



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE DE CONCEPCIÓN – REY BALDUINO DE BÉLGICA

“ESTIMACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA EN LA PRODUCCIÓN DE CELULOSA
EN LA REGIÓN DEL BIOBÍO”

Trabajo de Titulación para optar al Título
Profesional de Ingeniero en Ejecución en
Gestión y Control Ambiental

Integrante:

Josefa Seagars Rojas

Profesor Guía:

Dr. Daniel Moena Flandes



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Estimación de la Huella Hídrica en la Producción de Celulosa en la Region del Biobío

Nombre del candidato(a): Josefa Saray Seagars Rojas

Carrera / Grado: Ingeniera en Ejecución en Gestión y Control Ambiental

Campus: Concepción Departamento: Química y Medio Ambiente

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Daniel Moena, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

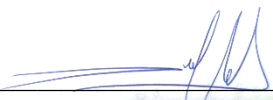
☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

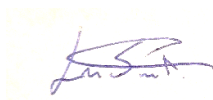
Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis: Daniel moena Flandes

Fecha: 08-01-2026 Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 08-01-2026 Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Resumen Ejecutivo

La creciente presión sobre los recursos hídricos, asociada al cambio climático, el aumento de la demanda productiva y las exigencias regulatorias ha impulsado la necesidad de evaluar de manera integral el uso y la contaminación del agua en los sectores industriales. En este contexto, la industria de la celulosa representa una actividad de alta relevancia en la Región del Biobío, tanto por su aporte económico como por su interacción directa con los sistemas hídricos superficiales y marinos. El presente trabajo tiene como objetivo estimar y analizar la huella hídrica de la producción de celulosa en la Región del Biobío, considerando sus componentes azul, verde y gris, y evaluar el cumplimiento de la normativa ambiental vigente para las dos empresas durante los años 2021 y 2022.

El estudio se desarrolló a partir de información secundaria proveniente de reportes corporativos, seguimiento ambiental disponible en el Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental (SNIFA), resoluciones de calificación ambiental (RCA), reportes integrados de sostenibilidad y antecedentes técnicos de organismos públicos. La metodología utilizada se basó en los lineamientos del Water Footprint Network (WFN), adaptados a la disponibilidad de información nacional, y en el marco normativo chileno, particularmente el Decreto Supremo N°90/2000, que regula la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua superficiales y marinos.

La huella hídrica azul se estimó a partir del volumen de agua efectivamente consumida en el proceso productivo, definida como la diferencia entre el agua captada y el agua devuelta al cuerpo receptor, normalizada por la producción anual de celulosa (m³/año). Este indicador permitió cuantificar la presión directa ejercida por cada empresa sobre los recursos hídricos superficiales, evidenciando el rol de la eficiencia hídrica y la recirculación de agua en los procesos industriales modernos.

Por su parte, la huella hídrica verde fue estimada mediante una formulación simplificada, considerando la precipitación efectiva, el área forestal involucrada y una fracción de aprovechamiento representativa. Este componente permitió incorporar el uso indirecto del agua asociada a la producción forestal, que constituye la base de la industria de la celulosa. La inclusión de la huella verde resulta especialmente relevante en un contexto de variabilidad climática y sequías prolongadas, que afectan la disponibilidad hídrica en la región.

La huella hídrica gris se evaluó a partir de las cargas contaminantes asociadas a los parámetros AOX, fósforo, cadmio y plomo, seleccionados por su relevancia ambiental, su relación con el proceso productivo de la celulosa y su presencia en la normativa vigente. Para ello, se consideraron concentraciones de descarga reportadas por las empresas y se compararon con las concentraciones naturales o de referencia de los cuerpos receptores, permitiendo estimar el volumen de agua necesario para diluir la carga contaminante hasta niveles aceptables.

Adicionalmente, se realizó una comparación sistemática de los resultados obtenidos con los límites máximos establecidos en el Decreto Supremo N°90, diferenciando entre los tipos de cuerpo receptor y las tablas normativas aplicables a cada empresa. Este análisis permitió evaluar el grado de cumplimiento ambiental y la coherencia entre los indicadores de huella hídrica y la regulación chilena en materia de descargas líquidas.

Los resultados evidencian que, durante los años 2021 y 2022, ambas empresas cumplieron con los límites máximos permisibles establecidos para los parámetros analizados, manteniendo concentraciones de descarga inferiores a los valores normados. En particular, los niveles de metales pesados (cadmio y plomo) se encontraron consistentemente por debajo de los límites regulatorios, mientras que el fósforo presentó valores moderados que no superaron los umbrales establecidos. El parámetro AOX, si bien no está explícitamente regulado por el DS 90, fue analizado de manera complementaria debido a su relevancia ambiental y a su asociación con la industria de la celulosa.



El análisis integral de la huella hídrica permitió identificar que el impacto hídrico de la industria no se limita únicamente al volumen de agua consumida, sino que también está fuertemente influenciado por la calidad del agua descargada y por el uso indirecto del recurso en la etapa forestal. En este sentido, la huella hídrica se consolida como una herramienta complementaria a la normativa ambiental, capaz de entregar una visión más amplia y sistémica de la relación entre producción industrial y recursos hídricos.

Finalmente, el estudio pone de manifiesto la importancia de fortalecer la transparencia de la información ambiental, mejorar la disponibilidad de datos sobre concentraciones naturales de los cuerpos de agua y avanzar hacia una integración más explícita entre los indicadores de huella hídrica y los instrumentos regulatorios existentes. Estos elementos resultan clave para la toma de decisiones, la gestión sostenible del recurso hídrico y la evaluación ambiental de proyectos industriales en regiones con alta presión sobre el agua, como la Región del Biobío.

Keywords:

Huella Hídrica, Huella Azul, Huella Verde y Huella Gris

Índice

Portada.....	
CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO	I
Resumen Ejecutivo	II
Índice.....	IV
Índice de Tablas.....	VI
Índice de Figuras.....	VI
Siglas y Simbología	1
Introducción.....	3
Justificación.....	4
Objetivos	5
Alcances y Limitaciones	6
Metodología.....	6
Capítulo 1: Descripción del proceso productivo	7
1.1. Antecedentes generales de la celulosa.....	8
1.1.1. ¿Qué es la celulosa?	8
1.1.2. Tipos de pulpa de celulosa	8
1.2. Descripción del proceso.....	10
1.2.1. Fabricación de celulosa en la Empresa 1	10
1.2.2. Fabricación de celulosa en la Empresa 2	14
Capítulo 2: Determinación de la huella hídrica total	18
2.1. ¿Qué es la huella hídrica?	19
2.1.1. Huella hídrica azul	19
2.1.2. Huella hídrica verde	20
2.1.3. Huella hídrica gris.....	21
2.2. Calculo huella hídrica empresa 1	23
2.2.1. Calculo huella hídrica azul.....	23
2.2.2. Calculo huella hídrica verde	23
2.2.3. Calculo huella hídrica gris	25
2.2.3.1. Empresa 1 año 2021.....	25
2.2.3.2. Empresa 1 año 2022.....	27
2.2.4. Calculo huella hídrica total	28
2.3. Calculo huella hídrica empresa 2	29
2.3.1. Calculo huella hídrica azul.....	29
2.3.2. Calculo huella hídrica verde	30
2.3.3. Calculo huella hídrica gris	31
2.2.3.1. Empresa 2 Año 2021.....	32
2.2.3.2. Empresa 2 año 2022.....	33
2.3.4. Calculo huella hídrica total	35
2.4. Tabla comparativa	35



Capítulo 3: Normativas Ambientales Vigentes	36
3.1. ¿Qué es una normativa ambiental vigente?	37
3.2 DS 90/2000	37
3.3. AOX	38
3.4. Cadmio	38
3.5. Fosforo.....	39
3.6. Plomo.....	40
3.7. Tabla comparativa de resultados obtenidos con la normativa ambiental vigente.	40
3.8. Análisis datos obtenidos	42
Conclusión.....	43
Referencias	44
Anexos	46

Índice de Tablas

Tabla 1. Huella Hídrica Total Empresa 1 Año 2021 y 2022 29

Tabla 2. Tabla Huella Hídrica Total Empresa 2 Año 2021 y 2022 35

Tabla 3. Tabla Comparativa Empresa 1 vs Empresa 2 35

Tabla 4. Tabla Comparativa Resultados y la Normativa (2021 y 2022) 40

Tabla 5. Tabla de Cumplimiento Empresa 1 41

Tabla 6. Tabla Cumplimiento Empresa 2 41

Índice de Figuras

Figura 1. Estructura de la Celulosa **Error! Bookmark not defined.**

Figura 2. Pasta Mecánica y Pasta Química **Error! Bookmark not defined.**

Figura 3. Etapas proceso productivo en la empresa 1..... **Error! Bookmark not defined.**

Figura 4. Diagrama completo del proceso productivo Empresa 1 13

Figura 5. Proceso Productivo Empresa 14

Figura 6. Diagrama Completo Proceso Productivo Empresa 2 17

Figura 7. Gráfico de Parámetros Empresa 1 41

Figura 8. Gráfico de Parámetros Empresa 2 41

Siglas y Simbología

SMA: Superintendencia del Medio Ambiente

SNIFA: Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental

SEA: Servicio de Evaluación Ambiental

SEIA: Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental

RCA: Resolución de Calificación Ambiental

MMA: Ministerio del Medio Ambiente.

INIA: Instituto de Investigación Agropecuarias

PRAS: Programa para la Recuperación Ambiental y Social

AOX: Compuestos Orgánicos Halogenados Absorbibles

TMP: Pasta Mecánica

CTMP: Pasta Química

RILES: Residuos Industriales Líquidos

NaOH: Hidróxido de Sodio

Na₂S: Sulfuro de Sodio

(C₆H₁₀O₅)_n: Celulosa

Cl₂: Cloro Diatómico

ClO₂: Dióxido de Cloro

H₂O₂: Peróxido de Hidrogeno

O₂: Oxígeno Molecular

NaHSO₃: Bisulfito de Sodio

SO₂: Dióxido de Azufre

CH₄: Metano

N₂O: Óxido Nitroso

CO₂: Dióxido de Carbono

Ca²⁺: Ion Calcio

Fe²⁺: Ion Ferroso

ECF: Elemental Chlorine Free (Libre Cloro Elemental)

pH: Potencial de Hidrogeno

°C: Grado Celsius

Bar: Unidad de medida de presión

m³ /año: Metro Cubico por Año

mm: Milímetro

ha: Hectárea

m: Metro

m²: Metro Cuadrado

m³: Metro Cubico

kg: Kilogramo

kg/año: Kilogramo por Año

mg/L: Miligramo por Litro

DS90/2000: Decreto Supremo N°90/2000

ADN: Ácido Desoxirribonucleico

ARN: Ácido Ribonucleico

ATP: Adenosín Trifosfato

Introducción

La creciente presión sobre los recursos hídricos a nivel global se ha intensificado en las últimas décadas y, en el caso de Chile, responde principalmente a factores como las sequías prolongadas, el cambio climático, el aumento sostenido de la demanda y una gestión históricamente deficiente del recurso. En este contexto, diversos estudios advierten una disminución significativa de las precipitaciones en el país. Al respecto, el Ministerio del Medio Ambiente señala que la comparación entre el período 1985–2015 y el período 2030–2060 indica una disminución generalizada de las precipitaciones respecto de la media histórica, proyectándose reducciones promedio de entre un 5% y un 15% para la zona comprendida entre las cuencas de los ríos Elqui y Baker, con un impacto más acentuado hacia la zona sur, especialmente entre la cuenca del río Biobío y el límite sur de la Región de Los Lagos [21] recopiladas en informes del Ministerio del Medio Ambiente [19]. Este escenario ha impulsado la necesidad de evaluar con mayor precisión el consumo de agua asociado a las actividades productivas.

En este marco, la industria de la celulosa destaca por su relevancia económica y, al mismo tiempo, por su elevada demanda de agua en distintas etapas del proceso productivo, desde la preparación de las astillas hasta el lavado, blanqueo y tratamiento de efluentes [6][14]. Comprender cómo se utiliza el recurso hídrico dentro de la cadena productiva resulta fundamental para avanzar hacia una gestión más sostenible y alineada con los estándares ambientales actuales.

Es por ello por lo que la huella hídrica adquiere especial importancia, ya que corresponde a un indicador que mide el volumen total de agua dulce utilizada directa e indirectamente en la producción de bienes y servicios, así como en los hábitos de consumo [16]. Este concepto permite evaluar el impacto humano sobre los recursos hídricos y promueve un uso más sostenible del agua.

La huella hídrica, propuesta por Hoekstra en 2002 y posteriormente estandarizada por la Water Footprint Network, se desarrolla como una herramienta integral de evaluación que permite cuantificar no solo el volumen de agua efectivamente consumida, sino también aquella incorporada indirectamente en el producto final o requerida para la dilución de contaminantes. A través de sus componentes, huella azul, verde y gris, esta metodología entrega una visión completa del impacto hídrico de un proceso industrial, facilitando la identificación de puntos críticos y oportunidades de mejora [16].

En el caso de la industria celulósica presente en la Región del Biobío, la medición de la huella hídrica adquiere especial relevancia debido a la concentración de plantas productivas y al uso intensivo del recurso hídrico en un territorio cuya disponibilidad puede verse afectada por factores climáticos, presiones industriales y demandas sociales. La evaluación de este indicador permite generar información clave para la toma de decisiones estratégicas y para el fortalecimiento de prácticas de producción sostenible [19].

En este contexto, el objetivo general del presente trabajo es analizar la huella hídrica total, azul, verde y gris, asociada a la producción de celulosa en la Región del Biobío. Para ello, se plantean tres objetivos específicos que orientan el desarrollo del estudio: describir el proceso productivo de la celulosa en la región, con el fin de comprender sus distintas etapas; determinar la huella hídrica total propuesta por Hoekstra [16], considerando tanto el consumo directo de agua como la carga contaminante generada y su impacto sobre los ecosistemas receptores; y analizar el grado de cumplimiento de los resultados obtenidos respecto de los límites establecidos en la normativa ambiental vigente, con el propósito de evaluar la sostenibilidad del proceso y su desempeño frente a las exigencias regulatorias.

De esta manera, la presente investigación busca aportar una visión técnica y actualizada sobre el desempeño hídrico de la industria celulósica regional, contribuyendo al desarrollo de estrategias de gestión eficiente del agua y a la promoción de prácticas productivas responsables.

Justificación

La estimación de la huella hídrica en la producción de la celulosa en la Región del Biobío es fundamental debido a la alta relevancia ambiental, social y económica que tiene este sector en el país. La industria de la celulosa forma parte de una de las principales actividades productivas de la región, siendo a la vez un pilar del desarrollo y una actividad de alto requerimiento hídrico. En un contexto marcado por la creciente escasez de agua, la variabilidad climática y las demandas de distintos usuarios, se vuelve indispensable contar con información precisa y actualizada sobre el uso y la calidad del recurso en los procesos industriales.

La huella hídrica es una herramienta de evaluación que permite no solo cuantificar el volumen de agua consumida directa e indirectamente en la producción, sino también identificar los impactos relacionados con la contaminación hídrica.

En este sentido, la estimación de la huella hídrica no solo entrega un diagnóstico, sino que también abre la posibilidad de diseñar e implementar medidas de mitigación. Estas pueden incluir la optimización en el uso del recurso, la mejora de tecnologías de tratamiento, la recirculación de aguas en los procesos productivos y la reducción de cargas contaminantes. Incorporar este enfoque preventivo y correctivo contribuye a disminuir la presión sobre los cuerpos de agua de la región y a fortalecer la relación de la industria con las comunidades locales.

De esta forma, el estudio no solo busca aportar al conocimiento científico y técnico, sino también constituirse en una herramienta de apoyo para avanzar hacia una gestión más responsable del agua en la Región del Biobío, promoviendo la mitigación de impactos ambientales, el cumplimiento de estándares internacionales de sostenibilidad y la alineación con los compromisos nacionales e internacionales en materia ambiental.



Objetivos

Objetivo General:

Analizar la huella hídrica total (azul, verde y gris) asociada a la producción de celulosa en la Región del Biobío.

Objetivos Específicos:

- Describir el proceso productivo de la celulosa en la región del Biobío.
- Determinar la huella hídrica total, considerando el consumo de agua (huella azul y verde) y la generación de carga contaminante (huella gris) en los ecosistemas receptores.
- Analizar el grado de cumplimiento en los resultados de la huella hídrica respecto a los límites establecidos en la normativa ambiental vigente.

Alcances y Limitaciones

El estudio “Estimación de la Huella Hídrica en la Producción de Celulosa en la Región del Biobío” tiene como objetivo principal analizar la huella hídrica total considerando la azul, verde y gris. Este estudio ayudara a ver la información científica y practica favoreciendo la gestión sostenible del agua. Las actividades principales, será identificar el proceso productivo de la celulosa, calcular y analizar la huella hídrica, utilizando información de fuentes oficiales registradas como SNIFA, SEA, SMA, MMA, datos de referencias nacionales y las normativas y límites de referencia. Este estudio se realizará en dos plantas que se encuentran en la octava región. Se espera que los resultados obtenidos se encuentren dentro de los estándares ambientales vigentes.

El presente estudio se desarrolló considerando información correspondiente a los años 2021 y 2022, debido a la disponibilidad y consistencia de los datos públicos reportados por las empresas analizadas. En particular, la delimitación temporal respondió a la falta de información completa y homogénea para otros períodos, especialmente en el caso de una de las empresas, lo que imposibilitó extender el análisis a años más recientes sin comprometer la comparabilidad de los resultados. No obstante, los años seleccionados representan el período más actualizado con información verificable y accesible, permitiendo realizar una evaluación técnica consistente del proceso productivo, la estimación de la huella hídrica y la comparación de los resultados con la normativa ambiental vigente. Esta limitación temporal no invalida las conclusiones del estudio, pero debe ser considerada al momento de extrapolar los resultados a escenarios futuros o a condiciones operacionales distintas.

Metodología

El presente estudio se desarrolló bajo un enfoque descriptivo-analítico y aplicado, con el objetivo de cuantificar la huella hídrica asociada a la producción de celulosa en la Región del Biobío un método aplicado de cálculo en cual se basa en desagregar el uso del agua en tres componentes fundamentales: azul, verde y gris. La huella azul cuantifica el volumen de agua superficial o subterránea efectivamente consumida en el proceso productivo, considerando la diferencia entre el agua captada y la que retorna al ecosistema. La huella verde corresponde al agua de lluvia almacenada en el suelo y utilizada por la vegetación, estimándose a partir de la precipitación efectiva, el área involucrada y la fracción realmente aprovechada. Finalmente, la huella gris evalúa el volumen de agua necesario para diluir una carga contaminante hasta cumplir con los estándares ambientales, mediante la relación entre la carga emitida y la capacidad de asimilación del cuerpo receptor. En conjunto, esta metodología permite evaluar de forma integral el impacto hídrico de un proceso, considerando tanto el consumo directo como los efectos sobre la calidad del agua y analizar el grado de cumplimiento con los estándares ambientales vigentes. La investigación se realizó bajo un enfoque principalmente cuantitativo, mediante la recopilación y análisis de datos sobre el consumo de agua y la carga contaminante de los efluentes líquidos industriales complementado con un análisis cualitativo de proceso productivo, normativas y regulaciones ambientales.

Para el procesamiento y análisis de los datos se emplearán herramientas informáticas como Excel para la elaboración de tablas, gráficos, con el fin de apreciar de forma visual los datos obtenidos de las tres huellas, los parámetros considerados incluirán consumo de agua, descargas de AOX, Fosforo, Cadmio y Plomo, entregados por fuentes oficiales como SEA, MMA, SEIA, SNIFA, para así utilizar el método planteado por Hoesktra en el año 2002 [16]. Se espera que esta metodología permita obtener resultados robustos sobre la huella hídrica total, evaluar la sostenibilidad del recurso y la gestión ambiental regional.



Capítulo 1: Descripción del proceso productivo

1.1. Antecedentes generales de la celulosa

1.1.1. ¿Qué es la celulosa?

La celulosa pertenece a la familia de los carbohidratos.

Está compuesta de carbono, hidrógeno y oxígeno, contiene un 44,4 % de carbono, un 6,2 % de hidrógeno y un 49,4 % de oxígeno, cuya fórmula empírica más simple es $C_6H_{10}O_5$. Dado que la celulosa es polisacárido, su fórmula evidentemente es $(C_6H_{10}O_5)_n$ es decir, tiene un alto peso molecular [13], se puede apreciar en la Figura 1

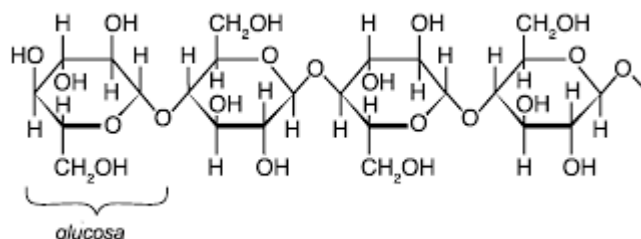


Figura 1 Estructura de la Celulosa, por Steve Keller, 2019,
<https://www.acs.org/content/dam/acsorg/education/resources/highschool/chemmatters/spanishtranslations/cm-april2019-celebrate-paper-spanish.pdf>

La lignina es un componente de la pared celular, muy difícil de extraer. Puede separarse mediante el uso de reactivos drásticos o con reactivos que se combinan químicamente con la lignina, formando un derivado. Esto altera las características de las preparaciones según el método de separación empleado. [13]

Los métodos generales de separación de la lignina se dividen en dos grupos: aquellos que se basan en la disolución de la celulosa y otros carbohidratos, dejando la lignina como residuo, y aquellos que disuelven la lignina, separándola así de los demás componentes. [13]

En la industria de la celulosa se utiliza más el segundo ejemplo, dando como resultado la pulpa de celulosa, siendo esta la materia prima fundamental para la fabricación de papel y otros productos. Existen dos métodos principales para su obtención: la pulpa mecánica y la pulpa química.

1.1.2. Tipos de pulpa de celulosa

La pasta destinada a la fabricación de papel para imprenta, comúnmente denominada pasta mecánica, corresponde a un tipo de pulpa ampliamente utilizada en la industria gráfica y papelería. Su obtención se basa en procesos mecánicos de trituración y refinación de la madera, a diferencia de la pulpa química, cuya producción involucra el uso de reactivos químicos para la separación de las fibras. [10]

Este tipo de pasta se distingue por presentar una menor calidad y nivel de pureza en comparación con la pulpa química, debido a la elevada presencia de lignina y otros componentes no fibrosos. Estas características influyen en su coloración más oscura y en una resistencia mecánica inferior, lo que limita su aplicación a productos de menor exigencia técnica. En consecuencia, la pasta de papel para imprenta se emplea principalmente en la elaboración de papel de periódico, revistas y otros papeles de impresión de bajo costo. [10]

A pesar de sus restricciones en términos de calidad, la pasta mecánica ofrece ventajas relevantes asociadas a su mayor disponibilidad y a costos de producción más reducidos frente a la pulpa química. Asimismo, los avances tecnológicos han permitido optimizar los procesos de refinación y blanqueo, mejorando el desempeño y la calidad final de los papeles elaborados a partir de este tipo de pulpa. [10]

Cabe señalar que existen distintas variantes de pasta utilizada para imprenta, entre las que se incluyen la pasta mecánica (TMP) y la pasta química (CTMP). Estas se obtienen mediante la combinación de procesos mecánicos con tratamientos químicos, lo que permite mejorar las propiedades físicas y ópticas de la pulpa y ampliar su rango de aplicaciones en la industria de la impresión y fabricación de papel. [10]

Pasta mecánica

La pasta mecánica corresponde a un tipo de pulpa celulósica obtenida mediante procedimientos físicos de molienda y refinación de la madera. Este material se emplea como insumo básico en la elaboración de diversos productos de papel y cartón dentro de la industria papelera. [10]

La obtención de la pasta mecánica consiste en la fragmentación y separación de las fibras de la madera a través del uso de equipos industriales, tales como molinos y sistemas de desfibrado. Mediante estos procesos, las fibras celulósicas se liberan junto con otros componentes estructurales de la madera, como la lignina y la hemicelulosa. Si bien esta pulpa presenta un menor grado de pureza en comparación con la pulpa química, se caracteriza por un mayor rendimiento, ya que permite aprovechar una mayor proporción de la materia prima original. [10]

Este tipo de pasta se destina principalmente a la producción de papel de periódico, papel para revistas, papeles de impresión y escritura de bajo costo, así como a la fabricación de cartones y otros productos papeleros de uso similar. [10]

Debido a sus características físicas y químicas, entre ellas el elevado contenido de lignina y su menor resistencia mecánica, la pasta mecánica no resulta adecuada para aplicaciones que demandan altos estándares de calidad, tales como libros, papeles fotográficos o materiales de embalaje de alta resistencia. [10]

Pasta Química

La pasta química, o pulpa química, corresponde a un tipo de pulpa celulósica obtenida mediante procesos químicos destinados a remover la lignina y otros componentes no fibrosos presentes en la madera. Este tratamiento permite aislar de manera más eficiente las fibras de celulosa, obteniendo un material de mayor calidad para la fabricación de papel. [10]

A diferencia de la pasta mecánica, cuya producción se basa principalmente en la acción física de la molienda y el refinado, la pasta química emplea reactivos específicos que facilitan la separación de las fibras celulósicas y la eliminación de impurezas presentes en la materia prima. [10]

Dentro de la pasta química se distinguen principalmente dos tipos:

- **Pulpa Kraft:** Se obtiene mediante el proceso del mismo nombre, el cual utiliza una solución química compuesta principalmente por hidróxido de sodio y sulfuro de sodio para disolver la lignina y otros componentes no deseados. Este método es ampliamente utilizado debido a su alta eficiencia y a la calidad superior de la pulpa obtenida. [10]
- **Pulpa Sulfato:** Se produce a través de un proceso que emplea sulfato de sodio para la separación de las fibras de celulosa. Si bien este método es menos utilizado que el proceso Kraft, aún se aplica en determinadas industrias y zonas geográficas. [10]

La pasta química presenta diversas ventajas frente a la pasta mecánica, entre las que destacan su mayor grado de pureza y la obtención de fibras más largas y resistentes, lo que se traduce en papeles de mejor calidad y con propiedades mecánicas superiores, ambas pastas se pueden observar en la Figura 2. Asimismo, este tipo de pulpa permite procesos de blanqueo más eficientes, posibilitando la producción de papeles con mayor blancura y brillo. [10]

No obstante, la fabricación de pasta química implica costos de producción más elevados y un mayor consumo energético en comparación con la pasta mecánica. Adicionalmente, debido al uso de sustancias químicas, resulta fundamental aplicar medidas adecuadas de gestión ambiental y sistemas de tratamiento de residuos, con el objetivo de reducir los impactos ambientales asociados a este proceso industrial. [10]

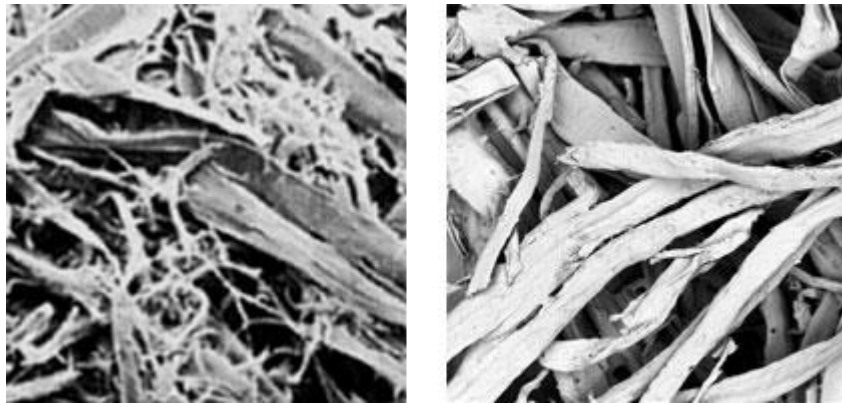


Figura 2. Pasta Mecánica y Pasta Química, por David Carnero, 2020, https://www.cevagraf.coop/blog/pasta-mecanica-y-pasta-quimica/?srsltid=AfmBOopOFX8ezBpEAIE-OXXy_YnToxAQdajRWsQgZT1wsLl5PctXMKIX

1.2. Descripción del proceso

1.2.1. Fabricación de celulosa en la Empresa 1

El proceso productivo de la celulosa en la Planta 1 se compone de una serie de etapas secuenciales y controladas, cuyo objetivo principal es obtener pulpa de alta pureza a partir de la madera. En total son seis etapas para producción de celulosa. Las primeras cinco fases corresponden al proceso productivo tradicional, con el cual se compone de un conjunto de insumos básicos como es la madera, agua, productos químicos y energía, dando origen finalmente a la celulosa. La última fase tiene como finalidad que el proceso productivo se desarrolle de forma eficiente y sustentable, se puede observar en diagrama completo en la Figura 4.

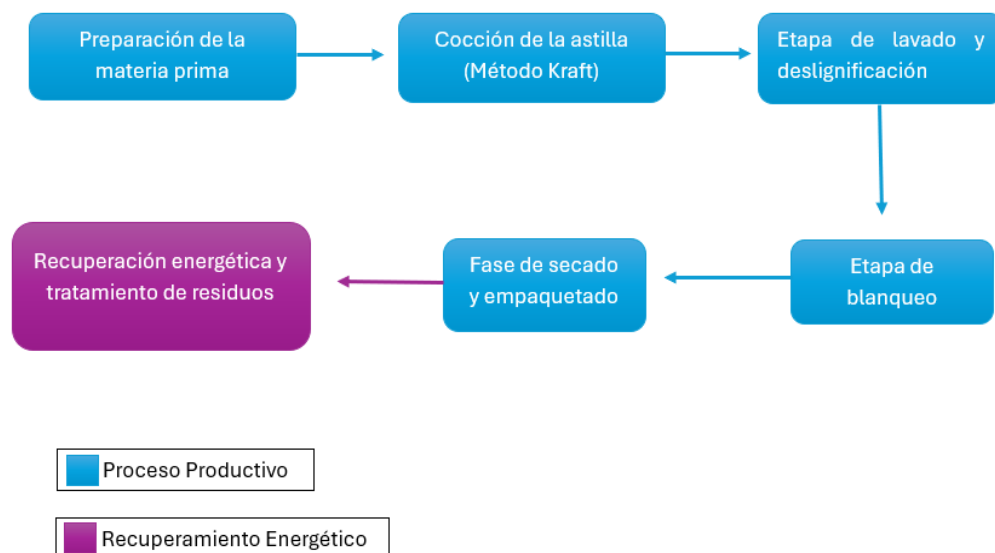


Figura 3. Etapas proceso productivo en la empresa 1, imagen con autonomía.

En la Figura 3 presenta un esquema general del proceso productivo de la celulosa mediante el método Kraft correspondiente a la empresa 1.

1. Preparación de la materia prima

La primera fase corresponde a la preparación de la materia prima, donde la madera proveniente de plantaciones forestales certificadas, principalmente de pino radiata y eucalipto, es sometida a descortezado donde los troncos o también llamados rollizos se le saca la corteza, para posteriormente ser trozado y astillado. Los troncos al ser transportados al patio de madera, donde son limpiados para eliminar impurezas y luego procesados en máquinas astilladoras que generan pequeñas astillas homogéneas, de aproximadamente 15 a 25 milímetros de longitud y 3 a 5 milímetros de espesor. Estas astillas son secadas parcialmente y clasificadas por tamaño, de manera que ingresen al digestor en condiciones óptimas para la cocción. Esta etapa inicial es esencial, ya que la uniformidad de las astillas determina la calidad de la pulpa resultante y la eficiencia del tratamiento químico posterior. [14]

2. Cocción de la astilla (Proceso de Kraft)

El siguiente proceso corresponde a la cocción química de las astillas bajo el proceso llamado Kraft, que corresponde a uno de los procesos más importantes. En esta etapa, las astillas son ingresadas a los digestores continuos, además se agrega una solución alcalina llamada licor blanco, compuesta por hidróxido de sodio (NaOH) y sulfuro de sodio (Na₂S). Esta mezcla es sometida a altas temperaturas, cercanas a los 160 – 170 °C y presiones que pueden alcanzar los 7-10 bar. Estas condiciones provocan la disolución de la lignina, sustancia que une las fibras de la madera, liberando así las fibras de celulosa. Como resultado, se obtiene una pulpa marrón cruda y un subproducto liquido llamado licor negro, que está compuesta de lignina disuelta y los químicos utilizados en la etapa. El licor negro no se desecha, este es destinado a las calderas de recuperación, donde este será aprovechado energéticamente, haciendo el proceso un ciclo casi cerrado. [14]

3. Etapa de lavado y deslignificación

Luego del proceso de la cocción, la pulpa pasa por la etapa de lavado y deslignificación, en la que se eliminan los residuos del licor negro y pequeñas cantidades de lignina que aún se encuentran presentes. Este proceso se realiza con un sistema de lavado a contracorriente en cual se utiliza agua caliente y vapor, manteniendo un medio alcalino, es decir con un pH de 9 y 11. Además en este proceso, se incorpora una fase adicional de deslignificación con oxígeno, en la cual consiste introducir altas dosis de oxígeno en la pasta café con el fin de oxidar la lignina, gracias a este método se puede reducir el contenido de lignina sin recurrir a agentes químicos más agresivos. Esta operación mejora la eficiencia de la siguiente etapa, también reduce la carga contaminante del sistema. [14]

El lavado y clarificación son esenciales para la recuperación de químicos y para asegurar la pureza de las fibras, de modo que la celulosa cumpla con los estándares de calidad exigidos por la industria papelera. [14]

4. Etapa de Blanqueo

Después de obtener la pulpa lavada, comienza la siguiente etapa denominada blanqueo, esta empresa utiliza un estándar ECF (Elemental Chlorine Free). Esto significa, el cloro elemental es sustituido por dióxido de cloro, oxígeno y peróxido de hidrógeno, evitando así la generación de compuestos organoclorados, los cuales podrían afectar negativamente el medio ambiente. [14]

Durante el proceso, la pulpa pasa por una serie de torres donde se aplican estos reactivos bajo control estricto de pH ácido siendo este de 4, temperatura y un tiempo de exposición determinado. Dado que en este proceso se generan componentes orgánicos que no son solubles en medios ácidos, es necesario intercalar las etapas en las que se utilizan productos químicos que generan un medio alcalino, para así poder extraer estos componentes en la estación de lavado. [14]

El objetivo es eliminar la lignina residual, aumentar el brillo y obtener una celulosa blanca de alta pureza, adecuada para la producción de papeles finos, cartones o productos de embalaje. [14]

5. Fase de secado y empaquetado

Con la celulosa ya blanqueada, el material se dirige a la siguiente fase. En esta parte del proceso, la pulpa blanca pasa rodillos con el fin de sacar agua de la pulpa a base de la gravedad, dándole forma de lámina, estas láminas entran a unos pre-secadores, los cuales son grandes cilindros que por dentro circula aire a altas temperaturas, para después entrar a secadores principales con aire caliente que reducen la humedad hasta niveles cercanos de 8-10%. [14]

La celulosa ya seca se corta y se compacta en fardos de aproximadamente 250 kilogramos, que son embalados y etiquetados para su distribución nacional o para exportación. La calidad del secado es determinante para la conservación del producto durante el transporte y almacenamiento, ya que evita la formación de mohos o la degradación de las fibras. [14]

6. Recuperación energética y tratamiento de residuos

Finalmente, todo el proceso se integra con un sistema de recuperación energética y tratamiento de residuos, el cual la empresa asegura el cierre del ciclo productivo y además del cumplimiento de las exigencias ambientales vigentes. El licor negro obtenido en la etapa de cocción se concentra y se quema en calderas de recuperación, donde el calor liberado produce vapor y electricidad que abastece a la propia planta. De esta forma la empresa logra una alta autonomía energética, reduciendo su dependencia de combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, durante la combustión se recuperan los compuestos químicos de sodio y azufre, que son nuevamente incorporados al proceso de cocción, formando un sistema circular de reaprovechamiento químico. En paralelo, los efluentes líquidos provenientes del lavado y blanqueo son tratados mediante procesos primarios, biológicos y terciarios, para garantizar el cumplimiento de la norma chilena D.S. 90/2000, antes de su descarga al medio receptor. Los residuos sólidos, como cenizas y lodos, se disponen de manera controlada o se valorizan como materia prima para compost o como biomasa energética. [14]

En conjunto, estas seis fases conforman un modelo de producción integrado que permite a la empresa obtener celulosa de alta calidad con una gestión eficiente de recursos y un enfoque de sustentabilidad ambiental. El sistema Kraft ECF no solo maximiza el aprovechamiento de la madera, sino que también reduce la generación de residuos y emisiones, consolidando a las plantas chilenas de la Empresa 1 entre las más modernas y responsables del sector forestal a nivel mundial.

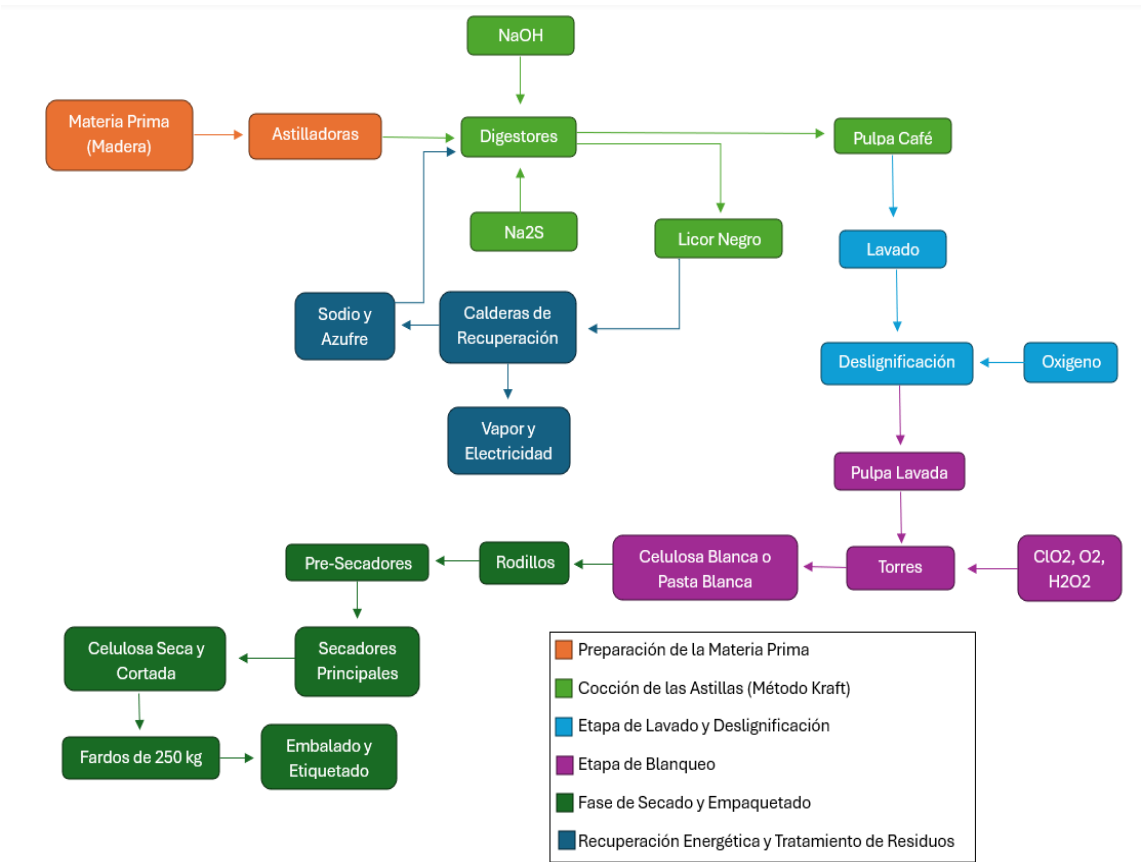


Figura 1. Diagrama completo del proceso productivo Empresa 1, imagen de autonomía

1.2.2. Fabricación de celulosa en la Empresa 2

El proceso productivo de la celulosa en la Empresa 2 representa uno de los pilares de la industria forestal chilena y un referente en innovación tecnológica y sostenibilidad ambiental. A través del uso del proceso Kraft con blanqueo libre de cloro elemental (ECF), la empresa transforma madera proveniente de plantaciones renovables de pino y eucalipto en pulpa de alta pureza destinada al mercado nacional e internacional. Este sistema integra operaciones químicas, mecánicas y energéticas que permiten maximizar la eficiencia en el uso de recursos, reducir emisiones y reutilizar los subproductos generados. Consta de ocho etapas, donde las primeras seis etapas están relacionadas a la producción de celulosa y finalmente las dos últimas etapas corresponden a la recuperación energética, en la Figura 6 se puede observar el diagrama completo de la empresa.

La madera llega en camiones y/o ferrocarriles a la empresa, donde los rollizos de pino y/o eucalipto son directamente enviados al proceso productivo o son almacenados en las canchas de acopio.

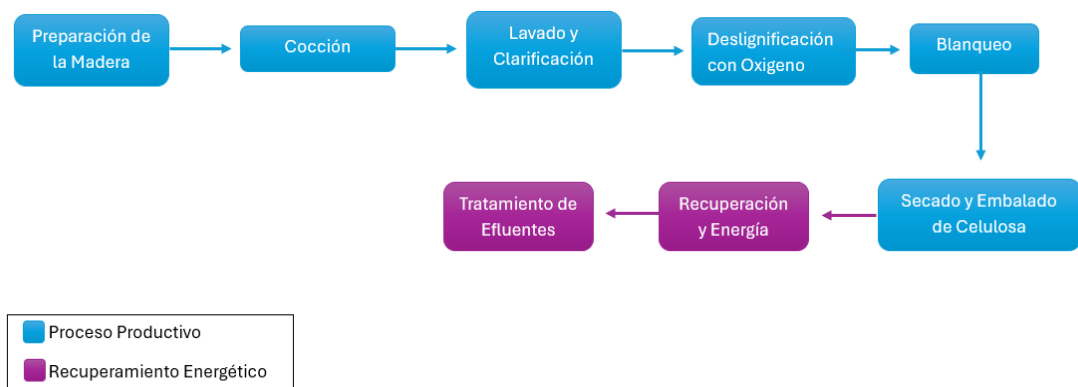


Figura 2. Proceso Productivo Empresa, imagen de autonomía

En la Figura 5 presenta un esquema general del proceso productivo de la celulosa mediante el método Kraft correspondiente a la empresa 2.

1. Preparación de la madera

La planta cuenta con dos líneas de descortezado y astillado que trabajan en paralelo. Siendo estas complementarias, además cuenta con sistema de triturado de corteza, correas transportadoras y pozos de recuperación de aguas de lavado de rollizos con sistema de decantación y retiro de lodos decantados. [6]

Después del astillado de la madera, las astillas son almacenadas en pilas de astillas independientes para pino y eucalipto. Desde las pilas, las astillas de pino y de eucalipto son clasificadas previo al ingreso al proceso de digestión de la madera. [6]

En esta etapa también se obtiene biomasa no pulpable, la que es utilizada como combustible en las calderas de poder. Sin embargo, cualquier excedente generado, puede ser enviado a otras instalaciones. [6]

2. Cocción

Cada línea cuenta con un área de cocción de procesamiento de pulpa. En esta etapa la lignina de la madera es disuelta en una solución de hidróxido de sodio y sulfuro de sodio llamado licor blanco, para lograr la separación de la celulosa o la fibra, así generando la pulpa café la cual es limpiada en la siguiente etapa de lavado. [6][8]

En esta etapa además se obtiene el licor negro débil, el cual se compone de trementina, metanol, jabón, materia orgánica (lignina disuelta), reactivos químicos gastados, entre otros elementos. Particularmente, el condensado de trementina se obtiene a través de un sistema de recuperación para ser posteriormente quemada en el horno de cal y/o comercializada con terceros. [6]

Una vez separa la pulpa café y extraído el licor negro débil, este es filtrado y enviado al área de evaporadores para su concentración y posterior quemado en la Caldera Recuperadora. [6]

Otros subproductos de la cocción corresponden a:

- Nudos y astillas pequeñas generados en ambas líneas.
- Gases no condensables concentrados y diluidos (Sulfuros Totales Reducidos, TRS) que son tratados mediante el sistema de recolección y abatimiento de dichos gases.

3. Lavado y Clarificación

El objetivo de la etapa de lavado es extraer los compuestos orgánicos es decir la lignina de la pulpa, que están disueltas en la etapa de cocción y los compuestos químicos provenientes del licor blanco. [6]

Por otro lado, el propósito de la etapa de clarificación es eliminar de la pulpa las impurezas presentes y separar los nudos no cocidos de la madera, para así prepararlos y ser recirculados a la etapa de cocción y/o enviados a la pila de astillas. [6]

4. Deslignificación con Oxígeno

La etapa de deslignificación con oxígeno consiste en retirar la parte de lignina remanente que existe en el proceso de cocción, mediante la adición de oxígeno, para así oxidar el licor blanco y/o el hidróxido de sodio, este proceso se realiza bajo condiciones controladas de presión y temperatura. En esta etapa, la Empresa 2 cuenta con dos reactores para deslignificar por cada línea de producción. Como resultado de esta etapa se obtiene pulpa cruda delignificada. [6]

Una vez deslignificada, la pulpa pasa por una prensa lavadora, donde se retiran los compuestos orgánicos e inorgánicos disueltos en este proceso. El filtrado recuperado en dicha prensa es licor negro débil, el cual se recircula a las etapas anteriores. [6]

5. Blanqueo

El objetivo de esta etapa es blanquear la pulpa a través de la eliminación de la lignina residual y de otros compuestos que pueden incluir color en la pulpa como dióxido de cloro, peróxido de hidrógeno, hidróxido de sodio y oxígeno. [8]

En las líneas de blanqueo tanto de eucalipto como de pino se realiza por un ajuste de pH con ácido sulfúrico u otro producto. La pulpa fabricada es del tipo ECF, es decir el proceso de blanqueo se realiza con la ausencia del cloro elemental (Cl₂). Luego de las etapas de blanqueo se adiciona una solución de dióxidos de azufre o bisulfito de sodio para estabilizar la blancura. [6]

Finalmente, por cada línea de producción se generan efluentes ácidos y efluentes alcalinos, los cuales son canalizados hacia el sistema de tratamiento de efluentes. Los gases provenientes de las etapas de blanqueo de ambas líneas son tratados en un scrubber que utiliza efluente alcalino y/o bisulfito de sodio, y luego descargados a la atmósfera. [6]

6. Secado y embalado de celulosa

Luego del área de blanqueo, la pulpa, transportada en medio acuoso, es almacenada en torres de pulpa blanca. Desde allí es enviada a la máquina formadora de hoja continua y luego enviada a un secador con vapor donde se produce el secado de la pulpa. Esto se realiza en tres etapas en serie: desaguado por vacío, prensado y secado con vapor. [6]

Una vez obtenida la pulpa seca (celulosa) pasa a las unidades de corte y a líneas a de embalaje donde es transformada en fardos, los cuales se almacenan en la bodega de celulosa. [6]

7. Recuperación y energía

El proceso se enfoca en la recuperación y reutilización de los componentes, siendo así más eficientes generando la autoalimentación para el funcionamiento de la planta. [8]

Algunos ejemplos de esto es la corteza, aserrín y astillas son utilizadas en las calderas como combustible y así generar vapor y energía eléctrica. Además, los residuos orgánicos y sales también se recuperan mezclando con agua para formar licor verde. [8]

8. Tratamiento de efluentes

Los residuos líquidos de todo el proceso son transportados a una planta de tratamiento para ser purificados y así eliminar sustancias que puedan afectar el medio ambiente y devolver el agua a los ríos. Este proceso considera estándares específicos para poder liberar estos líquidos: [8]

- a) Tratamiento primario: Son operaciones básicas para remover material no disuelto y sólidos suspendidos.
- b) Tratamiento secundario: Reducir el contenido biológico del agua. Se estimula mediante el aumento de microorganismos que descomponen la materia.

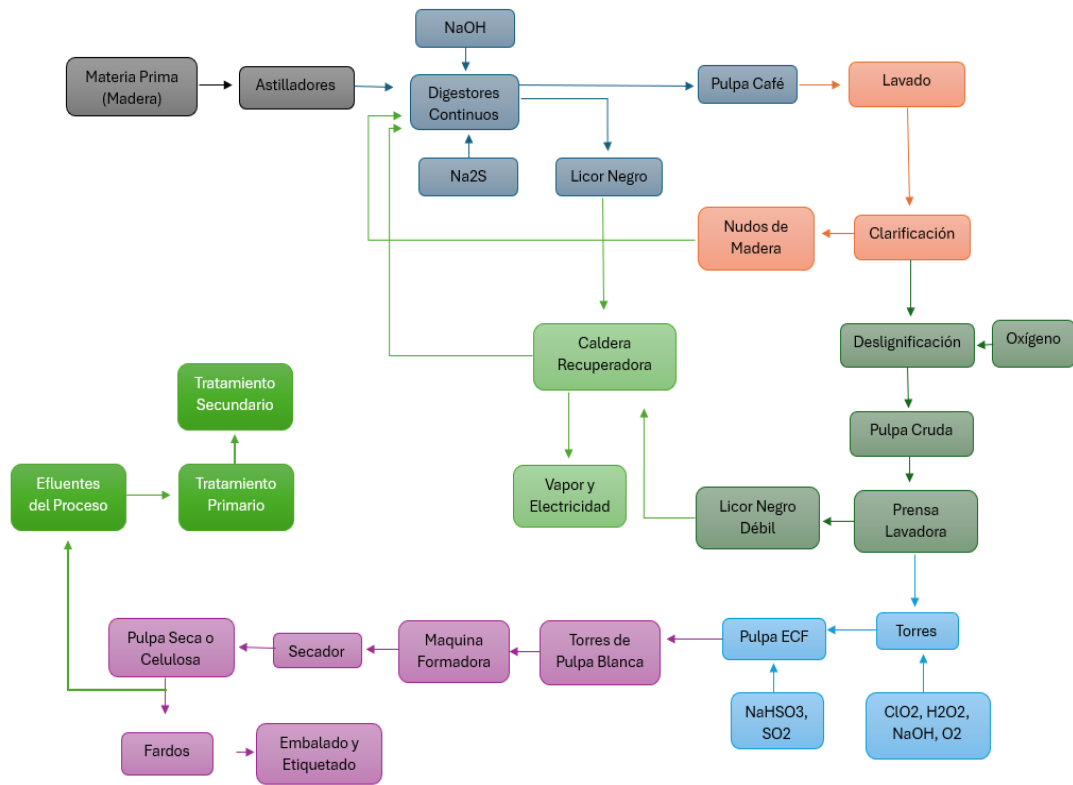


Figura 3. Diagrama Completo Proceso Productivo Empresa 2, imagen de autonomía



Capítulo 2: Determinación de la huella hídrica total

2.1. ¿Qué es la huella hídrica?

La huella hídrica es un indicador del uso de agua dulce que no se centra únicamente en el uso directo del agua por parte de un consumidor o de un productor, sino que se centra también en su uso indirecto. La huella hídrica puede considerarse un indicador integral de la apropiación de los recursos hídricos frente a la medida tradicional y restrictiva de la extracción de agua. Es el volumen de agua dulce usada para elaborar el producto, medido a lo largo de la cadena de suministro completa. [16]

Se trata de un indicador multidimensional que muestra los volúmenes de consumo por origen y los volúmenes de contaminación por tipo de contaminación; todos los componentes del agua dulce total están geográfica y temporalmente específicos. La huella hídrica azul se refiere al consumo de los recursos de agua azul (aguas superficiales y subterráneas) a lo largo de la cadena de suministro de un producto. El consumo se refiere a una pérdida de agua de una masa de agua disponible en una zona de captación o cuenca hidrográfica. Las pérdidas ocurren cuando el agua se evapora, regresa a otra cuenca hidrográfica o al mar, o se incorpora a un producto. Asimismo, la huella hídrica verde se refiere al consumo de los recursos de agua verde (el agua de lluvia en la medida en que no se convierte en escorrentía); por último, la huella hídrica gris se refiere a la contaminación y define como el volumen de agua dulce requerida para asimilar la carga de contaminantes dadas las concentraciones naturales de fondo y las normas de calidad ambiental. [16]

Se expresará todas las huellas hídricas de proceso por unidad de producto, es decir, en volumen de agua por masa. Normalmente, se expresa la huella hídrica de procesos de los sectores agrícolas y forestal como $\text{m}^3/\text{año}$. [16]

2.1.1. Huella hídrica azul

La huella hídrica azul es un indicador del uso consuntivo de la denominada “agua azul”, es decir, el agua dulce superficial o subterráneas. La expresión “uso consuntivo del agua” se refiere a uno de los cuatro casos siguientes [16]:

- El agua se evapora.
- El agua se incorpora al producto.
- El agua no regresa a la misma zona de captación, por ejemplo, regresa a otra zona de captación o al mar.
- El agua no regresa en el mismo periodo, por ejemplo, se extrae en un periodo seco y vuelve en un periodo húmedo.

El primer componente, la evaporación es, en general, el más significativo. Por tanto, a menudo se verá que el uso consuntivo equivale a la evaporación, pero los otros tres componentes deben incluirse cuando sean relevantes. Toda la evaporación relativa a la producción cuenta, incluyendo el agua que se evapora durante el almacenamiento, transporte, procesamiento, la recogida y el vertido. [16]

El uso consuntivo de agua no significa que el agua desaparezca, ya que permanecerá dentro del ciclo y volverá siempre a algún lugar. El agua es un recurso renovable, lo que no significa, sin embargo, que su disponibilidad sea ilimitada. En un determinado periodo, la cantidad de agua recarga las reservas de aguas subterráneas y las que fluye por un río están siempre limitadas a una cantidad determinada. El agua de los ríos y acuíferos puede ser usada para el riego o para fines domésticos o industriales, pero en cierto periodo no se puede consumir más de lo disponible. La huella hídrica azul mide la cantidad de agua disponible consumida en un periodo determinado. De este modo, proporciona una medida de la cantidad de agua azul disponible consumida por los humanos. El resto, los flujos de agua subterránea y de agua superficial que no hayan sido consumidos para la actividad humana se dejan para mantener los ecosistemas que dependen de ellos. [16]

La huella hídrica azul en una etapa del proceso de calcula de la siguiente manera:

$$HH_{proc,azul} = \text{evaporacion de agua azul} + \text{incorporacion de agua azul} \\ + \text{flujo de retorno perdido} \left[\frac{\text{volumen}}{\text{tiempo}} \right]$$

El ultimo componente se refiere a la parte del flujo de retorno que no está disponible para su uso en la misma zona de captación de la que fue extraída, ya sea porque regresa a otra zona de captación o porque regresa en un periodo de tiempo distinto. [16]

La unidad de huella hídrica azul del proceso es el volumen de agua por unidad de tiempo, ya sea por día, mes o año, Cuando se divide entre la cantidad de producto que resulta del proceso, la huella hídrica del proceso puede ser expresada también en términos de volumen por unidad de producto. [16]

Sin embargo, guiarnos por la ecuación anterior no se puede lograr siempre, en los procesos industriales, cada componente de la huella hídrica azul del proceso puede medirse directa o indirectamente. Generalmente se conoce cuanta agua se añade para entrar o forma parte del producto. Normalmente no se mide directamente cuanta agua se evapora durante el almacenamiento, el transporte, el procesamiento y el vertido, pero se puede deducir de la diferencia entre la extracción y los volúmenes de vertido final.

Es decir:

$$WF_{blue} = \text{Agua captada} \\ - \text{Agua devuelta (ajustada por calidad si corresponde)} \left[\frac{m^3}{año} \right].$$

Lo ideal sería contar con bases de datos que contuvieran información sobre el uso consuntivo del agua para varios tipos de procesos de fabricación. Sin embargo, la realidad es que dichas bases de datos apenas existen y normalmente recogen información sobre la extracción del agua, no sobre su uso consuntivo. Además, estas bases de datos generalmente no recogen los detalles necesarios y aportan información sobre el uso de agua para el sector industrial, más que para el proceso de producción.

2.1.2. Huella hídrica verde

La huella hídrica verde es un indicador del uso que hacen los seres humanos de la llamada agua verde, que se refiere a las precipitaciones terrestres que no se transforman en escorrentía ni en aguas subterráneas, sino que se almacenan en el suelo o se quedan de forma temporal en la superficie del suelo o de la vegetación. Con el tiempo, esta parte de la precipitación se evapora o transpira a través de las plantas. El agua verde puede ser productiva para el crecimiento de los cultivos, sin embargo, no toda el agua verde puede ser asimilada por ellos, puesto que siempre habrá evaporación del suelo y porque no todos los periodos del año o zonas son adecuados para el crecimiento del cultivo. [16]

La huella hídrica verde es el volumen de agua de lluvia consumida durante el proceso de producción. Esto es especialmente importante para productos agrícolas y forestales a base de cultivos o en este caso madera, donde nos referimos a la evapotranspiración total del agua de lluvia más el agua incorporada a los cultivos o madera recolectada. La huella hídrica verde del proceso equivale a [16]:

$$HH_{proc,verde} = \text{evaporacion de agua verde} \\ + \text{incorporacion de agua verde} \left[\frac{\text{volumen}}{\text{tiempo}} \right]$$

La diferencia entre la huella hídrica azul y la verde es importante porque los impactos hidrológicos, ambientales y sociales, además de los costes de oportunidad económicos en cuanto al uso del agua superficial y subterránea para la producción, son muy diferentes a los impactos y costos del uso del agua de lluvia. [16]

Se puede medir o estimar el consumo de agua verde para la agricultura con una serie formula empíricas o con un modelo de cultivo apropiado para estimar la evapotranspiración basada en datos de entrada sobre las características del clima, del suelo y de los cultivos. [16]

Para producciones forestales de calcular la evapotranspiración durante todo el año. además, con el fin de tener en cuenta las diferencias en la evapotranspiración durante el ciclo de vida completo de un cultivo permanente o árbol, se debe considerar el promedio anual de evapotranspiración durante el ciclo de vida completo de la cosecha o árbol. [16]

Sin embargo, cuando no hay datos de evapotranspiración disponible hay una formula practica y simplificada.

Se basa en:

$$WF_{green} = P \times A \times f \left[\frac{m_3}{año} \right]$$

Donde:

- P = es precipitación efectiva
- A = el área involucrada
- f = la fracción aprovechada (en caso de actividades agrícolas o forestales).

Esta fórmula deriva directamente de la definición oficial de Hoekstra, pero adaptada para casos en los que se usa precipitación efectiva en vez de evapotranspiración medida o modelada.

2.1.3. Huella hídrica gris

La huella hídrica gris de una etapa del proceso es un indicador del grado de contaminación de agua dulce que puede asociarse con la etapa del proceso. Se define como el volumen de agua dulce que necesita para asimilar la carga de contaminantes basado en las concentraciones en condiciones naturales y en las normas o legislación de calidad ambiental del agua existentes. El concepto de huella hídrica gris surgió del reconocimiento de que la magnitud de contaminación del agua puede expresarse en términos de volumen de agua necesaria para diluir los contaminantes de forma que se vuelvan inocuos. [16]

La huella hídrica gris se calcula de la siguiente forma:

$$HH_{proc,gris} = \frac{L}{C_{m\acute{a}x} - C_{nat}} \left[\frac{m^3}{a\tilde{n}o} \right]$$

Donde:

- L = carga contaminante vertida ($mg/L \times$ caudal)
- C_{max} = concentración máxima permitida (normativa)
- C_{nat} = concentración natural del cuerpo receptor.

La concentración natural en una masa de agua receptora es la concentración en dicho medio que tendrá lugar si en su zona de captación no existe intervención por parte del hombre. Para sustancias de origen antrópico que de forma natural no están presentes en el agua, $C_{nat} = 0$. Cuando no se conocen con precisión las concentraciones naturales, pero se estima que sean bajas, para simplificar se puede asumir que $C_{nat} = 0$. Esto, sin embargo, se traduce en una subestimación de la huella hídrica gris porque, de hecho, C_{nat} no es igual a 0.

La huella hídrica gris es un indicador de la capacidad apropiada de asimilación. Esta capacidad de asimilación de una masa de agua receptora depende de la diferencia entre el máximo permitido y la concentración natural de una sustancia. Si se compara la concentración máxima permitida con la concentración real de una sustancia, se observaría la capacidad de asimilación restante, que obviamente está en continuo cambio, con una función del nivel de contaminación real en un momento determinado. [16]

Los cálculos de la huella hídrica gris se realizan con la utilización de las normas de la calidad ambiental para la masa de agua receptora, es decir, las normas con respecto a las concentraciones máximas permitidas. La razón es que el objetivo de la huella hídrica gris es mostrar el volumen necesario de agua del medio para asimilar productos químicos. Las normas de la calidad ambiental forman una categoría específica dentro de las normas de la calidad del agua. Otros tipos de normas son, por ejemplo, las normas de la calidad del agua potable, las normas de la calidad del riego y las normas de emisiones o efluentes, Se debe tener en precaución cuando se utilizan las normas de calidad ambiental del agua. Para una sustancia en particular, la norma de la calidad ambiental puede variar de una masa de agua a otra. Además, la concentración natural puede variar de un lugar a otro, Como consecuencia, una determinada carga contaminante puede tener una hídrica gris en un lugar y otra en un lugar diferente. Esto es razonable, ya que el volumen de agua necesario para asimilar una determinada carga de contaminante varía dependiendo de la diferencia entre el máximo permitido y la concentración natural. [16]

Aunque las normas de la calidad ambiental suelen estar definidas en la legislación nacional o estatal, o definidas como zonas de captación y masa de agua en el marco de la legislación nacional o por acuerdos, estas no existen para todas las sustancias ni para todos los lugares. Lo más importante es, por supuesto, especificar que normas de la calidad de agua y de las concentraciones naturales han sido usadas en la preparación de la contabilidad de la huella hídrica gris. [16]

2.2. Calculo huella hídrica empresa 1

Se presenta la estimación de la huella hídrica (azul, verde y gris) asociada a las operaciones productivas de las empresas 1. El objetivo es cuantificar, comparar y analizar el consumo neto de agua y la presión por contaminación generada, normalizando los resultados por unidad de producto (m³/año). Los cálculos se realizaron siguiendo la metodología del Water Footprint Assessment Manual por Hoekstra.

2.2.1. Calculo huella hídrica azul

Para el cálculo de la huella hídrica azul con la formula ya antes mencionada, se tomaron los resultados reportados por la empresa 1 en sus reportes anuales [12]. Los datos corresponden a los años 2021 y 2022.

Datos:

- Captación de agua año 2021: 203.935.768
- Descarga de agua año 2021: 167.846.252
- Captación de agua año 2022: 195.375.256
- Descarga de agua año 2022: 163.118.207

Formula a utilizar por metodología del del Water Footprint Assessment Manual por Hoekstra.

$$\text{WFblue} = \text{Agua captada} - \text{Agua devuelta (ajustada por calidad si corresponde)} \left[\frac{m^3}{año} \right]$$

$$\text{WFblue 2021} = 203.935.768 - 167.846.252 = 36.089.516 \text{ [m}^3\text{/año]}$$

$$\text{WFblue 2022} = 195.375.256 - 163.118.207 = 32.257.049 \text{ [m}^3\text{/año]}$$

2.2.2. Calculo huella hídrica verde

Para el cálculo de la huella hídrica verde con la formula ya antes mencionada, se tomaron los resultados reportados por la empresa 1 en sus reportes anuales [11] y plataforma como Agrometeorología [17]. Los datos corresponden a los años 2021 y 2022.

Formula a utilizar por metodología del del Water Footprint Assessment Manual por Hoekstra.

$$\text{WF}_{green} = P \times A \times f \left[\frac{m_3}{año} \right]$$

La f o fracción aprovechada corresponde al porcentaje de la precipitación efectiva que realmente es utilizada por el cultivo, donde en las plantaciones forestales como eucalipto, el valor recomendado por la literatura es entre 0.85 y 0.90, siendo el 0.85 el valor más común a utilizar para plantaciones forestales.

La precipitación efectiva se pudo lograr calcular, con la página web Agrometeorología [17] calculando la precipitación acumulada de la región del Bio-Bio ver Anexo A y B.

Datos para el año 2021:

- f : 0,85
- P : 7.735 mm
- A : 740.713 ha

Precipitación Efectiva (P)

$$1\text{mm} = 0,001 \text{ m}$$

$$P = 7.735 \text{ mm} * 0,001 = 7,735 \text{ m}$$

Área (A)

$$1 \text{ ha} = 10.000 \text{ m}^2$$

$$A = 740.713 * 10.000 = 7.407.130.000 \text{ m}^2$$

Huella Hídrica Verde Año 2021

$$WF_{\text{Green}} = 7,735 \text{ m} * 7.407.130.000 \text{ m}^2 * 0,85$$

$$WF_{\text{Green}} = 48.700.027.967.500 \text{ m}^3$$

$$WF_{\text{Green}} = 4,87 \times 10^{10} [\text{m}^3/\text{año}]$$

Datos para el año 2022:

- f : 0,85
- P : 14.610,5 mm
- A : 740.713 ha

Precipitación Efectiva (P)

$$1\text{mm} = 0,001 \text{ m}$$

$$P = 14.610,5 \text{ mm} * 0,001 = 14,6105 \text{ m}$$

Área (A)

$$1 \text{ ha} = 10.000 \text{ m}^2$$

$$A = 740.713 * 10.000 = 7.407.130.000 \text{ m}^2$$

Huella Hídrica Verde Año 2022

$$WF_{Green} = 14,6105 \text{ m} * 7.407.130.000 \text{ m}^2 * 0,85$$

$$WF_{Green} = 91.988.591.935,25 \text{ m}^3$$

$$WF_{Green} = 9,20 \times 10^{10} [\text{m}^3/\text{año}]$$

2.2.3. Cálculo huella hídrica gris

Para el cálculo de la huella hídrica gris con la fórmula ya antes mencionada, se tomaron los resultados reportados por la empresa 1 en SNIFA [7] del año 2021 y 2022, los datos no reportados en SNIFA, se tomaron en cuenta de la RCA [5] tomando en consideración los parámetros, AOX, Cadmio, Plomo y Fosforo, ver Anexo C, D y E.

Fórmula a utilizar por metodología del del Water Footprint Assessment Manual por Hoekstra.

$$HH_{proc,gris} = \frac{L}{C_{m\acute{a}x} - C_{nat}} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$$

De acuerdo con el Decreto Supremo N°90/2000, los límites máximos permisibles para descargas de residuos líquidos dependen del tipo de cuerpo receptor. En el caso de descargas correspondiente a la empresa 1 siendo el cuerpo receptor el río Biobío corresponden a aguas continentales superficiales, siendo aplicable la Tabla N°1 de este Decreto [2]. Ver Anexo F.

En el caso de la concentración natural del río Biobío (C_{nat}) se estimó utilizando los datos de calidad de agua correspondientes al área de vigilancia **BI-20**, ver Anexo G y H, definida como el tramo comprendido entre aguas arriba del río Llaquén (Ralco) y Rucalhue, por tratarse de un sector ubicado aguas arriba del punto de descarga de la Empresa 1 y no influenciado por dicha actividad [3]. Los datos fueron obtenidos desde campañas oficiales de monitoreo de calidad de aguas superficiales disponibles en la plataforma SNIFA de la Superintendencia del Medio Ambiente [7]. Para AOX, Plomo y Cadmio no se dispone de datos en calidad superficial, por lo que se adopta un valor de 0 mg/L como referencia de fondo ambiental.

2.2.3.1. Empresa 1 año 2021

Datos reportados año 2021:

- AOX: 3,6 mg/L → 0,0036 kg/m³
- Fosforo: 1,40 mg/L → 0,0014 kg/m³
- Cadmio: 0,010 mg/L → 0,00001 kg/m³
- Plomo: 0,012 mg/L → 0,000012 kg/m³

Límites máximos permitidos por el DS90/2000 Tabla N°1:

- AOX: Por RCA 4,5 mg/L $\rightarrow$ 0,0045 kg/m³
- Fosforo: 10 mg/L $\rightarrow$ 0,01 kg/m³
- Cadmio: 0,01 mg/L $\rightarrow$ 0,00001 kg/m³
- Plomo: 0,05 mg/L $\rightarrow$ 0,00005 kg/m³

Concentración Natural del Río Biobío:

- AOX: 0 mg/L $\rightarrow$ 0 kg/m³
- Fosforo: 0,02 mg/L $\rightarrow$ 0,00002 kg/m³
- Cadmio: 0 mg/L $\rightarrow$ 0 kg/m³
- Fosforo: 0 mg/L $\rightarrow$ 0 kg/m³

Transformación Carga Contaminante a kg/año 2021:

Las concentraciones expresadas en mg/L fueron convertidas a carga másica (kg) multiplicando por el volumen de descarga anual (m³) y por el factor de conversión 0,001.

Para la transformación de tomo el promedio del caudal año 2021, ver Anexo I.

$$Q = 128117,02 \text{ (m}^3\text{/año)}$$

$$L = C \text{ (mg/L)} * Q \text{ (m}^3\text{/año)} * 0,001$$

$$L_{\text{AOX}} = 3,6 * 128.117,02 * 0,001 = 461,23 \text{ kg/año}$$

$$L_{\text{Fosforo}} = 1,40 * 128.117,02 * 0,001 = 179,36 \text{ kg/año}$$

$$L_{\text{Cadmio}} = 0,010 * 128.117,02 * 0,001 = 1,28 \text{ kg/año}$$

$$L_{\text{Plomo}} = 0,012 * 128.117,02 * 0,001 = 1,54 \text{ kg/año}$$

AOX año 2021:

$$HH_{\text{proc,gris}} = \frac{L}{C_{\text{máx}} - C_{\text{nat}}} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$$

$$HH_{\text{proc,gris}} = 461,23 \text{ (kg/año)} / (0,0045 \text{ kg/m}^3 - 0 \text{ kg/m}^3)$$

$$HH_{\text{proc,gris}} = 102.495,56 \text{ [m}^3\text{/año]}$$

Fosforo año 2021:

$$HH_{\text{proc,gris}} = 179,36 \text{ (kg/año)} / (0,01 \text{ kg/m}^3 - 0,00002 \text{ kg/m}^3)$$

$$HH_{\text{proc,gris}} = 17.971,94 \text{ [m}^3\text{/año]}$$

Cadmio año 2021:

$$HH_{\text{proc,gris}} = 1,28 \text{ (kg/año)} / (0,00001 \text{ kg/m}^3 - 0 \text{ kg/m}^3)$$

$$HH_{\text{proc,gris}} = 128.000 \text{ [m}^3\text{/año]}$$

Plomo año 2021:

$$HH \text{ proc.gris} = 1,54 \text{ (kg/año)} / (0,00005 \text{ kg/m}^3 - 0 \text{ kg/m}^3)$$

$$HH \text{ proc.gris} = 30.800 \text{ [m}^3\text{/año]}$$

2.2.3.2. Empresa 1 año 2022

Datos reportados año 2022:

- AOX: 3,6 mg/L $\rightarrow$ 0,0036 kg/m³
- Fosforo: 1,01 mg/L $\rightarrow$ 0,00101 kg/m³
- Cadmio: 0,010 mg/L $\rightarrow$ 0,00001 kg/m³
- Plomo: 0,012 mg/L $\rightarrow$ 0,000012 kg/m³

Límites máximos permitidos por el DS90/2000 Tabla N°1:

- AOX: Por RCA 4,5 mg/L $\rightarrow$ 0,0045 kg/m³
- Fosforo: 10 mg/L $\rightarrow$ 0,01 kg/m³
- Cadmio: 0,01 mg/L $\rightarrow$ 0,00001 kg/m³
- Plomo: 0,05 mg/L $\rightarrow$ 0,00005 kg/m³

Concentración Natural del Río Biobío:

- AOX: 0 mg/L $\rightarrow$ 0 kg/m³
- Fosforo: 0,02 mg/L $\rightarrow$ 0,00002 kg/m³
- Cadmio: 0 mg/L $\rightarrow$ 0 kg/m³
- Fosforo: 0 mg/L $\rightarrow$ 0 kg/m³

Transformación Carga Contaminante a kg/año 2022:

Las concentraciones expresadas en mg/L fueron convertidas a carga másica (kg) multiplicando por el volumen de descarga anual (m³) y por el factor de conversión 0,001.

Para la transformación de tomo el promedio del caudal año 2022, ver Anexo J.

$$Q = 126430,15 \text{ (m}^3\text{/año)}$$

$$L = C \text{ (mg/L)} * Q \text{ (m}^3\text{/año)} * 0,001$$

$$L_{AOX} = 3,6 * 126430,15 * 0,001 = 455,15 \text{ [kg/año]}$$

$$L_{Fosforo} = 1,01 * 126430,15 * 0,001 = 127,69 \text{ [kg/año]}$$

$$L_{Cadmio} = 0,010 * 126430,15 * 0,001 = 1,26 \text{ [kg/año]}$$

$$L_{Plomo} = 0,012 * 126430,15 * 0,001 = 1,51 \text{ [kg/año]}$$

AOX año 2022:

$$HH_{proc,gris} = \frac{L}{C_{m\acute{a}x} - C_{nat}} \left[\frac{m^3}{a\tilde{n}o} \right]$$

$$HH_{proc,gris} = 455,15 \text{ (kg/año)} / (0,0045 \text{ kg/m}^3 - 0 \text{ kg/m}^3)$$

$$HH_{proc,gris} = 101.144,45 \text{ [m}^3\text{/año]}$$

Fosforo año 2022:

$$HH_{proc,gris} = 127,69 \text{ (kg/año)} / (0,01 \text{ kg/m}^3 - 0,00002 \text{ kg/m}^3)$$

$$HH_{proc,gris} = 12.794,59 \text{ [m}^3\text{/año]}$$

Cadmio año 2022:

$$HH_{proc,gris} = 1,26 \text{ (kg/año)} / (0,00001 \text{ kg/m}^3 - 0 \text{ kg/m}^3)$$

$$HH_{proc,gris} = 126.000 \text{ [m}^3\text{/año]}$$

Plomo año 2022:

$$HH_{proc,gris} = 1,51 \text{ (kg/año)} / (0,00005 \text{ kg/m}^3 - 0 \text{ kg/m}^3)$$

$$HH_{proc,gris} = 30.200 \text{ [m}^3\text{/año]}$$

2.2.4. Calculo huella hídrica total

Huella hídrica total año 2021:

Para estimar la huella hídrica total se suman las tres huellas, y para seleccionar la huella gris correspondiente, es con el contaminante más crítico, es decir para este año es Cadmio.

$$HH_{total} = WF_{azul} + WF_{verde} + WF_{gris}.$$

$$HH_{Total} = 36.089.516 \text{ [m}^3\text{/año]} + 4,87 \times 10^{10} \text{ [m}^3\text{/año]} + 128.000 \text{ [m}^3\text{/año]}$$

$$HH_{Total} = 4,87 \times 10^{10} \text{ [m}^3\text{/año]}$$

Huella hídrica total año 2022:

Para estimar la huella hídrica total se suman las tres huellas, y para seleccionar la huella gris correspondiente, es con el contaminante más crítico, es decir para este año es Cadmio.

$$HH\_total = WF_{azul} + WF_{verde} + WF_{gris}.$$

$$HH_{Total} = 32.257.049 \text{ [m}^3\text{/año]} + 9,20 \times 10^{10} \text{ [m}^3\text{/año]} + 126.000 \text{ [m}^3\text{/año]}$$

$$HH_{Total} = 9,20 \times 10^{10} \text{ [m}^3\text{/año]}$$

Tabla 1. Huella Hídrica Total Empresa 1 Año 2021 y 2022

Año	Huella Azul	Huella Verde	Huella Gris AOX	Huella Gris Fosforo	Huella Gris Cadmio	Huella Gris Plomo	Huella Total
2021	36.089.516	4,87 x 10 ¹⁰	102.495,56	17.971,94	128.000	30.800	4,87 x 10 ¹⁰
2022	32.257.049	9,20 x 10 ¹⁰	101.144,45	12.794,59	126.000	30.200	9,20 x 10 ¹⁰

2.3. Calculo huella hídrica empresa 2

Se presenta la estimación de la huella hídrica (azul, verde y gris) asociada a las operaciones productivas de las empresas 2. El objetivo es cuantificar, comparar y analizar el consumo neto de agua y la presión por contaminación generada, normalizando los resultados por unidad de producto (m³/año). Los cálculos se realizaron siguiendo la metodología del Water Footprint Assessment Manual por Hoekstra.

2.3.1. Calculo huella hídrica azul

Para el cálculo de la huella hídrica azul con la formula ya antes mencionada, se tomaron los resultados reportados por la empresa 2 en sus reportes anuales [1]. Los datos corresponden al año 2021 y 2022.

Datos:

- Captación de agua año 2021: 160.055.490
- Descarga de agua año 2021: 139.696.106
- Captación de agua año 2022: 135.579.758
- Descarga de agua año 2022: 121.332.188

Formula a utilizar por metodología del del Water Footprint Assessment Manual por Hoekstra.

$$WF_{blue} = \text{Agua captada} - \text{Agua devuelta (ajustada por calidad si corresponde)} \left[\frac{m^3}{año} \right].$$

$$WF_{blue} 2021 = 160.055.490 - 139.696.106 = 20.359.384 \text{ [m}^3\text{/año]}$$

$$WF_{blue} 2022 = 135.579.758 - 121.332.188 = 14.247.570 \text{ [m}^3\text{/año]}$$

2.3.2. *Calculo huella hídrica verde*

Para el cálculo de la huella hídrica verde con la formula ya antes mencionada, se tomaron los resultados reportados por la empresa 2 en sus reportes anuales [1] y plataforma como Agrometeorología [17] ver Anexo A y B. Los datos corresponden a los años 2021 y 2022.

Formula a utilizar por metodología del del Water Footprint Assessment Manual por Hoekstra.

$$WF_{green} = P \times A \times f \left[\frac{m_3}{año} \right]$$

Datos para el año 2021:

- f : 0,85
- P : 7.735 [mm]
- A : 603.921 [ha]

Precipitación Efectiva (P)

$$1[\text{mm}] = 0,001 \text{ [m]}$$

$$P = 7.735 \text{ [mm]} * 0,001 = 7,735 \text{ [m]}$$

Área (A)

$$1 \text{ [ha]} = 10.000 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$A = 603.921 * 10.000 = 6.039.210.000 \text{ [m}^2\text{]}$$

Huella Hídrica Verde Año 2021

$$WF_{Green} = 7,735 \text{ [m]} * 6.039.210.000 \text{ [m}^2\text{]} * 0,85$$

$$WF_{Green} = 39.706.295.947,5 \text{ [m}^3\text{]}$$

$$WF_{Green} = 3.97 \times 10^{10} \text{ [m}^3\text{/año]}$$

Datos para el año 2022:

- f : 0,85
- P : 14.637,7 [mm]
- A : 603.921 [ha]

Precipitación Efectiva (P)

$$1[\text{mm}] = 0,001 [\text{m}]$$

$$P = 14.637,7 [\text{mm}] * 0,001 = 14,6377 [\text{m}]$$

Área (A)

$$1 [\text{ha}] = 10.000 [\text{m}^2]$$

$$A = 603.921 * 10.000 = 6.039.210.000 [\text{m}^2]$$

Huella Hídrica Verde Año 2022

$$WF_{\text{Green}} = 14,6377 [\text{m}] * 6.039.210.000 [\text{m}^2] * 0,85$$

$$WF_{\text{Green}} = 75.140.122.584,45 [\text{m}^3]$$

$$WF_{\text{Green}} = 7,5 \times 10^{10} [\text{m}^3/\text{año}]$$

2.3.3. Cálculo huella hídrica gris

Para el cálculo de la huella hídrica gris con la formula ya antes mencionada, se tomaron los resultados reportados por la empresa 2 en SNIFA del año 2021 y 2022 [7], tomando en consideración los parámetros, AOX, Cadmio, Plomo y Fosforo, ver Anexo K, L Y M.

Formula a utilizar por metodología del del Water Footprint Assessment Manual por Hoekstra.

$$HH_{\text{proc,gris}} = \frac{L}{C_{\text{máx}} - C_{\text{nat}}} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$$

De acuerdo con el Decreto Supremo N°90/2000 [2], los límites máximos permisibles para descargas de residuos líquidos dependen del tipo de cuerpo receptor. En el caso de descargas a la desembocadura del río Itata correspondiente a la empresa 2, estas se clasifican como descargas a aguas marinas y estuarinas, por lo que se aplica la Tabla N°4 del DS 90. Ver Anexo N.

La concentración natural de los parámetros analizados (C_{nat}) fue determinada a partir de información secundaria proveniente del estudio ‘**Red de Monitoreo Ambiental de Ecosistemas Marinos del Golfo de Arauco**’, desarrollado en el marco del Programa de Recuperación Ambiental y Social (PRAS) del Ministerio del Medio Ambiente [4], Ver Anexo P.

Dicho estudio considera campañas de monitoreo ambiental en el Golfo de Arauco, incluyendo estaciones representativas de condiciones de fondo ambiental, previas o alejadas de influencias directas de descargas industriales. Los valores reportados para los años 2021 y 2022 fueron utilizados como referencia de concentración natural para los parámetros de calidad de agua y metales, dada la ausencia de una norma primaria específica que defina concentraciones naturales para ecosistemas marinos en Chile.

2.2.3.1. Empresa 2 Año 2021

Datos reportados año 2021:

- AOX: 2,87 mg/L $\rightarrow$ 0,0029 kg/m³
- Fosforo: 1,03 mg/L $\rightarrow$ 0,0010 kg/m³
- Cadmio: 0,010 mg/L $\rightarrow$ 0,00001 kg/m³
- Plomo: 0,029 mg/L $\rightarrow$ 0,000029 kg/m³

Límites máximos permitidos por el DS90/2000 Tabla N°4:

- AOX: Por RCA 10,7 mg/L $\rightarrow$ 0,0107 kg/m³
- Fosforo: 5 mg/L $\rightarrow$ 0,005 kg/m³
- Cadmio: 0,02 mg/L $\rightarrow$ 0,00002 kg/m³
- Plomo: 0,2 mg/L $\rightarrow$ 0,0002 kg/m³

Concentración Natural Golfo Arauco:

- AOX: 0.0264 mg/L $\rightarrow$ 0,000026 kg/m³
- Fosforo: 0,0890 mg/L $\rightarrow$ 0,000089 kg/m³
- Cadmio: 1.5×10^{-5} mg/L $\rightarrow$ 1.5×10^{-8} kg/m³
- Fosforo: 1.5×10^{-5} mg/L $\rightarrow$ 1.5×10^{-8} kg/m³

Transformación Carga Contaminante a kg/año 2021:

Las concentraciones expresadas en mg/L fueron convertidas a carga másica (kg) multiplicando por el volumen de descarga anual (m³) y por el factor de conversión 0,001.

Para la transformación se tomó el promedio del caudal año 2022, ver Anexo Ñ.

$$Q = 140.032,88 \text{ (m}^3\text{/año)}$$

$$L = C \text{ (mg/L)} * Q \text{ (m}^3\text{/año)} * 0,001$$

$$L_{\text{AOX}} = 2,87 * 140.032,88 * 0,001 = 401,89 \text{ kg/año}$$

$$L_{\text{Fosforo}} = 1,03 * 140.032,88 * 0,001 = 144,23 \text{ kg/año}$$

$$L_{\text{Cadmio}} = 0,010 * 140.032,88 * 0,001 = 1,40 \text{ kg/año}$$

$$L_{\text{Plomo}} = 0,029 * 140.032,88 * 0,001 = 4,06 \text{ kg/año}$$

AOX año 2021:

$$HH_{proc,gris} = \frac{L}{C_{m\acute{a}x} - C_{nat}} \left[\frac{m^3}{a\tilde{n}o} \right]$$

$$HH_{proc,gris} = 401,89 \text{ (kg/año)} / (0,0107 \text{ kg/m}^3 - 0,000026 \text{ kg/m}^3)$$

$$HH_{proc,gris} = 37.595,09 \text{ [m}^3\text{/año]}$$

Fosforo año 2021:

$$HH_{proc,gris} = 144,23 \text{ (kg/año)} / (0,005 \text{ kg/m}^3 - 0,000089 \text{ kg/m}^3)$$

$$HH_{proc,gris} = 29.368,76 \text{ [m}^3\text{/año]}$$

Cadmio año 2021:

$$HH_{proc,gris} = 1,40 \text{ (kg/año)} / (0,00002 \text{ kg/m}^3 - 1.5 \times 10^{-8} \text{ kg/m}^3)$$

$$HH_{proc,gris} = 70.052,54 \text{ [m}^3\text{/año]}$$

Plomo año 2021:

$$HH_{proc,gris} = 4,06 \text{ (kg/año)} / (0,0002 \text{ kg/m}^3 - 1.5 \times 10^{-8} \text{ kg/m}^3)$$

$$HH_{proc,gris} = 20.301,52 \text{ [m}^3\text{/año]}$$

2.2.3.2. Empresa 2 año 2022

Datos reportados año 2022:

- AOX: 2,87 mg/L $\rightarrow$ 0,0029 kg/m³
- Fosforo: 1,03 mg/L $\rightarrow$ 0,0010 kg/m³
- Cadmio: 0,010 mg/L $\rightarrow$ 0,00001 kg/m³
- Plomo: 0,013 mg/L $\rightarrow$ 0,000013 kg/m³

Límites máximos permitidos por el DS90/2000 Tabla N°4:

- AOX: Por RCA 10,7 mg/L $\rightarrow$ 0,0107 kg/m³
- Fosforo: 5 mg/L $\rightarrow$ 0,005 kg/m³
- Cadmio: 0,02 mg/L $\rightarrow$ 0,00002 kg/m³
- Plomo: 0,2 mg/L $\rightarrow$ 0,0002 kg/m³

Concentración Natural Golfo Arauco:

- AOX: 0.0264 mg/L $\rightarrow$ 0,000026 kg/m³
- Fosforo: 0,0890 mg/L $\rightarrow$ 0,000089 kg/m³
- Cadmio: 1.5×10^{-5} mg/L $\rightarrow$ 1.5×10^{-8} kg/m³
- Fosforo: 1.5×10^{-5} mg/L $\rightarrow$ 1.5×10^{-8} kg/m³

Transformación Carga Contaminante a kg/año 2022:

Las concentraciones expresadas en mg/L fueron convertidas a carga másica (kg) multiplicando por el volumen de descarga anual (m³) y por el factor de conversión 0,001.

Para la transformación de tomo el promedio del caudal año 2022, ver Anexo O.

$$Q = 86.974,10 \text{ (m}^3\text{/año)}$$

$$L = C \text{ (mg/L)} * Q \text{ (m}^3\text{/año)} * 0,001$$

$$L_{\text{AOX}} = 2,87 * 86.974,10 * 0,001 = 249,62 \text{ [kg/año]}$$

$$L_{\text{Fosforo}} = 1,03 * 86.974,10 * 0,001 = 89,58 \text{ [kg/año]}$$

$$L_{\text{Cadmio}} = 0,010 * 86.974,10 * 0,001 = 0,87 \text{ [kg/año]}$$

$$L_{\text{Plomo}} = 0,013 * 86.974,10 * 0,001 = 1,13 \text{ [kg/año]}$$

AOX año 2022:

$$HH_{\text{proc,gris}} = \frac{L}{C_{\text{máx}} - C_{\text{nat}}} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$$

$$HH_{\text{proc,gris}} = 249,62 \text{ (kg/año)} / (0,0107 \text{ kg/m}^3 - 0,000026 \text{ kg/m}^3)$$

$$HH_{\text{proc,gris}} = 23.385,80 \text{ [m}^3\text{/año]}$$

Fosforo año 2022:

$$HH_{\text{proc,gris}} = 89,58 \text{ (kg/año)} / (0,005 \text{ kg/m}^3 - 0,000089 \text{ kg/m}^3)$$

$$HH_{\text{proc,gris}} = 18.240,68 \text{ [m}^3\text{/año]}$$

Cadmio año 2022:

$$HH_{\text{proc,gris}} = 0,87 \text{ (kg/año)} / (0,00002 \text{ kg/m}^3 - 1.5 \times 10^{-8} \text{ kg/m}^3)$$

$$HH_{\text{proc,gris}} = 43.532,65 \text{ [m}^3\text{/año]}$$

Plomo año 2022:

$$HH_{\text{proc,gris}} = 1,13 \text{ (kg/año)} / (0,0002 \text{ kg/m}^3 - 1.5 \times 10^{-8} \text{ kg/m}^3)$$

$$HH_{\text{proc,gris}} = 5.650,42 \text{ [m}^3\text{/año]}$$

2.3.4. *Calculo huella hídrica total*

Huella hídrica total año 2021:

Para estimar la huella hídrica total se suman las tres huellas, y para seleccionar la huella gris correspondiente, es con el contaminante más crítico, es decir para este año es Cadmio.

HH_{total} = WF_{azul} + WF_{verde} + WF_{gris}.

HH_{Total} = 20.359.384 [m³/año] + 3.97 x 10¹⁰ [m³/año] + 70.052,54 [m³/año]

HH_{Total} = 3,97 x 10¹⁰ [m³/año]

Huella hídrica total año 2022:

Para estimar la huella hídrica total se suman las tres huellas, y para seleccionar la huella gris correspondiente, es con el contaminante más crítico, es decir para este año es Cadmio.

HH_{total} = WF_{azul} + WF_{verde} + WF_{gris}.

HH_{Total} = 14.247.570 [m³/año] + 7,5 x 10¹⁰ [m³/año] + 43.532,65 [m³/año]

HH_{Total} = 7,50 x 10¹⁰ [m³/año]

Tabla 2. Tabla Huella Hidrica Total Empresa 2 Año 2021 y 2022

Año	Huella Azul	Huella Verde	Huella Gris AOX	Huella Gris Fosforo	Huella Gris Cadmio	Huella Gris Plomo	Huella Total
2021	20.359.384	3.97 x 10 ¹⁰	37.595,09	29.368,76	70.052,54	20.301,52	3,97 x 10 ¹⁰
2022	14.247.570	7,5 x 10 ¹⁰	23.385,80	18.240,68	43.532,65	5.650,42	7,50 x 10 ¹⁰

2.4. Tabla comparativa

Tabla 3. Tabla Comparativa Empresa 1 vs Empresa 2

	Empresa 1		Empresa 2	
Año	HH	Resultados	HH	Resultados
2021	Azul	36.089.516	Azul	20.359.384
	Verde	4,87 x 10 ¹⁰	Verde	3.97 x 10 ¹⁰
	Gris	128.000	Gris	70.052,54
	Total	4,87 x 10 ¹⁰	Total	3,97 x 10 ¹⁰
2022	Azul	32.257.049	Azul	14.247.570
	Verde	9,20 x 10 ¹⁰	Verde	7,5 x 10 ¹⁰
	Gris	126.000	Gris	43.532,65
	Total	9,20 x 10 ¹⁰	Total	7,50 x 10 ¹⁰



Capítulo 3: Normativas Ambientales Vigentes

3.1. ¿Qué es una normativa ambiental vigente?

Una normativa ambiental corresponde al marco legal y técnico que fija estándares, límites máximos permisibles, procedimientos y responsabilidades, destinados a prevenir, controlar, mitigar o reparar los impactos ambientales derivados de actividades productivas o humanas.

En Chile, la normativa ambiental se estructura principalmente a partir de la Ley N° 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente, la cual define los principios de la gestión ambiental y crea los instrumentos destinados a la protección de los ecosistemas, entre ellos las normas de calidad ambiental, las normas de emisión, el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) y los planes de gestión ambiental [2].

En el ámbito de los recursos hídricos, una de las principales normativas aplicables es el Decreto Supremo N° 90/2000 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia [2].

Adicionalmente, proyectos sometidos al SEIA deben contar con una Resolución de Calificación Ambiental (RCA), la cual establece condiciones, exigencias y medidas ambientales específicas, incluyendo programas de monitoreo y seguimiento ambiental. Los resultados de dichos monitoreos son reportados a través del Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental (SNIFA), permitiendo la supervisión por parte de la autoridad competente.

3.2 DS 90/2000

El Decreto Supremo N°90/2000 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia establece la norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a cuerpos de aguas superficiales, tales como ríos, esteros, lagos y mar. Esta normativa fija límites máximos permisibles de concentración para diversos parámetros fisicoquímicos, con el objetivo de proteger la calidad del medio receptor y prevenir efectos adversos sobre los ecosistemas acuáticos [2].

En el contexto del presente estudio, el Decreto Supremo N°90 constituye el principal referente normativo para la evaluación de la huella hídrica gris, ya que los límites de emisión establecidos por la normativa son utilizados como concentraciones máximas admisibles (C_{Max}) para los contaminantes analizados. De este modo, la huella hídrica gris se interpreta como el volumen de agua necesario para diluir la carga contaminante descargada, de manera que las concentraciones resultantes en el cuerpo receptor cumplan con los estándares definidos por la normativa ambiental vigente [2].

La integración del enfoque de huella hídrica con la normativa ambiental permite complementar la evaluación de cumplimiento legal con una medida cuantitativa del impacto potencial sobre los recursos hídricos, facilitando la comparación entre distintos procesos productivos y periodos de operación [2].

Para el cálculo de la huella hídrica gris se consideraron los límites máximos permisibles establecidos en el Decreto Supremo N°90 como concentración crítica (C_{Max}), mientras que la concentración natural (C_{Nat}) fue obtenida a partir de información ambiental de referencia correspondiente al cuerpo receptor [2].

3.3. AOX

Los AOX (Adsorbable Organic Halogens) corresponden a un grupo de compuestos orgánicos halogenados que pueden adsorberse desde el agua sobre carbón activado. Estos compuestos son considerados contaminantes emergentes, ya que se originan a partir de diversos productos y procesos industriales y domésticos que contienen halógenos activos. En el ámbito ambiental, se detectan comúnmente concentraciones significativas de AOX en aguas residuales industriales, particularmente en efluentes provenientes de sectores como la industria papelera, textil, curtiduría, química y farmacéutica. El parámetro AOX se define operacionalmente como la suma de todos los compuestos orgánicos halogenados adsorbibles en carbón activado, abarcando una amplia gama de sustancias que incluye desde compuestos orgánicos volátiles simples, como el cloroformo, hasta compuestos orgánicos complejos y persistentes, como las dioxinas y furanos halogenados. Si bien el AOX no constituye un índice directo de toxicidad, numerosos compuestos que conforman este parámetro presentan efectos adversos relevantes para la salud humana y los ecosistemas, incluyendo propiedades carcinogénicas confirmadas o potenciales. [15][18]

3.4. Cadmio

El cadmio es un metal pesado tóxico que no tiene función biológica esencial y puede representar un riesgo importante para la salud humana cuando se encuentra en el agua, alimentos o aire.

La exposición al cadmio puede ocurrir por ingesta de alimentos o agua contaminados, inhalación o contacto ocupacional, y además este metal se acumula en tejidos como riñones y hígado, generando efectos adversos crónicos. Por ejemplo [20]:

- El cadmio puede alterar la función renal y causar disfunción renal progresiva, con acumulación permanente en el cuerpo por décadas, dado su largo tiempo de permanencia biológica.
- Está asociado con diversos tipos de cáncer (por ejemplo, de riñón, pulmón y próstata) debido a su capacidad de inducir estrés oxidativo y daño celular a través de la formación de radicales libres y alteración de mecanismos celulares.
- Además, el cadmio puede afectar la absorción de nutrientes esenciales, interfiriendo con la homeostasis de calcio, hierro y otros elementos, lo que puede contribuir a debilidad ósea y osteoporosis.

En síntesis, el cadmio representa un riesgo grave de toxicidad renal, carcinogénesis y daño sistémico cuando se encuentra en el ambiente y en fuentes de exposición humana.

El cadmio es un metal pesado altamente tóxico y persistente en el ambiente, que no cumple ninguna función biológica conocida y presenta una elevada capacidad de bioacumulación y biomagnificación en los ecosistemas acuáticos y terrestres. Una vez liberado al medio ambiente, el cadmio puede permanecer por largos períodos en sedimentos, suelos y cuerpos de agua, siendo difícilmente degradable [9].

En ecosistemas acuáticos, el cadmio afecta de manera directa a organismos como fitoplancton, invertebrados bentónicos y peces, alterando procesos fisiológicos esenciales como la respiración, la osmorregulación y la reproducción. La exposición crónica puede provocar reducción del crecimiento, mortalidad larval y alteraciones en las cadenas tróficas, afectando la biodiversidad del sistema. Además, el cadmio puede ser absorbido por plantas acuáticas y terrestres, acumulándose en tejidos vegetales y entrando a la cadena alimentaria [9].

En suelos, el cadmio reduce la actividad microbiana y la fertilidad, afectando procesos biogeoquímicos como la mineralización de nutrientes. Su movilidad aumenta en condiciones de pH ácido, lo que incrementa el riesgo de lixiviación hacia aguas subterráneas y superficiales. [9]

3.5. Fósforo

El fósforo (P) es un elemento químico esencial e irremplazable para la vida, ya que forma parte de moléculas fundamentales como el ADN, ARN, ATP y fosfolípidos de las membranas celulares. En los ecosistemas naturales, el fósforo actúa como un nutriente limitante del crecimiento vegetal y microbiano, regulando la productividad primaria de los sistemas terrestres y acuáticos. Sin embargo, cuando es introducido en exceso en el ambiente por actividades antrópicas, especialmente a través de efluentes domésticos, industriales y escorrentía agrícola, puede generar impactos ambientales severos. [22]

En cuerpos de agua superficiales, el principal efecto negativo del fósforo es la eutrofización, un proceso caracterizado por el enriquecimiento excesivo de nutrientes que provoca un crecimiento acelerado de algas y macrófitas acuáticas. Este fenómeno altera los procesos naturales de sucesión biológica, reduce la biodiversidad y modifica la estructura de las comunidades acuáticas. Concentraciones tan bajas como 0,02 mg/L de fosfato pueden estimular la proliferación algal, mientras que valores superiores a 0,1 mg/L pueden generar floraciones intensas que bloquean la penetración de la luz y aumentan el consumo de oxígeno disuelto en la columna de agua. [22]

La disminución del oxígeno disuelto asociada a la eutrofización favorece la aparición de condiciones hipóxicas o anóxicas, lo que puede provocar mortalidad masiva de peces y otros organismos acuáticos, además de la liberación de fósforo desde los sedimentos, retroalimentando el proceso. Asimismo, algunas floraciones algales producen cianotoxinas, las cuales representan un riesgo significativo para la salud humana y animal, pudiendo afectar el uso del agua para consumo humano, recreación y riego agrícola. [22]

Desde el punto de vista de la salud humana, el fósforo no suele ser tóxico de manera directa en concentraciones ambientales habituales; sin embargo, sus efectos indirectos son relevantes. La eutrofización puede generar compuestos responsables de sabor, olor y toxicidad en el agua potable, incrementando los costos de tratamiento y los riesgos sanitarios. Además, la degradación de la materia orgánica asociada a la proliferación algal favorece la emisión de gases como metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) y dióxido de carbono (CO₂), contribuyendo al cambio climático y a impactos globales sobre la salud ambiental. [22]

En este contexto, el fósforo representa un doble desafío ambiental: por un lado, su carácter de recurso no renovable esencial para la seguridad alimentaria y, por otro, su rol como uno de los principales responsables de la degradación de la calidad de las aguas cuando su gestión es inadecuada. Esta dualidad refuerza la necesidad de estrategias de control, recuperación y uso sostenible del fósforo, especialmente en el manejo de efluentes y cuerpos de agua receptores. [22]

3.6. Plomo

El plomo es otro metal pesado con alta toxicidad y un historial de uso industrial extenso, que ha llevado a su presencia generalizada en el ambiente.

Desde la literatura científica, la toxicidad del plomo se manifiesta en varios sistemas del cuerpo humano [20]:

- El plomo interfiere con procesos bioquímicos clave al reemplazar cationes esenciales como calcio (Ca^{2+}) y hierro (Fe^{2+}), afectando la función de enzimas y la señalización celular.
- La exposición crónica al plomo está asociada con daño al sistema nervioso central y periférico, problemas cognitivos y neurodesarrollo en niños, e impactos en la memoria y aprendizaje.
- También puede causar hipertensión, alteraciones cardiovasculares y disfunción renal, debido a su depósito en tejidos y efectos sobre la función vascular y de filtración renal.
- Además, el plomo puede provocar efectos agudos como anemia hemolítica, encefalopatía y síntomas gastrointestinales en casos de exposición elevada.

El plomo es un metal pesado no biodegradable que se distribuye ampliamente en el ambiente como resultado de actividades industriales, mineras y urbanas. En medios acuáticos, el plomo tiende a adsorberse a partículas en suspensión y sedimentos, donde puede permanecer durante largos períodos, actuando como una fuente secundaria de contaminación cuando las condiciones ambientales cambian (variaciones de pH, oxígeno o caudal) [20].

La presencia de plomo en ecosistemas acuáticos genera efectos tóxicos sobre organismos como algas, crustáceos y peces, interfiriendo en procesos metabólicos, enzimáticos y reproductivos. Se ha demostrado que el plomo puede causar alteraciones en el comportamiento, disminución de la tasa de reproducción y mortalidad, además de afectar el desarrollo embrionario de especies acuáticas [9].

En ambientes terrestres, el plomo se acumula principalmente en la capa superficial del suelo, afectando el microbiota y reduciendo la disponibilidad de nutrientes para las plantas. La absorción por vegetales es generalmente baja, pero suficiente para permitir su transferencia a niveles tróficos superiores, lo que representa un riesgo ecológico persistente [9].

3.7. Tabla comparativa de resultados obtenidos con la normativa ambiental vigente

Tabla 4. Tabla Comparativa Resultados y la Normativa (2021 y 2022)

Parámetros (mg/L)	Limite Max Tabla N°1	RCA	Empresa 1		Limite Max Tabla N°4	RCA	Empresa 2	
			2021	2022			2021	2022
AOX	-	4,50	3,60	3,60	-	10,70	2,87	2,87
Fosforo	10,00	-	1,40	1,01	5,00	-	1,03	1,03
Cadmio	0,01	-	0,01	0,01	0,02	-	0,01	0,01
Plomo	0,05	-	0,01	0,01	0,20	-	0,03	0,01

Tabla 5. Tabla de Cumplimiento Empresa 1

Parámetros (mg/L)	Limite Max Tabla N°1	RCA	Empresa 1			
			2021	Cumple (Si/No)	2022	Cumple (Si/No)
AOX	-	4,50	3,60	Si	3,60	Si
Fosforo	10,00	-	1,40	Si	1,01	Si
Cadmio	0,01	-	0,01	Si	0,01	Si
Plomo	0,05	-	0,01	Si	0,01	Si

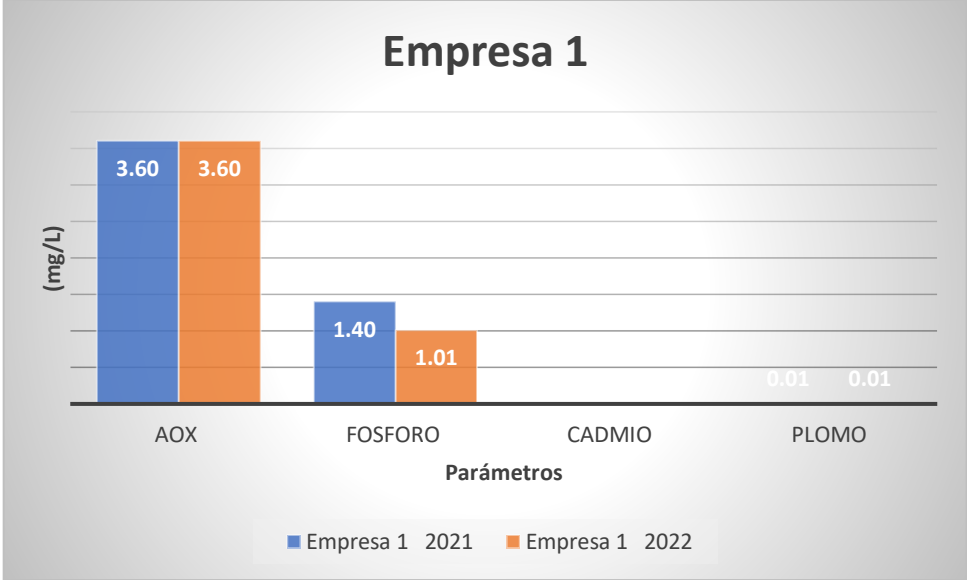


Figura 4. Gráfico de Parámetros Empresa 1

Tabla 6. Tabla Cumplimiento Empresa 2

Parámetros (mg/L)	Limite Max Tabla N°4	RCA	Empresa 2			
			2021	Cumple (Si/No)	2022	Cumple (Si/No)
AOX	-	10,70	2,87	Si	2,87	Si
Fosforo	5,00	-	1,03	Si	1,03	Si
Cadmio	0,02	-	0,01	Si	0,01	Si
Plomo	0,20	-	0,03	Si	0,01	Si

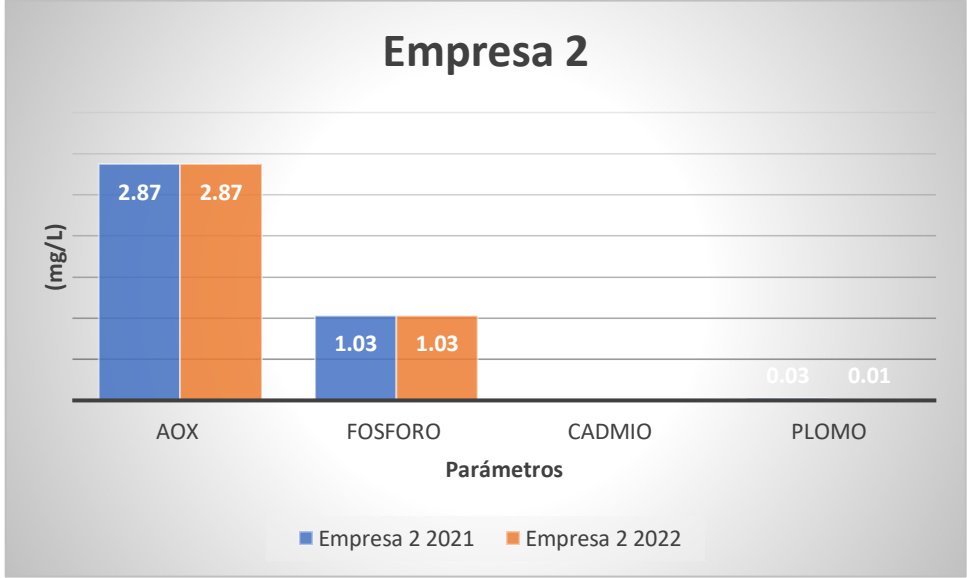


Figura 5. Gráfico de Parámetros Empresa 2

3.8. Análisis datos obtenidos

Del análisis de los resultados obtenidos para los parámetros AOX, fósforo, cadmio y plomo, correspondientes a las Empresas 1 y 2 durante los años 2021 y 2022, y su comparación con los límites máximos permisibles establecidos en el Decreto Supremo N°90, se concluye que ambas empresas cumplen con la normativa ambiental vigente para todos los parámetros evaluados en los dos años analizados. En ningún caso se registran concentraciones que superen los límites máximos establecidos en las tablas correspondientes del DS 90, ni en aquellos valores definidos específicamente en las respectivas Resoluciones de Calificación Ambiental (RCA).

Tomando en consideración cada parámetro:

- **AOX:**
Si bien el parámetro AOX no está regulado explícitamente en el DS 90, ambas empresas presentan valores inferiores a los límites establecidos en sus respectivas RCA (4,50 mg/L para Empresa 1 y 10,70 mg/L para Empresa 2). Además, los valores se mantienen constantes entre 2021 y 2022, lo que sugiere estabilidad operacional y control del proceso productivo.
- **Fósforo:**
Las concentraciones medidas de fósforo en ambas empresas se encuentran muy por debajo de los límites máximos permisibles (10,00 mg/L para Empresa 1 y 5,00 mg/L para Empresa 2). Esto indica una baja carga de nutrientes hacia el cuerpo receptor, reduciendo el riesgo de procesos de eutrofización.
- **Cadmio:**
En ambos casos, las concentraciones de cadmio alcanzan valores iguales o inferiores a 0,01 mg/L, cumpliendo holgadamente con los límites normativos (0,01 mg/L y 0,02 mg/L, respectivamente). Esto evidencia un control efectivo de metales pesados, relevantes por su alta toxicidad y potencial bioacumulativo.
- **Plomo:**
Los valores de plomo medidos se encuentran significativamente por debajo de los límites máximos permitidos en ambas empresas. Se observa incluso una disminución en 2022 para la Empresa 2, lo que podría asociarse a mejoras en el tratamiento de efluentes o a condiciones operacionales más eficientes.

No se observan incrementos significativos en las concentraciones de ninguno de los parámetros analizados entre ambos años. Por el contrario, algunos parámetros presentan tendencias estables o levemente decrecientes, lo que refuerza el cumplimiento ambiental sostenido en el tiempo.

En función de los resultados obtenidos, se concluye que las descargas líquidas de ambas empresas se encuentran dentro de los márgenes aceptables definidos por la normativa ambiental chilena, tanto desde el punto de vista regulatorio como operativo. No obstante, pese al cumplimiento normativo, la presencia de contaminantes como AOX y metales pesados, aun en bajas concentraciones, justifica su consideración en evaluaciones complementarias como la huella hídrica gris, dado su potencial impacto acumulativo sobre los ecosistemas acuáticos.

Conclusión

El desarrollo del presente estudio permitió evaluar de manera integral el uso del recurso hídrico asociado a la producción de celulosa en la Región del Biobío, incorporando tanto el enfoque de huella hídrica como el análisis de cumplimiento de la normativa ambiental vigente. A partir de los resultados obtenidos, es posible extraer una serie de conclusiones relevantes desde el punto de vista técnico, ambiental y normativo.

En primer lugar, la aplicación del concepto de huella hídrica demostró ser una herramienta adecuada para analizar el impacto del proceso productivo más allá del simple cumplimiento legal. Mientras la normativa ambiental, representada principalmente por el Decreto Supremo N°90, se enfoca en regular las concentraciones máximas de contaminantes en las descargas líquidas, la huella hídrica permite cuantificar la presión total ejercida sobre el recurso hídrico, integrando consumo de agua, uso indirecto del recurso y asimilación de contaminantes por parte del medio receptor.

En relación con la huella hídrica azul, los resultados evidencian que el consumo de agua asociado a la producción de celulosa es significativo, pero se encuentra controlado mediante sistemas de recirculación y tratamiento, lo que reduce el volumen de agua efectivamente consumida por tonelada de producto. Esto refleja avances en eficiencia hídrica dentro del sector, alineados con las exigencias ambientales y los compromisos de sostenibilidad declarados por las empresas.

Respecto de la huella hídrica verde, su estimación permitió reconocer la importancia del componente forestal en el balance hídrico del proceso productivo. Aunque la metodología utilizada es simplificada y dependiente de información secundaria, los resultados destacan que la precipitación y el manejo de las plantaciones forestales constituyen un factor relevante en el uso indirecto del recurso hídrico, el cual no es abordado por la normativa tradicional, pero sí por el enfoque de huella hídrica.

En cuanto a la huella hídrica gris, el análisis de los parámetros AOX, fósforo, cadmio y plomo mostró que las concentraciones descargadas por ambas empresas durante los años 2021 y 2022 se mantuvieron por debajo de los límites máximos permisibles establecidos en el Decreto Supremo N°90. Esto indica un adecuado desempeño ambiental en términos de control de la contaminación hídrica y evidencia el cumplimiento de las exigencias regulatorias aplicables a los cuerpos receptores evaluados.

No obstante, es importante destacar que el cumplimiento normativo no implica necesariamente la ausencia de impacto ambiental. Incluso concentraciones bajo los límites legales pueden generar presiones acumulativas sobre los ecosistemas acuáticos, especialmente en zonas con alta concentración industrial o con condiciones naturales sensibles. En este sentido, la huella hídrica gris permite dimensionar la capacidad de asimilación del cuerpo receptor y aporta información adicional para la toma de decisiones en materia de gestión ambiental.

Finalmente, este trabajo concluye que la integración entre normativa ambiental y huella hídrica constituye un enfoque complementario y necesario para avanzar hacia una gestión más sustentable del recurso hídrico en la industria de la celulosa. Mientras la normativa asegura un estándar mínimo de protección ambiental, la huella hídrica permite identificar oportunidades de mejora, optimización de procesos y reducción de impactos a largo plazo. En este contexto, se recomienda continuar profundizando en la disponibilidad de información pública, el monitoreo ambiental y la incorporación de indicadores integrales que fortalezcan la sustentabilidad hídrica del sector productivo en la Región del Biobío.

Referencias

- [1](ARAUCO), C. A. (2022). *Reporte Integrado ARAUCO 2022 [en Línea]*. Arauco.
<https://arauco.com/chile/wp-content/uploads/sites/14/2023/04/REPORTE_INTEGRADO_ARAUCO_2022.pdf>.
- [2](MMA), M. d. (2001). *Establece norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales [en Línea]*. LeyChile, Biblioteca del Congreso Nacional.< <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=182637>>.
- [3](MMA), M. d. (2015). *Decreto N.º 9, de 2 de marzo de 2015: Establece normas secundarias de calidad ambiental para la protección de las aguas continentales superficiales de la cuenca del río Biobío [en Línea]*. LeyChile, Biblioteca del Congreso Nacional. < <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1084403&idParte=> >.
- [4](PRAS), P. d. (2022). *Informe final: Red de monitoreo ambiental de ecosistemas marinos del Golfo de Arauco (Informe técnico) [en Línea]*. Ministerio del Medio Ambiente, Gobierno de Chile.< https://pras.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2022/12/INFORME-FINAL-RMGA-21.12.2022_Red-de-monitoreo-ambiental-de-ecosistemas-marinos-del-Golfo-de-Arauco.pdf>.
- [5](SEA), S. d. (2014). *Resolución de Calificación Ambiental – Planta Santa Fe (RCA) [en Línea]*. Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), Gobierno de Chile.< https://seia.sea.gob.cl/archivos/rca_planta_santa_fe.pdf>.
- [6](SEA), S. d. (2014). *Resolución Exenta N.º 037-2014 MAPA [en Línea]*. Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), Gobierno de Chile.
<https://seia.sea.gob.cl/archivos/Res_037-2014_MAPA.pdf>
- [7](SMA), S. d. (S.A). . *Datos abiertos — SNIFA: Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental[en Línea]*. <<https://snifa.sma.gob.cl/DatosAbiertos>>.
- [8]Bianca, P. (S.A). *Celulosa-Arauco tratamiento de la celulosa[en Línea]*.
<<https://es.slideshare.net/slideshow/celulosa-arauco-tratamiento-de-la-celulosa/270773019#21>>.
- [9]Campus. (2019). *Parámetros de mayor riesgo ambiental provenientes de efluentes líquidos en el Subsector Hidrocarburos [en Línea]*. Revista Campus de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad.< <https://www.usmp.edu.pe/campus/pdf/revista28/articulo6.pdf>>.
- [10]Carnero. (2020). *Pasta de Papel: Diferencias entre Química y Mecánica [en Línea]*.
<https://www.cevagraf.coop/blog/pasta-mecanica-y-pasta-quimica/?srsltid=AfmBOora9HHqCy3nLKGIVHRDkn3wQ-eVHwnL7WNrgrvW_Ixfl7dStsnB>.
- [11]CMPC. (2023). *Proyecto Patagonia CMPC [en Línea]*. CMPC_REP-SOST-2023-ESPANOL.<https://www.cmpc.com/pdf/CMPC_REP-SOST-2023-ESPANOL.pdf>.
- [12]CMPC. (S.A). *Gestión Hídrica [en Línea]*.< <https://www.cmpc.com/sostenibilidad/ambito-ambiental/gestion-hidrica/>>.
- [13]Copyright. (1943). *Cellulose Chemistry [en Línea]*. Brookling, N.Y. : Chemical Publishing Co., Inc.< https://ia601401.us.archive.org/33/items/in.ernet.dli.2015.350421/2015.350421.Cellulose-Chemistry_text.pdf>

- [14]Escare, F. (2012). *Proceso Productivo Celulosa Kraft CMPC [en Línea]*.
<<https://es.scribd.com/document/101162611/Proceso-Productivo-Celulosa-Kraft-Cmpc?v=0.115>>.
- [15]Fiori, F. a. (2024). *Aqueous Waste Containing AOXs: Critical Issues in Analytical Methods and Assessment of Possible Inhibitory Effects on Mesophilic and Thermophilic Aerobic Biomasses[en Línea]*. Appl. Sci.<
<https://www.mdpi.com/2076-3417/14/24/11546>>.
- [16]Hoekstra. (2001). *The Water Footprint Assesment Manual[en Línea]*. London, Washington, DC: Sustainable future.<
https://www.waterfootprint.org/resources/TheWaterFootprintAssessmentManual_Spanish.pdf>.
- [17]INIA. (S.A). *Agrometeorología[en Línea]*. <<https://agrometeorologia.cl/#>>.
- [18]Klemeš, P. J. (2020). *Halógenos orgánicos adsorbibles en ambientes de agua contaminada: una revisión de las fuentes y tecnologías de eliminación[en Línea]*. ElSevier.<
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620346898?via%3Dihub>>.
- [19]Mesa, d. A. (2019). *Recursos hídricos en Chile: Impactos y adaptación al cambio climático[en Línea]*. Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación; Gobierno de Chile.<
<https://www.minciencia.gob.cl/comitecientifico/documentos/mesa-agua/19.Agua-Recursos-Hidricos-Stehr.pdf>>.
- [20]Ribiero, A. B. (2022). *A Review on Cadmium and Lead Contamination: Sources, Fate, Mechanism, Health Effects and Remediation Methods[en Línea]*. Water.<
https://www.mdpi.com/2073-4441/14/21/3432?utm_source>.
- [21]Rojas. (2012). *Cambio climático en Chile: Ciencia, impactos y adaptación[en Línea]*. Universidad de Chile.<
<https://www.minciencia.gob.cl/comitecientifico/documentos/mesa-agua/19.Agua-Recursos-Hidricos-Stehr.pdf>>.
- [22]UFSCAR. (2022). *SUSTENTABILIDADE NO USO DE FÓSFORO: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA COM FOCO NA SITUAÇÃO ATUAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL[en Línea]*. Centro de Ciências Naturais e Humanas, Universidade Federal do ABC, 09210-580 Santo André – SP, Brasil.<
<https://quimicanova.sbq.org.br/pdf/RV2022-0130>>.

Anexos

Anexo A: Tabla precipitaciones año 2021 región del Biobío (INIA)

Precipitaciones Año 2021 Región del Biobío	
Estaciones	Precipitación (mm)
Aeródromo Isla Mocha	N/A
Aeródromo Lequecahue	150,8
Aeródromo María Dolores	N/A
Cangrejillo	N/A
Carriel Sur	591,4
Chiguayante	364
Chumulco	N/A
Contulmo Urbano	N/A
Dichato	6,3
GTT Peleco	579,9
Human	544,1
La Colcha	N/A
La Colcha MMA	N/A
La Colonia	485,9
La Hijuela	N/A
Las Puentes	1048,4
Lebu	1040,2
Liceo Agrícola El Huertón	403,1
Los Alamos	N/A
Ponotro	1387,3
Punta Parra	761,1
Santa Juana	N/A
Santa Lucía	372,5
Tanahullin	N/A
Total	7735

Anexo B: Tabla precipitaciones año 2022 región del Biobío (INIA)

Precipitaciones Año 2022 Región del Biobío	
Estaciones	Precipitación (mm)
Aeródromo Isla Mocha	N/A
Aeródromo Lequecahue	1531,6
Aeródromo María Dolores	N/A
Cangrejillo	N/A
Carriel Sur	874,2
Chiguayante	1149,4
Chumulco	N/A
Contulmo Urbano	1294
Dichato	68
GTT Peleco	828
Human	960,5
La Colcha	N/A
La Colcha MMA	N/A
La Colonia	781,6
La Hijuela	N/A
Las Puentes	1464,2
Lebu	1579,4
Liceo Agrícola El Huertón	606,4
Los Alamos	N/A
Ponotro	2071,4
Punta Parra	856,5
Santa Juana	N/A
Santa Lucía	572,5
Tanahullin	N/A
Total	14637,7

Anexo C: Tabla Parámetros Reportados Año 2021 Empresa 1 (SNIFA)

Promedio Parámetros Año 2021 Empresa 1				
Mes	AOX (mg/L)	Fosforo (mg/L)	Cadmio (mg/L)	Plomo (mg/L)
Enero	N/A	4,400	0,010	0,012
Febrero	N/A	1,020	N/A	N/A
Marzo	N/A	1,390	N/A	N/A
Abril	N/A	1,550	N/A	N/A
Mayo	N/A	1,360	N/A	N/A
Junio	N/A	1,180	0,010	0,012
Julio	N/A	1,210	N/A	N/A
Agosto	N/A	0,770	N/A	N/A
Septiembre	N/A	1,010	N/A	N/A
Octubre	N/A	1,090	N/A	N/A
Noviembre	N/A	0,950	N/A	N/A
Diciembre	N/A	0,863	N/A	N/A
Promedio	N/A	1,399	0,010	0,012

Anexo D: Valores Declarados RCA Empresa 1 (SEA)

Valores Decretados por RCA Empresa 1				
Parámetro	AOX (mg/L)	Fosforo (mg(L)	Cadmio (mg/L)	Plomo (mg/L)
Valor	3,6	-	-	-

Anexo E: Tabla Parámetros Reportados Año 2022 Empresa 1 (SNIFA)

Promedio Parámetros Año 2022 Empresa 1				
Mes	AOX (mg/L)	Fosforo (mg(L)	Cadmio (mg/L)	Plomo (mg/L)
Enero	N/A	1,260	0,010	0,012
Febrero	N/A	0,860	N/A	N/A
Marzo	N/A	1,570	N/A	N/A
Abril	N/A	0,703	N/A	N/A
Mayo	N/A	0,370	N/A	N/A
Junio	N/A	1,110	0,010	0,012
Julio	N/A	1,010	N/A	N/A
Agosto	N/A	1,110	N/A	N/A
Septiembre	N/A	1,040	N/A	N/A
Octubre	N/A	1,290	N/A	N/A
Noviembre	N/A	0,950	N/A	N/A
Diciembre	N/A	0,870	N/A	N/A
Promedio	N/A	1,012	0,010	0,012

Anexo F: Tabla N°1 DS 90/2000

LIMITES MAXIMOS PERMITIDOS PARA LA DESCARGA DE RESIDUOS LIQUIDOS A CUERPOS DE AGUA FLUVIALES			
CONTAMINANTES	UNIDAD	EXPRESION	LIMITE MAXIMO 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-	0,2
Cloruros	mg/L	Cl-	400
Cobre Total	mg/L	Cu	1
Coliformes Fecales o Termotolerantes	NMP/100ml	Coli/100 ml	1000
Índice de Fenol	mg/L	Fenoles	0,5
Cromo Hexavalente	mmg/L	Cr6+	0,05
DBO5	mg O2/L	DBO5	35*
Fosforo	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
Solidos Suspendidos Totales	mg/L	SS	80*
Sulfatos	mg/L	SO42-	1000
Sulfuros	mg/L	S2-	1
Tempura	C°	T°	35
Tetracloroeteno	mg/L	C2Cl4	0,04
Tolueno	mg/L	CHCl3	0,7
Xileno	mg/L	C6H4C2H6	0,2
Zinc	mg/L	Zn	3

Anexo G: Áreas de vigilancia (BCN)

Cauce	Área Vigilancia	Límites Área de Vigilancia	Coordenadas UTM		Ruso
			N	E	
Biobío	BI-10	Desde : Naciente río Biobío Hasta : Aguas arriba río Llanquén (Ralco)	5.711.543 5.769.355	310.452 298.618	19 S 19 S
	BI-20	Desde : Aguas arriba río Llanquén (Ralco) Hasta : Rucalhue	5.769.355 5.822.557	298.618 243.987	19 S 19 S
	BI-30	Desde : Rucalhue Hasta : Aguas arriba confluencia río Vergara	5.822.557 5.848.551	243.987 706.514	19 S 18 S
	BI-40	Desde : Aguas arriba confluencia río Vergara Hasta : Aguas arriba confluencia río Gomero	5.848.551 5.881.166	706.514 692.791	18 S 18 S
	BI-50	Desde : Aguas arriba confluencia río Gomero Hasta : Puente Mecano	5.881.166 5.921.259	692.791 672.524	18 S 18 S
	BI-60	Desde : Puente Mecano Hasta : Desembocadura boca Norte	5.921.259 5.925.241	672.524 663.277	18 S 18 S
Bureo	BU-10	Desde : Naciente Río Bureo Hasta : Aguas arriba confluencia río Biobío	5.795.898 5.838.106	265.051 721.500	19 S 18 S

Anexo H: Niveles de calidad ambiental por área de vigilancia en la cuenca del Río Biobío (BCN)

Nº	Contaminante	Unidad	BI-10	BI-20	BI-30	BI-40	BI-50	BI-60	BU-10	DU-10	LA-10	LA-20	LA-30	MA-10	RE-10	VE-10
1	Aluminio Total	mg/l	0,4	0,4	0,4	0,5	0,7	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
2	Amonio	mg N/l	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,06	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03
3	Compuestos Orgánicos Halogenados	mg/l	0,002	0,01	0,03	0,03	0,02	0,03	0,01	0,02	0,002	0,006	0,01	0,002	0,002	0,03
4	Cloruro	mg/l	3	7	7	8	8	-	4	4	3	3	3	4	5	6
5	Coliformes Fecales	NMP/100ml	50	50	500	500	1000	1000	1000	1000	50	50	500	50	50	500
6	Conductividad Eléctrica	µS/cm	80	99	150	150	150	-	80	120	80	95	150	60	60	80
7	Demanda Biológica de Oxígeno	mg/l	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
8	Demanda Química de Oxígeno	mg/l	5	5	8	8	5	7	9	6	3	3	8	6	7	10
9	Fósforo Total	mg/l	0,03	0,02	0,04	0,05	0,05	0,07	0,05	0,05	0,02	0,02	0,1	0,03	0,02	0,06
10	Hierro Total	mg/l	0,3	0,3	0,3	0,5	0,7	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4
11	Índice Fenol	mg/l	0,003	0,004	0,005	0,004	0,004	0,004	0,003	0,003	0,002	0,003	0,003	0,002	0,002	0,004
12	Nitrato	mg N/l	0,03	0,03	0,15	0,15	0,15	0,2	0,2	0,2	0,04	0,03	0,15	0,04	0,03	0,2
13	Nitrito	mg N/l	0,002	0,002	0,003	0,002	0,002	0,01	0,006	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,01
14	Nitrógeno Total	mg/l	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,6	0,1	0,1	0,3	0,2	0,1	0,4
15	Ortofosfato	mg/l	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,1	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,05
16	Oxígeno Disuelto	mg/l	10	10	9	9	8,7	8,7	9	9	9	8,7	8,7	10	9	9
17	pH	-	6,5-8,5	6,5-8,5	6,5-8,5	6,5-8,5	6,5-8,5	6,5-8,5	6,5-8,5	6,5-8,5	6,5-8,5	6,5-8,5	6,5-8,5	6,5-8,5	6,5-8,5	6,5-8,5
18	Sólidos Suspendidos Totales	mg/l	8	4	7	8	9	8	10	5	2	2	5	5	5	6
19	Sulfato	mg/l	5	6	6	14	14	-	5	5	7	6	6	5	5	10

Anexo I: Promedio caudal rio Biobío año 2021 (SNIFA)

Promedio Caudal Rio Biobío Año 2021 Empresa 1	
Mes	Caudal (m³/mes)
Enero	125211,00
Febrero	132133,50
Marzo	140453,00
Abril	133745,00
Mayo	124013,50
Junio	129109,00
Julio	128528,75
Agosto	116871,25
Septiembre	124524,00
Octubre	127637,00
Noviembre	128995,75
Diciembre	126182,50
Promedio	128117,02

Anexo J: Promedio caudal rio Biobío año 2022 empresa 1 (SNIFA)

Promedio Caudal Rio Biobío Año 2022 Empresa 1	
Mes	Caudal (m³/mes)
Enero	129037,00
Febrero	129140,75
Marzo	122396,25
Abril	126186,25
Mayo	125870,75
Junio	137568,25
Julio	129528,50
Agosto	128769,50
Septiembre	123826,75
Octubre	125443,00
Noviembre	116098,75
Diciembre	123296,00
Promedio	126430,15

Anexo K: Tabla Parámetros Reportados Año 2021 Empresa 2 (SNIFA)

Promedio Parámetros Año 2021 Empresa 2				
Mes	AOX (mg/L)	Fosforo (mg(L)	Cadmio (mg/L)	Plomo (mg/L)
Enero	N/A	N/A	0,010	0,012
Febrero	N/A	N/A	0,010	0,016
Marzo	N/A	N/A	0,010	0,012
Abril	N/A	N/A	0,010	0,012
Mayo	N/A	N/A	0,010	0,012
Junio	N/A	N/A	0,010	0,012
Julio	N/A	N/A	0,010	0,013
Agosto	N/A	N/A	0,010	0,012
Septiembre	N/A	N/A	0,010	0,012
Octubre	N/A	N/A	0,010	0,012
Noviembre	N/A	N/A	0,010	0,012
Diciembre	N/A	N/A	0,010	0,218
Promedio	N/A	N/A	0,010	0,029

Anexo L: Valores Declarados RCA Empresa 2 (SEA)

Valores Decretados por RCA Empresa 2				
Parámetro	AOX (mg/L)	Fosforo (mg(L)	Cadmio (mg/L)	Plomo (mg/L)
Valor	2,871	1,03	-	-

Anexo M: Tabla Parámetros Reportados Año 2022 Empresa 2 (SNIFA)

Promedio Parámetros Año 2022 Empresa 2				
Mes	AOX (mg/L)	Fosforo (mg(L)	Cadmio (mg/L)	Plomo (mg/L)
Enero	N/A	N/A	0,010	0,012
Febrero	N/A	N/A	0,010	0,012
Marzo	N/A	N/A	0,010	0,012
Abril	N/A	N/A	0,010	0,012
Mayo	N/A	N/A	0,010	0,012
Junio	N/A	N/A	0,010	0,018
Julio	N/A	N/A	0,010	0,012
Agosto	N/A	N/A	0,010	0,012
Septiembre	N/A	N/A	0,010	0,012
Octubre	N/A	N/A	0,009	0,018
Noviembre	N/A	N/A	0,010	0,012
Diciembre	N/A	N/A	0,010	0,012
Promedio	N/A	N/A	0,010	0,013

Anexo N: Tabla N°4 DS 90/2000

LIMITES MAXIMOS PERMITIDOS PARA LA DESCARGA DE RESIDUOS LIQUIDOS A CUERPOS DE AGUA MARINOS DENTRO DE LA ZONA DE PROTECCION LITORAL			
CONTAMINANTES	UNIDAD	EXPRESION	LIMITE MAXIMO PERMITIDO
Aceites y Grasas	mg/L	A y G	20
Aluminio	mg/L	Al	1
Arsénico	mg/L	As	0,2
Cadmio	mg/L	Cd	0,02
Cianuro	mg/L	CN-	0,5
Cobre	mg/L	Cu	1
Coliformes Fecales o Termotolerantes	NMP/100ml	Coli/100 ml	1000 - 70*
Índice de Fenol	mg/L	Fenoles	0,5
Cromo Hexavalente	mmg/L	Cr6+	0,5
Cromo Total	mmg/L	Cr Total	0,2
DBO5	mg O2/L	DBO5	60
Estaño	mg/L	Sn	0,5
Fosforo	mg/L	P	5
Fluoruro	mg/L	F-	1,5
Hidrocarburos Totales	mg/L	HCT	10
Hidrocarburos volátiles	mg/L	HCV	1
Hierro Disuelto	mg/L	Fe	10
Manganeso	mg/L	Mn	2
Mercurio	mg/L	Hg	0,005
Molibdeno	mg/L	Mo	0,1
Níquel	mg/L	Ni	2
Nitrógeno Total Kjeldahl	mg/L	NKT	50
PH	Unidad	Ph	6,0 - 9,0
Plomo	mg/L	Pb	0,2
SAAM	mg/L	SAAM	10
Selenio	mg/L	Se	0,01
Solidos Sedimentables	ml/l/h	S SED	5
Solidos Suspendidos Totales	mg/L	SS	100
Sulfuros	mg/L	S2-	1
Tempura	C°	T°	30
Zinc	mg/L	Zn	5

Anexo Ñ: Promedio caudal Golfo de Arauco año 2021 (SNIFA)

Promedio Caudal Golfo de Arauco Año 2021 Empresa 2	
Mes	Caudal (m3/mes)
Enero	139422,50
Febrero	143343,00
Marzo	136306,60
Abril	120928,75
Mayo	118325,50
Junio	145987,25
Julio	144628,50
Agosto	142531,75
Septiembre	148234,75
Octubre	147543,00
Noviembre	148932,20
Diciembre	144210,75
Promedio	140032,88

Anexo O: Promedio caudal Golfo de Arauco año 2022 (SNIFA)

Promedio Caudal Golfo de Arauco Año 2022 Empresa 2	
Mes	Caudal (m3/mes)
Enero	88120,75
Febrero	85619,50
Marzo	83054,00
Abril	86231,00
Mayo	90328,25
Junio	72851,75
Julio	94477,00
Agosto	85478,80
Septiembre	45575,00
Octubre	77477,48
Noviembre	118310,20
Diciembre	116165,50
Promedio	86974,10

Anexo P: Estudio “Red de Monitoreo Ambiental de Ecosistemas Marinos del Golfo de Arauco” (MMA)

Parámetro	UM	Nobs	min	max	mediana	prom	desvest	cv%
Aluminio	(µg/l)	2	97,1700	129,8600	113,52	113,5150	23,1153	20%
Cadmio	(µg/l)	2	0,0150	0,0150	0,0150	0,0150	0,0000	0%
Mercurio	(µg/l)	2	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,0000	0%
Plomo	(µg/l)	2	0,0150	0,0150	0,0150	0,0150	0,0000	0%
pH	(-)	2	7,3897	7,7025	7,5461	7,5461	0,2212	3%
Sólidos Suspendidos Totales	(mg/l)	2	3,7000	3,8000	3,7500	3,7500	0,0707	2%
Detergentes	(mg/l)	2	0,0040	0,0040	0,0040	0,0040	0,0000	0%
Oxígeno disuelto	(mg/l)	2	9,5379	11,9613	10,7496	10,7496	1,7136	16%
N-Nitrito	(mg/l)	2	0,0140	0,0360	0,0250	0,0250	0,0156	62%
N-Nitrato	(mg/l)	2	0,1230	0,1750	0,1490	0,1490	0,0368	25%
N-Amonio	(mg/l)	2	0,0720	0,8790	0,4755	0,4755	0,5706	120%
Nitrógeno Kjeldahl	(mg/l)	2	0,5200	0,5500	0,5350	0,5350	0,0212	4%
Nitrógeno disuelto	(mg/l)	2	0,2310	1,0680	0,6495	0,6495	0,5918	91%
Nitrógeno total	(mg/l)	2	0,7090	0,7090	0,7090	0,7090	0,0000	0%
Fósforo disuelto	(mg/l)	2	0,0700	0,0700	0,0700	0,0700	0,0000	0%
Fósforo total	(mg/l)	2	0,0700	0,1080	0,0890	0,0890	0,0269	30%
Fosfatos	(mg/l)	2	0,0310	0,0870	0,0590	0,0590	0,0396	67%
Indice de Fenol	(mg/l)	2	0,0010	0,0020	0,0015	0,0015	0,0007	47%
AOX	(µg/l)	2	14,1600	38,6400	26,4000	26,4000	17,3100	66%
Hidrocarburos Totales	(µg/l)	2	0,5170	0,8680	0,6925	0,6925	0,2482	36%
Carbono Orgánico Total	(mg/l)	2	1,4100	1,7400	1,5750	1,5750	0,2333	15%