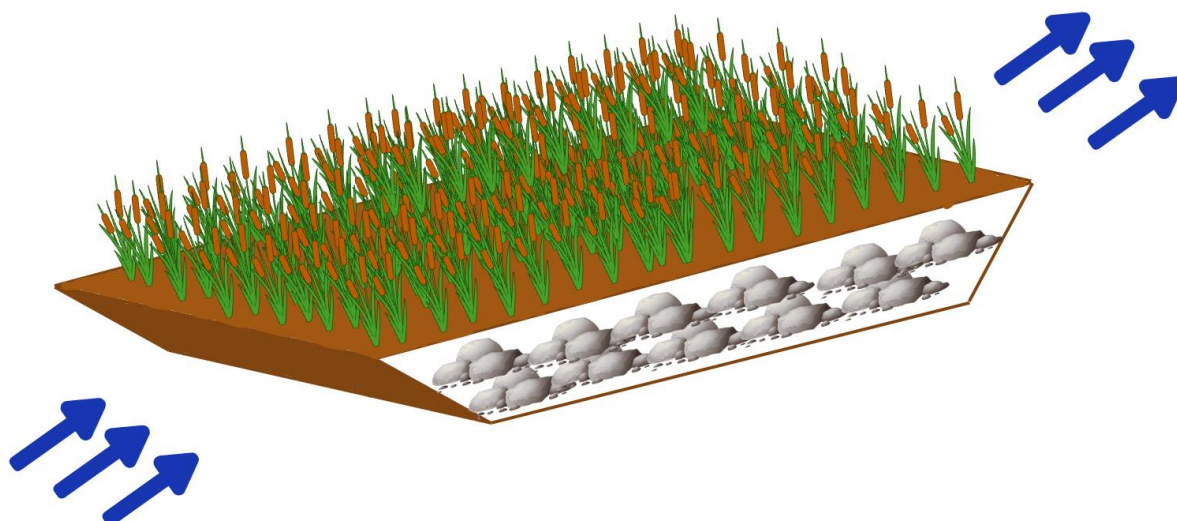


Ilustración 11: Elaboración propia del diseño teórico del humedal

Además, se resumen las condiciones con las que contará el humedal en la tabla 5, y en el anexo VII se muestra el detalle de los cálculos para el FSSH.

Tabla 5: Condiciones del FSSH

| Parámetro | Valor |
|------------------------------------|----------------------|
| Área superficial (A) | 5.837 m ² |
| Ancho (W) | 40 m |
| Largo (L) | 150 m |
| Pendiente (S) | 1% |
| Altura (h) | 2 m |
| Tiempo de retención hidráulico (t) | 1 d |
| Número de plantas | 58.370 |

Para poder instalar este sistema de tratamiento, se debe realizar una consulta de pertinencia al sistema de evaluación de impacto ambiental (SEA), donde el organismo evaluará el impacto ambiental y si se justifica la implementación de lo solicitado.

Una vez aprobada la solicitud, para poder instalar el humedal se deben seguir los siguientes pasos descritos por Parrao (2018) para su instalación:

Tabla 6: Pasos para instalar Humedal (Adaptado de Parrao (2018))

| | |
|-----------------------------------|---|
| Modificaciones canales de agua | Modificar flujo de agua, direccionándolo hacia el nuevo sistema. |
| Excavación | De un volumen de 12.000 m^3 . |
| Instalación Geomembrana | De 2 mm para que no se filtre el agua a tratar al suelo. |
| Posicionamiento de grava | En el total del volumen. |
| Incorporación material de soporte | Instalar malla de soporte para plantas. |
| Instalación de vegetación | Posicionándolas en toda la superficie, 10 plantas por metro cuadrado. |

Así, el agua que provenga de las piscinas de decantación pasará a este sistema adicional de tratamiento, para luego ser vertido a la cuenca, quedando de la siguiente manera:

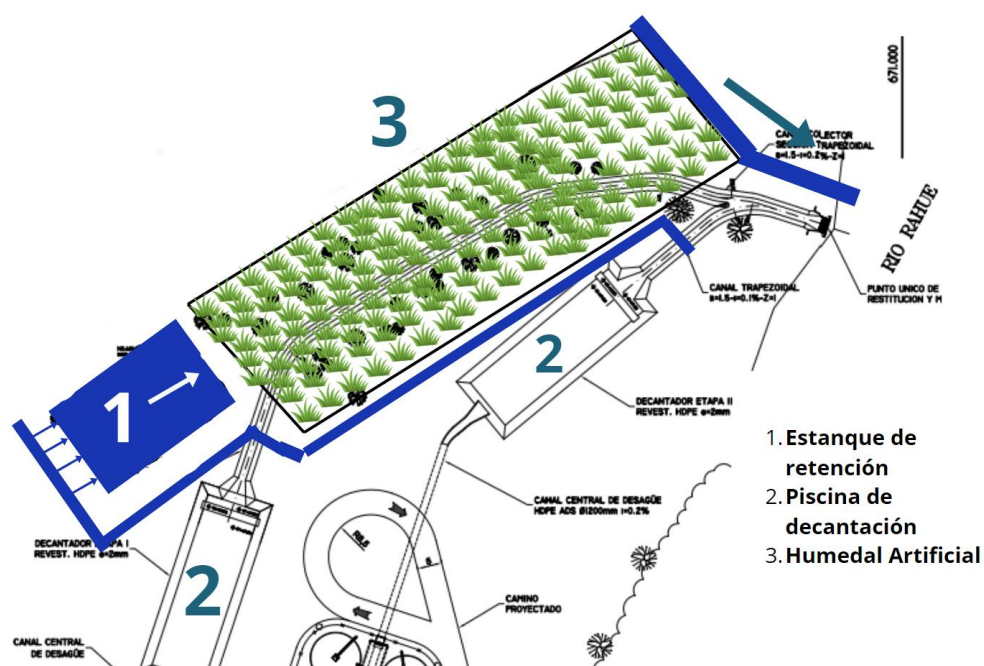


Ilustración 12: Diseño Humedal en piscicultura D

Resultados

Por otra parte, para medir el desempeño del tratamiento, se utilizan las medidas planteadas anteriormente. En el caso del fósforo, el efluente debiese presentar una carga promedio de 0,21 mg-P/L, esto aplicándolo a la ecuación 8 nos da un resultado de 40%, cumpliendo con esta medida de desempeño.

Para el cálculo de la huella gris, se utiliza el efluente de la piscicultura en ese periodo. Como carga natural se utiliza el estudio realizado por Fuentes et al., (2021) que el río presenta una carga de 0,006 mg-P/L, mientras que, como carga real se utilizó 0, al no tener una medición de la calidad del efluente. Con estos parámetros y un caudal total de 4369841 m^3 (Información proporcionada por la empresa), nos da una huella gris de la piscicultura de 65587 m^3 . Si la comparamos con la huella gris en el mismo periodo sin el nuevo tratamiento, refleja una reducción del 63%, como se puede ver en el anexo V.

Finalmente, para el cálculo de la huella hídrica, sumamos esta nueva huella gris de la instalación y manteniendo el resto de las huellas, lo que da un total de $584 \frac{\text{m}^3}{\text{ton}}$ de salmón. Por lo que, genera una reducción de 1 metro cúbico de agua por tonelada de producción.

Evaluación Económica

Para la evaluación económica, se consideró el costo de la instalación y mantención del tratamiento, teniendo en consideración un uso de 20 años (Delgadillo et al., 2010; García, 2016). Según la bibliografía mencionada en este estudio, se deben considerar los siguientes elementos en el presupuesto del humedal:

Tabla 7: Elaboración propia de elementos a considerar según Delgadillo et al., (2010).

| Material | Cantidad |
|-----------------|----------------------|
| Sustrato | 12.000 m^3 |
| Juncos | 58.370 |
| Malla enraizada | 5.837 m^2 |
| Rocas pequeñas | 10.000 m^3 |
| Grava mediana | 2.000 m^3 |
| Arena | 5.837 m^2 |
| Geomembrana | 5.837 m^2 |
| Tuberías | |

Para estimar el costo del humedal, se tomaron en consideración los sistemas construidos anteriormente, sin embargo, estos han sido de menor tamaño que el requerido por la piscicultura D. Por esto, es que se estima el monto que implica su construcción tomando como referencia dichos estudios, con un costo total entre \$70.000.000 - \$90.000.000 (EPA, 2000; Haro y Aponte, 2010; Ampuero 2014; Almada et al., 2022).

La empresa durante el 2023 se vio enfrentada a fiscalizaciones y multas por incumplimientos normativos, lo que generó un ajuste a nivel de producción y presupuesto, donde todos los proyectos se vieron postergados. Este es un tipo de inversión que debe pasar a un área específica de la empresa, donde quizás no es un monto considerable para una empresa de la industria acuícola, sin embargo, en la situación actual las priorizaciones se han modificado.

Conclusiones

A través de la investigación presentada, se puede evidenciar que la industria acuícola está directamente afectada por el cambio climático, por lo que, el tener una producción más sostenible y en especial con un menor impacto ambiental, se ha vuelto una de las necesidades de la industria, en especial los relacionados al recurso hídrico.

Por otra parte, la normativa nacional que hace alusión a la calidad del agua vertida en cuencas de agua, tal como el río, que está determinado por el Decreto Supremo 90/2000 no presenta límites en los parámetros medidos cercanos a los establecidos por la certificación BAP, donde el límite del DS 90 es 20 veces superior al establecido por BAP. Viendo que el estado debe exigir una mayor responsabilidad ambiental a industrias como la acuícola, impulsando a las empresas a tener un menor impacto ambiental.

Dentro de los parámetros medidos en las pisciculturas de la compañía, el fósforo es el que posee una tendencia a estar alterado, sobrepasando el límite establecido por BAP. El fósforo cuando está presente en el agua en altas concentraciones afecta a la biodiversidad del lugar, eutrofizando el ambiente.

Que los sistemas de tratamiento actuales que se tiene en la piscicultura, a pesar de que en general cumple, puede ser mejorado a través de la adición de un

segundo sistema de tratamiento, el humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal. Donde, este tratamiento presenta ventajas de tener un bajo consumo energético, presentando tasas de eficiencia de remoción de contaminantes similares a los sistemas de tratamiento convencionales. Sin embargo, al contar con caudales superiores a 10.000 m^3 es que esta alternativa de tratamiento se vuelve complicada su instalación debido a la gran superficie que se necesita, en este caso, una cercana a los 6.000 m^2 , donde la piscicultura analizada presenta el espacio suficiente para su instalación, pero, para otras no sería una opción viable por el espacio.

Por su parte, el humedal artificial es capaz de reducir la huella gris de la piscicultura en un 63%, reduciendo el impacto al medio ambiente que la producción genera. Que en consecuencia reduce la huella hídrica, sin embargo, al no ser la instalación que posee el mayor aporte de huella gris, la variación que genera no es significativo.

Finalmente, a pesar de no haber podido realizar pruebas experimentales de la eficiencia del humedal en el tratamiento de la piscicultura D, existe literatura suficiente para respaldar la eficacia del sistema. El no haber podido llevar a cabo la prueba experimental, fue debido a temas de tiempo, ya que, para realizar pruebas de esta magnitud dentro de la empresa, se requieren de diferentes aprobaciones para seguir adelante, sin embargo, la compañía muestra un interés en resolver esta problemática, donde se recomienda realizar estas pruebas teniendo en consideración la matriz de riesgo presentada en el anexo VI.

Bibliografía:

1. Amelia, C. F. R. (2021, 28 enero). *Determinación de eutrofización producida por efluentes de estanques de piscicultura por medio del análisis de DBO en la ciudad de Canta: una revisión de la literatura científica*. <https://hdl.handle.net/11537/25603>
2. Arias, C. y Brix, H. (2003). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 13, 17-24.
3. Arteaga, V. Propuesta de metodología para la construcción de humedales artificiales. Instituto de Enseñanza e Investigación en ciencias Agrícolas, Texcoco, México; 2018.
4. *AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023*. (2023). IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
5. Bjørndal, T., & Mrdalo, Z. P. Đ. (2023). Salmon aquaculture in the Faroe Islands historical developments and future prospects. *Aquaculture Economics & Management*, 1-21. <https://doi.org/10.1080/13657305.2023.2165196>
6. Briceño, F., Gutierrez, X., Villarroel, C., Feest, P., Tapia, J., & Aatland, A. Precipitaciones.
7. Childers, D. Corman, J. & Elser, J. 2011. Desafíos de sostenibilidad del fósforo y los alimentos: soluciones para cerrar el ciclo del fósforo humano, *BioScience* 61(2),117–124.
8. Carvajal, M. J. P., Bonilla, D. A. G., & Cepeda, M. R. M. (2020). Planta de totora en humedal artificial de flujo subsuperficial. *Revista Caribeña de Ciencias Sociales*, 9(9).
9. Correia, G.T., Ortiz, I.A.S., Gebara, D., Sobrinho, M.D. and Matsumoto, T. 2013. Phosphorus removal in different wastewater by fluidized bed airlift reactors with internal circulation. *Revista Facultad De Ingeniería Universidad De Antioquia* (67), 172-182.
10. Delgadillo, O., Pérez, F., Camacho, A. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Nelson Antequera.
11. Del Congreso Nacional, B. (s. f.). *Biblioteca del Congreso Nacional*. www.bcn.cl/leychile.
<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=182637>
12. Encuesta de Percepción Sustentabilidad y Consumo, SERNAC 2022.
13. Fernández, J., GARCÍA, M., & LUNA, M. (2009). Estudio de la filtración ascendente en gravas en el tratamiento de efluentes de la producción de tilapia roja (*Oreochromis* sp.). *Revista Ingeniería Hoy*, 31, 35-42.
14. Fuentes, N., Ríos, C., Arriagada, A. (2021). Diagnóstico ambiental de los ríos Rahue y Damas. https://www.municipalidadesosorno.cl/archivos/diagnostico_rios.pdf

15. Global Seafood Alliance. (2021, 4 octubre). *Efectos del cambio climático en la producción acuícola - Responsible Seafood Advocate*. <https://www.globalseafood.org/advocate/efectos-del-cambio-climatico-en-la-produccion-acuicola/>
16. Guillermo, C. F. (s. f.). *TRATAMIENTO DE EFLUENTES PISCÍCOLAS (TILAPIA ROJA) EN LAGUNAS CON azolla pinnata*. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1692-35612013000200006&script=sci_arttext
17. Guzmán, C. D., Verzijl, A., & Zwarteveen, M. (2017). Water Footprints and 'POzas': conversations about practices and knowledges of water efficiency. *Water*, 9(1), 16. <https://doi.org/10.3390/w9010016>
18. Hatchery Standard. Issue 2.1. Best Aquaculture Practices (BAP), 2023.
19. Henry-Silva, G. G., & Camargo, A. F. M. (2006). Efficiency of aquatic macrophytes to treat Nile tilapia pond effluents. *Scientia Agricola*, 63(5), 433-438. <https://doi.org/10.1590/s0103-90162006000500003>
20. Hoekstra, A. Y., Chapagain, A., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. (2012). The Water Footprint Assessment Manual. In Routledge eBooks. <https://doi.org/10.4324/9781849775526>
21. Hu, J., Hu, R., Qi, D., & Lu, X. (2017). Study on treatment of aquaculture wastewater using a hybrid constructed Wetland. *IOP conference series*, 61, 012015. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/61/1/012015>
22. Humberto, C. T. (2020). *Reemplazo de aceite y harina de pescado en la industria de alimentos para salmones en Chile*. <https://repositorio.uc.cl/dspace/items/4d9b105b-8105-4ce3-bd6d-a791d972355c>
23. Idris, A., Abdullah, A. G. L., Hung, Y., & Wang, L. K. (2010). Wetlands for wastewater treatment. En *Humana Press eBooks* (pp. 317-350). https://doi.org/10.1007/978-1-60327-031-1_10
24. Lekang, O. (2013). *Aquaculture Engineering*. John Wiley & Sons.
25. Ley 21.305, (2021). *Biblioteca del congreso nacional*. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1155887>
26. Liu, C. C. (2013). The development of a renewable-energy-driven reverse osmosis system for water desalination and aquaculture production. *Journal of Integrative Agriculture*, 12(8), 1357-1362. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(13\)60541-9](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60541-9)
27. Martínez, J. y Casallas, M. (2018). Contaminación y remediación de suelos en Colombia: aplicación a la minería de oro. Colombia: EAN.
28. Márquez, M. (2016). Proyecto de piscifactoría de trucha arcoíris con depuración de aguas por filtro verde en Biescas. <https://core.ac.uk/download/pdf/289986893.pdf>

29. Mateu, B. (2015). Estudio y dimensionado experimental de humedales artificiales para la mejora de la calidad de aguas de cursos fluviales eutrofizados.
30. Mateus-Malagón, A y Torres-Castro, J. (2019). Diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales de una fábrica de bocadillos para la reutilización en riego agrícola implementando nanoarcillas modificadas magnéticamente como tratamiento terciario.
31. Mendarte-Alquisira, C. (2021). *Fitorremediación: alternativa biotecnológica para recuperar suelos contaminados con DDT. una revisión*. <https://www.redalyc.org/journal/432/43271644020/html/>
32. Michaelaschloegl. (s. f.). *Datos climáticos y meteorológicos históricos simulados para Puerto Octay*. meteoblue. https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/climatemodelled/puerto-octay_chile_3874951
33. Morán, M. (2023, 15 septiembre). *Consumo y producción sostenibles - desarrollo sostenible*. Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/>
34. Noticias, S. (2023, 11 mayo). Avanza implementación de cumplimientos del APL de la Salmonicultura. *Salmonexpert*. <https://www.salmonexpert.cl/acuerdo-produccion-limpia-intesal-salmonchile/avanza-implementacion-de-cumplimientos-del-apl-de-la-salmonicultura/1520987>
35. *Nuestras metas*. (s. f.). Global Salmon Initiative. <https://globalsalmoninitiative.org/es/acerca-de-nosotros/nuestras-metas/>
36. Núñez, R., Meas, Y, Ortega, R. y Olguín, E. (2004). Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones. *Ciencia - Academia Mexicana de Ciencias*, 55 (3), 69-83.
37. Noticias, S. (2023, 11 mayo). Avanza implementación de cumplimientos del APL de la Salmonicultura. *Salmonexpert*. <https://www.salmonexpert.cl/acuerdo-produccion-limpia-intesal-salmonchile/avanza-implementacion-de-cumplimientos-del-apl-de-la-salmonicultura/1520987>
38. Oceana. (2022, 10 enero). Alerta internacional por mal manejo de las salmoneras en Chile - Oceana Chile. Oceana Chile. <https://chile.oceana.org/comunicados/alerta-internacional-por-mal-manejo-de-las-salmoneras-en-chile/>

39. Ortega, E, Ferrer, Y, Salas, JJ, Aragón, C, Real, A. (2010). Manual para la implementación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino: Madrid, España.
40. Parde, D., Patwa, A., Shukla, A., Vijay, R., Killedar, D. J., & Kumar, R. (2021). A review of constructed wetland on type, treatment and technology of wastewater. *Environmental Technology & Innovation*, 21, 101261. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101261>
41. Pardo, S., Suárez, H., & Soriano, E. (2006). Tratamiento de efluentes: una vía para la acuicultura responsable. *Revista MVZ Córdoba*, 11(1), 20-29.
42. PARRAO LÓPEZ, L. A. (2018). Diseño y Construcción de un Prototipo de Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial para el Tratamiento de aguas Residuales Domésticas.
43. *Pisciculturas: el impacto de los efluentes en el medio ambiente*. (2019, 12 febrero). Aqua. <https://www.aqua.cl/reportajes/pisciculturas-impacto-los-efluentes-medio-ambiente/#>
44. Política de medio ambiente Australis Seafoods, 2023.
45. Reporte de sostenibilidad Australis 2020, 2021.
46. Reporte de sostenibilidad Australis 2022, 2023.
47. Rojas, R. (2002). Sistemas de tratamiento de aguas residuales. *Gestión integral de tratamiento de aguas residuales*, 1(1), 8-15.
48. Sanz, F. (2009). *La nutrición y alimentación en piscicultura*. CSIC. https://books.google.cl/books?hl=es&lr=&id=NEqkj2By-kEC&oi=fnd&pg=PA15&dq=heces+de+peces+en+piscicultura&ots=TNgiLM2Fmi&sig=7J-xluOvOGrZd5rJgkt1mSOqxcl&redir_esc=y#v=onepage&q=heces%20de%20peces%20en%20piscicultura&f=false
49. United Nations. (s. f.). *El agua: en el centro de la crisis climática | Naciones Unidas*. [https://www.un.org/es/climatechange/science/climate-issues/water#:~:text=El%20cambio%20clim%C3%A1tico%20afecta%20al,agua%20\(ONU%2DAgua\).](https://www.un.org/es/climatechange/science/climate-issues/water#:~:text=El%20cambio%20clim%C3%A1tico%20afecta%20al,agua%20(ONU%2DAgua).)
50. Valencia, F. T. (2019). Regulación de la sequía en Chile: análisis normativo de la declaración de escasez. *Revista de Derecho Administrativo Económico*, (29), 117-138.
51. Vymazal, J. (2009). The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater. *Ecological Engineering*, 35(1), 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.08.016>
52. Winston, Q. Q. A. (s. f.). *DISEÑO y CONSTRUCCIÓN DE HUMEDAL ARTIFICIAL PARA LA RECUPERACIÓN DE AGUAS RESIDUALES EN LA POBLACIÓN DE ALCALÁ*.

http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S2225-87872021000200009&script=sci_arttext

53. Zachritz, W., Hanson, A. T., Saucedo, J. A., & Fitzsimmons, K. (2008). Evaluation of Submerged Surface flow (SSF) constructed wetlands for recirculating tilapia production systems. *Aquacultural Engineering*, 39(1), 16-23. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2008.05.001>
54. Zhang, M., Pan, L., Su, C., Liu, L., & Dou, L. (2021). Simultaneous aerobic removal of phosphorus and nitrogen by a novel salt-tolerant phosphate-accumulating organism and the application potential in treatment of domestic sewage and aquaculture sewage. *Science of The Total Environment*, 758, 143580. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143580>
55. ¿Qué es una consulta de pertinencia? (s. f.). SEA Chile. <https://www.sea.gob.cl/consulta-de-pertinencia/que-es-una-consulta-de-pertinencia>

Anexos:

Anexo I: Valores de porosidad y conductividad para diferentes sustratos.

(Mateu, 2015)

| Tipo de sustrato | Tamaño efectivo d10 (mm) | Porosidad (%) | Conductividad hidráulica ($m^3/m^2 \cdot d$) | Porosidad (η) |
|-------------------------|-------------------------------------|--------------------------|--|--|
| Arenas graduadas | 2 | 28-32 | 100-1000 | 0,300 |
| Arenas gravosas | 8 | 30-35 | 500-5000 | 0,325 |
| Gravas finas | 16 | 35-38 | 1000-10000 | 0,365 |
| Gravas medianas | 32 | 36-40 | 10000-50000 | 0,380 |
| Rocas pequeñas | 128 | 38-45 | 50000-250000 | 0,415 |

Anexo II: Tabla 1 DS 90

TABLA N° 1

LIMITES MAXIMOS PERMITIDOS PARA LA DESCARGA DE RESIDUOS
LIQUIDOS A CUERPOS DE AGUA FLUVIALES

| Contaminantes | Unidad | Expresión | Limite Máximo Permitido |
|---|------------|-------------|-------------------------------|
| Aceites y Grasas | mg/L | A y G | 20 |
| Aluminio | mg/L | Al | 5 |
| Arsénico | mg/L | As | 0,5 |
| Boro | mg/L | B | 0,75 |
| Cadmio | mg/L | Cd | 0,01 |
| Cianuro | mg/L | CN- | 0,20 |
| Cloruros | mg/L | Cl- | 400 |
| Cobre Total | mg/L | Cu | 1 |
| Coliformes Fecales o Termotolerantes | NMP/100 ml | Coli/100 ml | 1000 |
| Indice de Fenol | mg/L | Fenoles | 0,5 |
| Cromo Hexavalente | mg/L | Cr6+ | 0,05 |
| DBO5 | mg O2/L | DBO5 | 35 * |
| Fósforo | mg/L | P | 10 |
| Fluoruro | mg/L | F- | 1,5 |
| Hidrocarburos Fijos | mg/L | HF | 10 |
| Hierro Disuelto | mg/L | Fe | 5 |
| Manganeso | mg/L | Mn | 0,3 |
| Mercurio | mg/L | Hg | 0,001 |
| Molibdeno | mg/L | Mo | 1 |
| Níquel | mg/L | Ni | 0,2 |
| Nitrógeno Total Kjeldahl | mg/L | NKT | 50 |
| Pentaclorofenol | mg/L | C6OHCl5 | 0,009 |
| PH | Unidad | pH | 6,0 -8,5 |
| Plomo | mg/L | Pb | 0,05 |
| Poder Espumógeno | mm | PE | 7 |
| Selenio | mg/L | Se | 0,01 |
| Sólidos Suspendidos | | | |
| Totales | mg/L | SS | 80 * |
| Sulfatos | mg/L | SO42- | 1000 |
| Sulfuros | mg/L | S2- | 1 |
| Temperatura | C | T° | 35 |
| Tetracloroetano | mg/L | C2Cl4 | 0,04 |
| Tolueno | mg/L | C6H5CH3 | 0,7 |
| Triclorometano | mg/L | CHCl3 | 0,2 |
| Xileno | mg/L | C6H4C2H6 | 0,5 |
| Zinc | mg/L | Zn | 3 |

Anexo III: Ejemplo de funcionamiento de piscicultura. (Elaboración propia)

- Afluente
- Efluente
- Piscinas alevines
- Piscinas smolts
- Piscinas de decantación
- Toma de muestras



Anexo IV: Caudales medios de piscicultura D. (Elaboración propia a partir de información proporcionada por la empresa.

| | Caudal medio m3/día |
|----------|---------------------|
| jul-22 | 12456 |
| ago-22 | 17430 |
| sept-22 | 10550 |
| oct-22 | 13420 |
| nov-22 | 10200 |
| dic-22 | 10870 |
| ene-23 | 11330 |
| feb-23 | 11220 |
| mar-23 | 10350 |
| abr-23 | 12540 |
| may-23 | 11000 |
| jun-23 | 12300 |
| Promedio | 11972 |

Anexo V: Huella gris con y sin tratamiento del humedal. (Elaboración propia)

| | |
|-------------|-----------|
| Sin humedal | 153036 m3 |
| Con humedal | 65587 m3 |

Anexo VI: Matriz de riesgos de proyecto piloto. (Elaboración propia)

| Tipo de Riesgo | Probabilidad | Impacto | Mitigación |
|--|---|--|---|
| | 5. Muy probable 4. Probable 3. Es posible 2. Poco probable 1. Muy poco probable | 5. Muy alto 4. Alto 3. Medio 2. Bajo 1. Muy bajo | |
| Muerte de plantas | 4. Probable | 5. Muy alto | Revisión de las condiciones necesarias para que la planta crezca en el medio. |
| Falta de insumos para montar prototipo. | 3. Es posible | 5. Muy alto | Solicitar con anticipación insumos necesarios para el montaje del prototipo. |
| Daño de muestra de efluente. | 2. Poco probable | 4. Alto | Revisión de metodología de extracción de muestras NCH 411 |
| Dificultad para ir a extraer muestras. | 3. Es posible | 4. Alto | Coordinar con anticipación la solicitud de transporte al centro. |
| Falla en la metodología de análisis de fósforo total | 3. Es posible | 5. Muy alto | Revisar procedimiento de medición para así evitar errores. |

Anexo VII: Cálculos de dimensiones del FSSH.

| |
|--|
| $(1) A = \frac{11.972 \frac{m^3}{d} \times \ln\left(\frac{1}{1-0.4}\right)}{1.315 d^{-1} \times 2 m \times 0.4} = 5.837 [m^2]$ |
| $(2) K_T = 1,104 \times 1,06^{23-20} = 1,315 [d^{-1}]$ |
| $(3) A_c = \frac{11.972 \frac{m^3}{d}}{50.000 \frac{m}{d} \times 1\%} = 24 [m^2]$ |
| $(4) W = \frac{24 m^2}{2 m} = 12 [m]$ |
| $(5) L = \frac{5.837 m^2}{24 m} = 488 [m]$ |
| $(6) t = \frac{12.000 \frac{m^3}{d}}{11.972 \frac{m^3}{d}} = 1 [d]$ |