



Universidad del Bío-Bío
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería en Maderas
Escuela Ingeniería Civil Química



EVALUACIÓN AMBIENTAL DE LA PULPA DE CELULOSA BLANQUEADA, FIBRA CORTA, EN CHILE

**Informe de Habilitación Profesional presentado en conformidad a los
requisitos para obtener el título de Ingeniero Civil Químico**

ADOLFO JAVIER CARVALLO ZENTENO

Profesor Tutor: Dra. Mabel Vega Coloma

Concepción, 24 mayo del 2022

RESUMEN

La industria forestal y de la celulosa es un sector de la economía que generó al año 2019 el 1,9 % del PIB de Chile y aún tiene expectativas de seguir creciendo. Aun cuando éste es un negocio rentable en el país y genera una gran cantidad de trabajo, la industria se ha encontrado constantemente en la palestra por conflictos socioambientales producidos en las comunidades afectadas por su actividad. Lo anterior hace que sea necesario identificar el desempeño ambiental de la industria para producir pulpa de celulosa en Chile. La evaluación de ciclo de vida (ECV) es una metodología que permite, a partir de una visión sistémica del proceso, cuantificar cuál es la carga ambiental en diversas categorías. A nivel internacional se han desarrollado estudios utilizando esta metodología, identificando que el biopulpaje es el proceso con menos efectos ambientales, pero el proceso Kraft es el que obtiene mejores rendimientos de producción, existiendo aún formas de mejorar su desempeño ambiental.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el desempeño ambiental, cuantificado a través de 8 categorías de impacto de ciclo de vida, de la producción de 1 tonelada de celulosa blanqueada fibra corta por proceso Kraft en la industria chilena, teniendo un enfoque desde la cuna hasta la puerta, incluyendo la etapa silvícola, el transporte desde el predio hasta la planta y la etapa industrial. Para lo anterior se consideraron datos primarios, con año base de producción 2017 y para una producción de 1.495.000 ton de pulpa/año. De los resultados obtenidos fue posible identificar que en 7 de las 8 categorías la etapa industrial es la que genera una mayor carga ambiental. En el caso del potencial de calentamiento global (PCG) se obtuvo un resultado de 468 kg CO_{2eq} por tonelada de celulosa, lo cual es un resultado de igual magnitud a lo que se genera en la industria española, pero deja el desafío de mejora según desarrollado actualmente en Noruega o Finlandia. Otros resultados como la ecotoxicidad terrestre (ET) muestran los significativos efectos del transporte en esta evaluación en el desempeño ambiental global. La etapa silvícola es el principal aportante en el potencial de eutrofización marina (PEM) generado principalmente por la utilización de fertilizantes, los cuales también tienen incidencia significativa en otras categorías como el potencial de calentamiento global (PCG), potencial de acidificación (PA) y otros.

Estos resultados permiten entregar información cuantificada para la toma de decisiones que apunten a mejoras del proceso tanto a escala global como por etapa, enfatizando aquellas categorías de impacto más significativas.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer primeramente a mi Padre Celestial por dotarme de las capacidades para poder desarrollarme académicamente, he visto su mano en mi vida y agradezco por eso. Sin lugar a duda, una muestra de su amor es la familia en la que nací pese a lo imperfecta, ha sido incondicional en su apoyo y protección. Mi mamá, Mabel, quien ha llevado la batuta, a veces en soledad, desde que soy pequeño, ella ha sido una ayuda incalculable y un ejemplo de cómo enfrentar la vida. Mi abuela, la gran icha, que con su paciencia me ayudó en los primeros pasos para ser un ingeniero, enseñándome a leer, a sumar, las tablas y tantas cosas más. Mi hermana Ignacia, que con su ejemplo de resiliencia me ha permitido entender que por dura que sea la vida, las metas se deben cumplir aun cuando esto requiera el doble de esfuerzo y a mi papá por su apoyo y confianza puesta en mí y a daguito, que llegó justo a tiempo a revolver la casa.

Es necesario también agradecer a quienes fueron un apoyo en el proceso, a cada uno de mis compañeros con quienes tuve que trabajar, con quienes compartimos algún viaje o comida. Quiero mencionar a la Pame y la Pauli con quien pasamos largas noches estudiando o haciendo trabajos que concluían con las clásicas “reflexiones” donde soñábamos en un mundo mejor, o también nos permitía poner los pies en la tierra. También agradezco a Julián por permitirme entrar en su interesante y soñador mundo azul, la Carlita por sus arengas en momentos de desmotivación y a si tantos otros que hicieron de mi vida universitaria un tiempo para atesorar. No puedo dejar de mencionar al Profesor Dr. Fredy Troncoso quien en una simple conversación no perdió la oportunidad de reconocer mi potencial y me instó a estudiar ingeniería civil química en la universidad del Bío-Bío.

Agradezco sinceramente a la escuela de Ingeniería civil Química de la universidad del Bío-Bío, a cada uno de sus académicos y funcionarios por su profesionalismo, amabilidad y compromiso por enseñar, en especial a la Dra. Mabel Vega Coloma quien me acogió para llevar a cabo esta habilitación profesional. Agradezco su compromiso inigualable tanto como profesora en los cursos que dictaba, como así también como profesora guía, las agradables reuniones, las sugerencias y las correcciones, y por sobre todo su mirada de la ingeniería, la que da un sentido no sólo técnico, sino también social de esta disciplina.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN	i
AGRADECIMIENTOS	ii
TABLA DE CONTENIDOS	iii
LISTADO DE FIGURAS	vi
LISTADO DE TABLAS	vii
ABREVIATURAS	viii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
3.1. Industria forestal en Chile.....	4
3.2. Proceso productivo	7
3.2.1. Proceso Silvícola.....	7
3.2.2. Manejo Forestal.....	8
3.2.3. Proceso productivo: Pulpaje Kraft.	9
3.3. Evaluación de ciclo de vida	12
4. OBJETIVOS	16
4.1. Objetivo general.....	16
4.2. Objetivos específicos	16
5. METODOLOGÍA	17
5.1. Generalidades:	17
5.2. Bases de datos y software	17
5.3. Definición del objetivo y el alcance.	17
5.3.1. Objetivo del estudio	17
5.3.2. Alcance.....	17
5.3.3. Unidad funcional.....	18
5.3.4. Límites del Sistema.....	18
5.3.5. Requisitos de calidad de los datos.....	18
5.3.6. Suposiciones.....	19
5.4. Análisis de inventario de Ciclo de Vida	19
5.4.1. Generalidades:.....	19
5.4.2. Recopilación de datos	19
5.4.3. Cálculo de datos	20
5.5. Evaluación de impacto e interpretación del ciclo de vida	21
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	22

6.1.	Balances de materia y energía	22
6.1.1.	Subsistema silvícola	22
6.1.2.	Subsistema Industrial	24
6.2.	Análisis de inventario	27
6.2.1.	Subsistema Silvícola	27
6.2.2.	Subsistema Industrial.	28
6.3.	Cálculo e interpretación de los impactos	29
6.3.1.	Subsistema silvícola	29
6.3.2.	Subsistema Industrial	33
6.4.	Comparación proceso global por subsistema.....	40
7.	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y LIMITACIONES	43
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45
	ANEXOS.....	51
	Anexo A:Plantaciones de bosque nativo, forestal y bosque mixto por región.	51
	Anexo B: Capacidad instalada por tipo de celulosa, segregada por planta.	52
	Anexo C: Evaluación de ciclo de vida de producción de celulosa libre de cloro elemental (ECF) (Ecoinvent, 2015).....	53
	Anexo D: Cálculo de rendimiento forestal.	54
	Anexo E: Cálculo de captura de CO2 de plantaciones forestales de Eucaliptus.	55
	Anexo F: Operaciones forestales, maquinaria utilizada, característica de la maquinaria, combustible e insumos utilizados por etapa.	56
	Anexo G: Matriz energética 2016.....	58
	Anexo H: Cálculo CO2 de origen fósil.....	59
	Anexo I: Resultados nominales por categoría de impacto para etapa silvícola.....	61
	Anexo J: Gráfica de red para Potencial de Acidificación (PA) en etapa silvícola	62
	Anexo K: Gráfica de red para Ecotoxicidad Terrestre (ET) en etapa silvícola.	63
	Anexo L:Gráfica de red para Ecotoxicidad Agua Dulce (EAD) en etapa silvícola.....	64
	Anexo M: Resultados nominales por categoría de impacto para etapa Industrial.....	65
	Anexo N: Gráfica de red para Potencial de Eutrofización de agua dulce (PEAD), etapa industrial.	66

Anexo O: Legislación de emisión para descarga de RILes	67
Anexo P: Tratamientos típicos de residuos líquidos.....	69
Anexo Q: Gráfica de red para Ecotoxicidad Terrestre (ET), etapa industrial.	70
Anexo R: Gráfica de red para Potencial de Ecotoxicidad de Agua Dulce (EAD), etapa industrial.	71
Anexo S: Contribución por etapa en cada categoría de impacto.	72

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1: Proceso de producción de pulpa blanqueada (Zaror, 2005).	5
Figura 2: Interrelación en la cadena productiva forestal (OIT, 2012).	5
Figura 3: Esquema de producción Kraft (Sánchez, 2017).	10
Figura 4: Marco de la Evaluación del ciclo de Vida (Zaror, 2005).	13
Figura 5: Contribución relativa porcentual para la etapa silvícola (Elaboración propia).	30
Figura 6: Contribución relativa porcentual para la etapa de producción industrial (Elaboración propia).	34
Figura 7: Aporte relativo por etapa de producción para las diversas categorías (Elaboración propia).	41
Figura 8: Potencial de Acidificación (PA) etapa silvícola (Elaboración propia).	62
Figura 9: Ecotoxicidad Terrestre (ET) en etapa silvícola (Elaboración propia).	63
Figura 10: Ecotoxicidad Agua Dulce (EAD) en etapa silvícola (Elaboración propia).	64
Figura 11: Potencial de Eutrofización de agua dulce (PEAD) (Elaboración propia)	66
Figura 12: Tratamientos típicos de residuos líquidos (Zaror, 2005).	69
Figura 13: Ecotoxicidad Terrestre (ET) (Elaboración propia).	70
Figura 14: Ecotoxicidad de Agua Dulce (EAD), para etapa industrial (Elaboración propia) ..	71

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1: Hectáreas plantadas de Pino radiata y Eucaliptus, por empresa (INFOR,2015)	6
Tabla 2: Capacidad instalada en producción de pulpa de madera, miles de ton/año, al 2015 (Lima, 2016).	6
Tabla 3: Suposiciones por subsistemas para la elaboración del ECV (Elaboración propia). ...	19
Tabla 4: Entrada/Salida de recursos subsistema silvícola para la producción de una hectárea de terreno forestal plantado con eucaliptus (Elaboración propia).	23
Tabla 5: Entrada/salida de proceso para el subsistema industrial para la fabricación de pulpa de celulosa blanqueada (Elaboración propia).	26
Tabla 6: Inventario de ciclo de vida para etapa silvícola, para 1 tonelada de troza pulpable (Elaboración propia)	28
Tabla 7: Inventario de ciclo de vida para etapa Industrial, por 1 tonelada de celulosa blanqueada (Elaboración propia)	29
Tabla 8: Bosque nativo, plantación forestal y bosque mixto. Superficie de bosque, según región. Año 2010 en hectáreas (CONAF, 2018).	51
Tabla 9: Evolución de la capacidad instalada para la producción de celulosa en toneladas, por tipo, región, empresa y año. Periodo 2013-2015 (Lima, 2018).	52
Tabla 10: Resultados de ECV para producción de celulosa libre de cloro elemental (ECF) (Ecoinvent, 2015).	53
Tabla 11: Secuencia en el sistema de producción de trozas de eucalipto en evaluación basado en prácticas reales realizadas en Chile (Elaboración propia a partir de lo publicado por Morales et al., 2022).	56
Tabla 12: Matriz energética chilena en el año 2016 (Elaboración propia)	58
Tabla 13: Resultados nominales por categoría de impacto para etapa silvícola (Elaboración propia).	61
Tabla 15: Resultados nominales por categoría de impacto para etapa industrial (Elaboración propia, 2022).	65
Tabla 15: Legislación medioambiental para la descarga de RILes (Elaboración propia, según información de la biblioteca del congreso nacional).	67
Tabla 16: Contribución nominal por categoría de impacto, separado por etapa de producción (Elaboración propia).	72

ABREVIATURAS

1,4-DCB	1,4 diclorobenceno
CaO	Óxido de calcio
CH ₃ SCH ₃	Dimetilsulfuro
CH ₃ SH	Metanotiol
ClO ₂	Dióxido de cloro
DQO	Demanda química de Oxígeno
EAD	Ecotoxicidad de Agua Dulce
ECV	Evaluación de ciclo de vida
ET	Ecotoxicidad Terrestre
FOTE	Formación de ozono Troposférico-Ecosistemas
FOTH	Formación de ozono Troposférico-Salud Humana
H ₂ O ₂	Peróxido de Hidrógeno
H ₂ S	Ácido sulfhídrico
H ₂ SO ₄	Ácido Sulfúrico
N ₂ O	Óxido Nitroso
Na ₂ CO ₃	Carbonato de sodio
Na ₂ S	Sulfito de Sodio
Na ₂ S	Sulfuro sódico
NaClO ₃	Clorato de Sódico
NaOH	Soda Cáustica
NaOH	Hidróxido de Sódico
NO _x	Óxidos de Nitrógenos
PA	Potencial de Acidificación
PCG	Potencial de Calentamiento Global
PEAD	Potencial de Eutrofización de Agua Dulce
PEM	Potencial de Eutrofización Marina
RILes	Residuos Industriales Líquidos
SO _x	Óxidos de azufre

1. INTRODUCCIÓN

Una de las industrias predominantes en la matriz productiva chilena, es la industria forestal y celulosa, la cual representó el 1,9% del PIB nacional del año 2019 (US\$5.196 millones de ingreso), y que a su vez representa el 8,1% de las exportaciones chilenas (INFOR, 2020). Desde la perspectiva regional, la región del Biobío representa el 60% del PIB forestal, seguida de la Región de La Araucanía con 10,5%, y en último lugar las regiones del Maule y de Los Ríos concentran un 10,1%, respectivamente (Cardemil, 2021). Globalmente, Chile es responsable del 2,24% de los de productos madereros globales y del 7% del total de pulpa para papel, siendo el cuarto país exportador, detrás de Brasil, Canadá y Estados Unidos (FAO, 2019).

Chile cuenta con una superficie continental de 75,6 millones de hectáreas, de las cuales el 55% (41,3 mill.) corresponden a terrenos forestales, lo que incluye a los bosques, humedales, praderas y matorrales (CONAF, 2013a). Del total de superficie forestal, el 13% corresponde a plantaciones de monocultivo perteneciente a empresas forestales, de las cuales el 55,8% son plantaciones de pino radiata seguido por el 37,2% equivalente a plantaciones de eucaliptus (INFOR, 2018). En la actualidad la superficie plantada de Eucaliptus ha ido en aumento en desmedro de la superficie plantada de pino radiata; mientras en la década de los 90's por una hectárea de eucalipto existían 8 hectárea de pino, en 2016 llegó a ser 1,5 hectáreas de pino por hectárea de eucaliptus (Cardemil, 2021).

En 2015 la cosecha de las plantaciones forestales llegó a un volumen de 43,6 millones de m³ssc, de los cuales, el 36,5% se utilizaron para la producción de pulpa química (Barrera, 2018). De acuerdo con la OIT (2012) la industria forestal chilena se ha especializado en la producción de celulosa, producto intermedio para elaborar otros productos de consumo masivo. La industrialización del sector forestal ocurrió de forma paralela con la expansión de plantaciones forestales, siendo la década de los 70's y 80's donde el Estado estimuló formación de grandes industrias. La industria forestal chilena, es una industria de carácter exportador, por lo que se orienta de acuerdo con las características de la demanda externa (OIT, 2012). Las principales empresas asociadas a este rubro son CMPC S.A. y ARAUCO, las cuales tuvieron una producción de 4,1 y 3,7 millones de toneladas de celulosa al año 2018, respectivamente (CMPC, 2018; Arauco, 2018).

Tanto las plantaciones forestales como la industria del pulpaje de celulosa causan suspicacias en las comunidades donde se emplazan y han causado conflictos socioambientales, producto de

los efectos que estos traen en las comunidades y los ecosistemas (Fuenzalida & Quiroz, 2012) pese a tener un potencial importante en el desarrollo sostenible ya que la fibra de celulosa se considera una materia prima renovable (Das & Houtmant, 2004). En el caso de las plantaciones forestales existen conflictos asociados a determinantes históricos vinculados al derecho de propiedad de las tierras donde se encuentran emplazados dichos predios (Jaimovich & Toledo, 2020), pero también los efectos que estos tienen en el medio ambiente, como los efectos de la salud producidos por los pesticidas utilizados en las etapas iniciales de producción, alteración de los equilibrios ecosistémicos, la calidad y cantidad de agua disponibles y los efectos en el suelo, en especial la acidificación, entre otros (Álvarez-Garretón, et al., 2019; Prado, 2019; Vallejos, et al., 2013). De la misma forma, la industria de la celulosa en reiteradas ocasiones se ha encontrado en la palestra, por sus efectos en el medio ambiente, ya que el proceso químico genera grandes volúmenes de efluentes que se caracterizan por su elevado contenido de sólidos, materia orgánica, color y toxicidad. Lo anterior, ha provocado impactos en las comunidades aledañas y en los ecosistemas con efectos irreparables, un alto consumo de agua necesaria para la producción y un reñido cumplimiento de la legislación ambiental vigente para efluentes (Queiroz-Sperotto, 2018; OLCA, 2020). Incluso, en Canadá se estima que la industria de celulosa es responsable del 50% de los residuos eliminados en el agua (Pokhrel & Viraraghavan, 2004).

Con la importancia de la industria forestal en Chile, parece relevante conocer cuál es la carga ambiental de todo el proceso con una mirada global, incluyendo las descargas de contaminantes a cuerpos de agua, a la atmósfera o al suelo, y también, conocer la demanda de recursos naturales que se utilizan, los insumos químicos, el agua, y el transporte involucrado. La evaluación de ciclo de vida (ECV) tiene como fin, evaluar cada uno de los efectos ambientales generados a lo largo de la vida del producto, es decir, desde las fuentes primarias del producto, lo que se denomina “desde la cuna”, hasta la disposición final, lo que permite identificar los impactos más allá de los límites de la planta productiva (Zaror, 2005).

Por lo anterior, este estudio tuvo como objetivo de cuantificar el impacto medioambiental de la producción de pulpa de celulosa química según la realidad de la industria chilena. Para ello se utilizaron datos publicados de los procesos productivos por las empresas del sector para la producción de pulpa de fibra corta. Con los resultados obtenidos, es posible comparar cuales son los niveles de impacto del proceso en Chile, respecto al proceso en otras partes de mundo, proponer mejoras dentro del proceso con el objetivo de promover tecnologías más limpias.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El mundo en la actualidad se encuentra enfrentando una crisis climática que pone a Chile dentro de los países con mayor vulnerabilidad frente al cambio climático, principalmente por las características geográficas, y el aumento de áreas propensas a sequías, entre otras (Centro UC, 2017). Esto ha llevado a implementar cambios que permitan dirigir la productividad y el consumo hacia una actividad amigable con el medio ambiente, por lo cual se intenta migrar a nuevas tecnologías y utilización de otro tipo de materiales; por ejemplo, reemplazando el plástico por papel y cartón. Lo anterior tiene un efecto directo en la realidad nacional por la relevancia de la industria de pulpa y papel en erario nacional, ya que éste ronda el 2% del PIB nacional. Adicionalmente el año 2021 las exportaciones de esta industria aumentaron en un 43% comparativo con igual mes del 2020, totalizando durante el primer cuatrimestre del 2021 US\$1740 millones por conceptos de exportaciones (CORMA, 2021).

De los 2,5 millones de hectáreas de plantación de monocultivos (INFOR, 2018) cerca del 37% es utilizado para pulpa química (Barrera, 2018). La industria de la celulosa en Chile cuenta con una capacidad de producción instalada al 2015 de 5,8 millones de toneladas/año, produciendo cerca de 5 millones de toneladas/año de las cuales el 45% corresponde a pulpa blanqueada de eucaliptus (Barrera, 2018).

La actividad forestal, como la industria de pulpaje en su conjunto levanta desconfianzas en diversas comunidades (Fuenzalida et. al, 2012), por los impactos causados en el medio ambiente, como también en las poblaciones aledañas quienes se ven afectada su calidad de vida producto de los olores generados, el vertimiento de RILes en diversos cuerpos de aguas, emisiones de contaminantes atmosféricos, generación de residuos sólidos, entre otras. Considerando la necesidad de seguir produciendo pulpa blanqueada y los perjuicios que esta producción tiene en la naturaleza, es necesario evaluar y conocer cuál es el impacto ambiental generado por todo el proceso productivo de pulpa de celulosa. Ello para determinar oportunidades de mejora en el desempeño ambiental en las diferentes etapas del proceso, considerando también, como una oportunidad de posicionar este producto en mercados internacionales exigentes.

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En el presente capítulo se muestran los factores que inciden en la producción de pulpa blanqueada Kraft en Chile, comenzando por una reseña de la industria, seguido de una descripción de las diferentes etapas abordadas en este análisis, cerrando con una revisión de otros estudios, con enfoque de ciclo de vida, aplicados a un sistema producto similar.

3.1. Industria forestal en Chile

La industria forestal y la producción de pulpa de celulosa, ambas estrechamente relacionadas, son industrias de gran importancia en el país. La producción de celulosa entre los años 2000 y 2013 se duplicó gracias al incremento de la capacidad instalada para la producción, como también en la optimización de los procesos en plantas ya instaladas, motivado por el aumento de la demanda mundial. En más, Chile en 2016 ocupó el cuarto lugar del valor de exportaciones mundiales, representando el 5,6% de lo comercializado, siendo los principales destinos de exportación Asia encabezado por China donde se destina cerca del 48% de las exportaciones, Europa con cerca del 13%, Estados Unidos un 2% dejando este último de ser el destino principal tal como lo fue a principio de la década del 2000 (Barrera, 2018).

El sector forestal, se puede desagregar en 4 grandes etapas: la silvicultura, producción de madera, fabricación de pulpa y papel, y productos con valor agregado. Chile se ha especializado en la fabricación de pulpa química ya que para este fin se utiliza cerca el 40% de la biomasa forestal obtenida. En Chile existen 8 plantas de producción de celulosa química, utilizando todas éstas el proceso Kraft para su producción. (Barrera, 2018; OIT, 2012).

En la Figura 1 se describe el proceso productivo de celulosa Kraft típicamente utilizada en la industria chilena. La figura muestra dos subsistemas, uno el subsistema silvícola, donde se considera todo el proceso productivo de obtención de la madera y el subsistema industrial, donde se considera las diferentes etapas de producción de la industria de celulosa, cada uno delimitado por líneas verdes punteadas. El transporte es considerado una etapa intermedia que debe ser considerado al momento de estudiar los efectos medio ambientales del proceso.

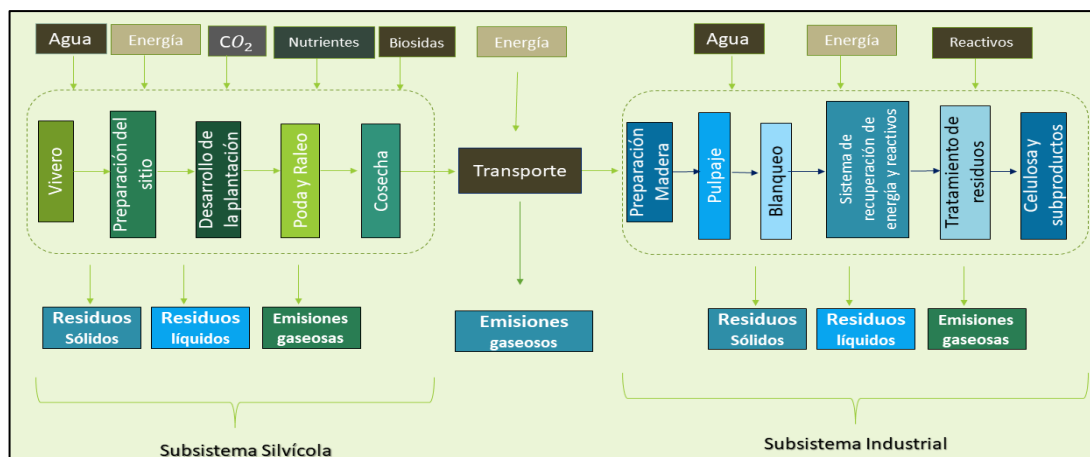


Figura 1: Proceso de producción de pulpa blanqueada (Zaror, 2005).

La industria forestal chilena, en la actualidad basa su producción a partir de especies exóticas, principalmente el pino radiata (*Pinus radiata*) y el eucalipto (*Eucalyptus globulus* y *Nitens*). Las regiones del Maule, Biobío, Araucanía, Los Ríos y Los Lagos son 5 regiones que concentran la industria forestal y su respectiva cadena de producción, ya que en estas existe más del 50% de la superficie de bosque del país y el 92 % del bosque plantado (Ver Anexo A). En estas regiones las exportaciones de productos madereros y papeleros representan aproximadamente el 80% del total (OIT, 2012).

El proceso de producción comienza con el vivero y la plantación de bosques, lo que se conoce como silvicultura seguido por las faenas forestales las que involucran desde la cosecha hasta el corte de árboles, los cuales serán destinados a alguna de las etapas industriales. La industria forestal se divide en dos grandes cadenas productivas: la producción de productos madereros (manufacturados y semi elaborados) y la producción de celulosa y papel. Ambas líneas son alimentadas por la fase primaria, fase silvícola- forestal (ver Figura 2).

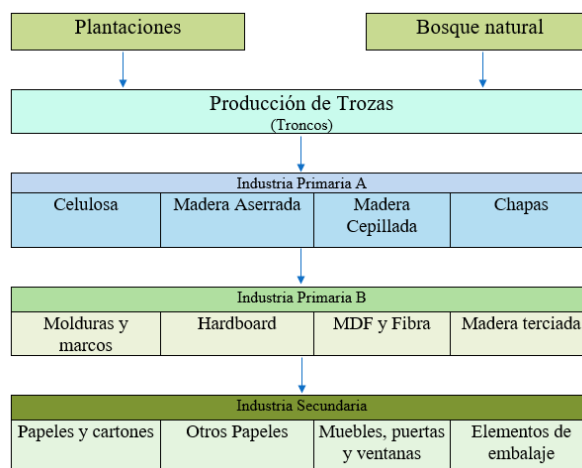


Figura 2: Interrelación en la cadena productiva forestal (OIT, 2012).

La industria forestal se encuentra fuertemente concentrada, siendo las dos principales Arauco y CMPC, pertenecientes a dos grandes grupos económicos chilenos. Todas estas empresas realizan una integración vertical, desde los bosques hasta los diversos productos finales. La Tabla 1 muestra la distribución de las hectáreas plantadas de Pino radiata y Eucaliptus por empresa, lo que concentra el 63% de las plantaciones forestales. La producción restante corresponde a 22.223 propietarios, de los cuales solo 10 son medianas empresas con patrimonio entre las 5 mil y 30 mil hectáreas (INFOR, 2015).

Tabla 1: Hectáreas plantadas de Pino radiata y Eucaliptus, por empresa (INFOR,2015)

Empresa	Hectáreas de pino	de %	Hectáreas eucaliptus	de %
Forestal Arauco	559.402	39,0	157.053	19,0
CMPC	300.000	20,9	170.000	20,5
Masisa	48.843	3,4	293	0,0
Otras	525.840	36,7	501.382	60,5
Total	1.434.085	100,0	828.728	100,0

De igual manera, en Chile solo existen 3 empresas que poseen plantas de elaboración de pulpa mecánica (cartulinas) y química (celulosa): Celulosa Arauco y Constitución S.A., CMPC y Bo Paper S.A. En Tabla 2 se muestra la capacidad instalada por cada empresa y el tipo de pulpa que procesan (Lima, 2016). En Anexo B se adjunta tabla con la capacidad instalada al 2015 de producción de celulosa según tipo, desagregado por planta de producción de las diferentes empresas.

Tabla 2: Capacidad instalada en producción de pulpa de madera, miles de ton/año, al 2015 (Lima, 2016).

Nombre de la Empresa	Tipo de Pulpa				Total
	Pino-Mecánica	Pino química	Eucaliptus química	Ambas química	
Celulosa Arauco	0	1.518	803	500	2.821
Constitución					
CMPC	430	860	1.490	0	2.780
Bo paper (ex papeles Bío Bío)	125	0	0	0	125
Total	555	2.378	2.293	500	5.726

3.2. Proceso productivo

3.2.1. Proceso Silvícola

3.2.1.1. *Generalidades:* El establecimiento, manejo y cosecha de plantaciones forestales en Chile, debe cumplir con legislación vigente que regula esta actividad, la que considera el D.L.701/74 sobre fomento forestal con sus reglamentos y modificaciones, la Ley 20.283 de recuperación del bosque nativo y fomento forestal, así como la ley de Bosques, reglamento de suelo, aguas y humedales y así también de la Ley 19.300, Ley de Bases del Medio Ambiente con sus reglamentos y modificaciones.

3.2.1.2. *Establecimiento de plantaciones forestales:* El establecimiento de plantaciones forestales parte con delimitar claramente el terreno, estableciendo la superficie a utilizar, las condiciones del suelo, el clima, los objetivos de manejo, identificando las áreas de protección y conservación según corresponda, y estableciendo áreas de amortiguación que permitan minimizar las repercusiones de las actividades que se proyectan realizar tales como camino, infraestructura y recursos hídricos (CONAF, 2013b).

3.2.1.3. *Producción o suministro de plantas:* Esta etapa es clave para el éxito futuro de la plantación ya que éstas deben demostrar su adaptación satisfactoria a los requerimientos del sitio o terreno. Las plantas a utilizar pueden provenir de viveros externos o de establecimientos propios. Si es de este último debe cumplir con las exigencias del Servicio Agrícola y Ganadero (SAG). En el caso de la gran industria, la producción de semillas y plantas es llevada a cabo en viveros de patrimonio de la empresa (CONAF, 2013b; OIT, 2012). Cuando las plantas cumplen con el estándar necesario, son transportadas a los terrenos previamente seleccionados.

3.2.1.4. *Preparación del sitio:* Las diferentes acciones que se realizan para preparar el sitio tienen como fin mejorar las condiciones físicas del suelo que permitirán mantener o mejorar la productividad y así favorecer la futura plantación. La preparación del sitio parte con la limpieza de éste, donde se debe equilibrar el dejar una cubierta vegetal para evitar la erosión del suelo y el control de especies vegetales que compiten con el establecimiento de las plantas. La preparación del sitio se basa en romper profundamente los suelos formando surcos, utilizando un tractor conectado con un desgarrador de suelo. A continuación, se realiza un control de malezas para erradicar la hierba y las malezas perennes la cual puede ser un

control mecánico (utiliza herramientas, generalmente manuales) o químico. Se aplica un herbicida (en general, glifosato) usando un esparcidor (Morales et al, 2015; CONAF, 2013b).

3.2.1.5. *Labores de plantación:* La plantación se debe realizar en una época del año que permita tener la humedad suficiente para su establecimiento y desarrollo. Como referencia, se recomienda verificar que se encuentre humedecido al menos 20 cm de profundidad del suelo. Junto a lo anterior es fundamental definir cuántas plantas se establecerán por hectárea lo cual dependerá del objetivo de la plantación a generar. En general se utilizan entre 450 y 1600 plantas por hectárea. Para sistemas extensivos o puros de carácter forestal, las plantaciones no sobrepasan las 1250 pl/ha. estableciendo distanciamiento entre plantas de 4 x 2 metros o 3 x 3 metros (CONAF, 2013b; Pinilla, 2011).

3.2.1.6. *Fertilización:* La fertilización busca mejorar el desarrollo y supervivencia de la planta, debido a que estimula el desarrollo de sus raíces, optimiza el uso de agua y captación de nutrientes de manera eficaz y suficiente motivando el crecimiento inicial acelerado para una ocupación óptima del suelo. En plantaciones forestales se suele utilizar fertilizantes ternarios, tal como el fosfato diamonio. La fertilización se realiza por cada evento de cosecha (Morales et al, 2015; CONAF, 2013b).

3.2.2. Manejo Forestal

3.2.2.1. *Podas:* Se entiende por poda el corte o eliminación de ramas de la parte inferior del fuste con el fin de obtener una madera de mejor calidad libre de nudos, y a su vez ayudar en el acceso por el rodal y facilitar las futuras faenas de volteo. Si el predio está destinado solo a la producción de celulosa o energía, este paso no es necesario (CONAF, 2013b; Pinilla, 2011).

3.2.2.2. *Raleo:* Se entiende por raleo el extraer, cortar o eliminar los árboles de un sector que compita en el crecimiento y desarrollo de los árboles seleccionados para la cosecha o que tengan un desarrollo deficiente según el objetivo de la plantación. Si la plantación está destinada solo a la producción de celulosa, tampoco se recomienda hacer esta tarea (CONAF, 2013b; Pinilla, 2011).

3.2.2.3. *Control de malezas y fitosanitario. Manejo integrado de plagas y enfermedades:* Si en el predio se presentan malezas o problemas fitosanitarios se realiza un control químico que debe ser de forma selectiva y localizada. Para el

control de plagas y enfermedades se puede utilizar una técnica biológica (enemigo natural), silviculturales (poda, raleo, otros), químicas (insecticidas o plaguicidas con registro SAG) o mecánicas (remoción y destrucción de árboles). La aplicación de lo anterior requiere de una identificación exhaustiva del problema sanitario (CONAF, 2013b).

3.2.2.4. *Cosecha*: Según el manual de manejo forestal de CONAF (2013b), la cosecha forestal es la actividad silvícola de mayor impacto en el suelo y el agua. El volteo de los árboles se realiza con motosierras manualmente. La biomasa extraída es llevada a zonas de acopio con autocargadores, para luego ser transportada en camiones. Los tocones (parte del tronco que queda en el suelo) son sacados con retroexcavadoras o de manera manual, para luego ser astillados. Al terreno después de cada cosecha se le aplican agroquímicos (herbicidas y fertilizantes) para eliminar la vegetación indeseable y mejorar la calidad del suelo (Morales, et al., 2015).

3.2.2.5. *Caminos forestales*: Los caminos forestales son fundamentales para desarrollar de forma segura y eficiente las faenas, como así también, para facilitar el transporte de los productos obtenidos. La formación de caminos puede causar grandes impactos en los ecosistemas, por lo que requiere una buena planificación. Los caminos principales (conectan las áreas de cosecha con zonas de carga) y los secundarios son de carácter permanente y los caminos terciarios (conectan lugares de corta y lugares de carga) son de uso temporal (CONAF, 2013).

3.2.3. Proceso productivo: Pulpaje Kraft.

3.2.3.1. *Generalidades*: El proceso de pulpaje Kraft consiste en producir la celulosa a partir de trozos de maderas en solución alcalina. Este proceso tiene sus ventajas al tener la posibilidad de recuperar los productos químicos utilizados, permite la generación de energía y tiene una mayor eficiencia teórica (Sánchez, 2017; OIT, 2012). La Figura 3 muestra un diagrama de la producción de pulpa de celulosa por medio del proceso Kraft en una planta de CMPC.

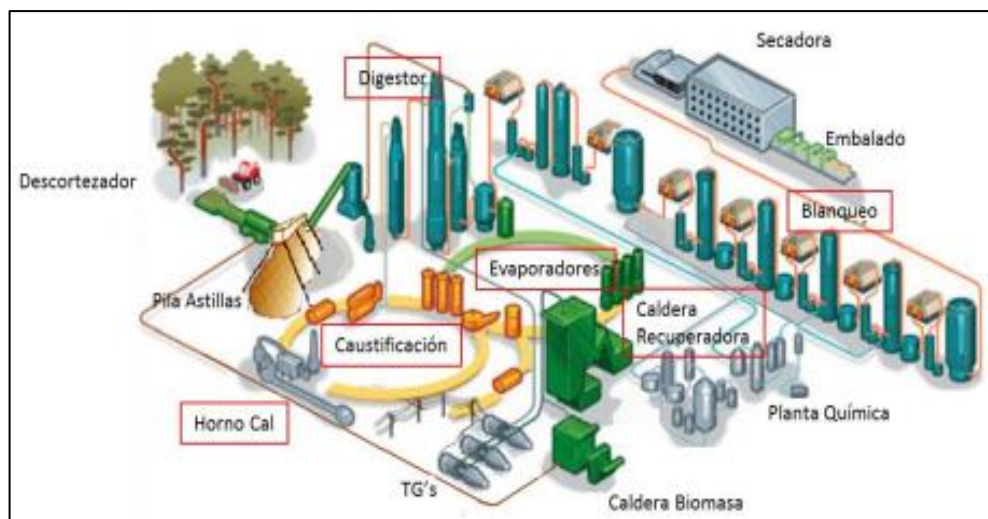


Figura 3: Esquema de producción Kraft (Sánchez, 2017).

En general, la pulpa de madera química se obtiene a partir de la extracción de la celulosa de la madera y disolver la lignina. El proceso más utilizado en Chile, es el proceso Kraft el que utiliza hidróxido y sulfuro de sodio (Boeykens, 2006; EPA, 1995).

3.2.3.2. *Cancha de acopio, descortezado y generación de astillas:* En la cancha de acopio se apila la materia prima que corresponde a rollizos y astillas de Eucaliptus. Los rollizos se apilan en bloques de 90m x 90m x 5m. Rollizos requieren ser descortezados por lo cual la materia prima es lavada con el fin de sacar el barro o alguna impureza que puede alterar el proceso. La madera es llevada a un tambor donde la corteza es desprendida por fricción y luego se llevan a los astilladores. Las astillas obtenidas se clasifican de acuerdo con su tamaño en cuatro grupos: astillas aceptadas, pin-chip, sobre tamaño y fino. De las anteriores solo las dos primeras son utilizadas para el proceso de pulpaje y son llevadas al punto de consumo, las con sobre tamaño volverán al proceso y los finos se juntan con la corteza para ser utilizados como combustible (Sánchez, 2017).

3.2.3.3. *Cocción:* La etapa de cocción involucra desde el ingreso de las astillas de madera hasta el paso por el digestor. Se espera en esta etapa realizar las reacciones químicas entre el licor blanco y la lignina, para que ésta sea disuelta. Las astillas son sometidas a vapor de agua para eliminar el aire en una tolva y mejorar la eficiencia del contacto entre la materia prima y el licor. Posteriormente las astillas son llevadas a un impregnador de alta presión y a temperatura de entre los 100 y 110° C, donde comienza el proceso a agregar el licor blanco, es decir, una solución alcalina basada

en soda cáustica (NaOH) y sulfito de Sodio (Na₂S). En el digestor continuo las astillas se someten a cocción a altas temperaturas (170° C) y presión en presencia de licor blanco y negro débil, proceso por el cual es posible librar fibras de celulosa mediante la disolución de lignina que las mantiene unidas. En esta etapa es posible identificar las primeras emisiones tanto al agua como al aire gases malolientes como CH₃SH, CH₃SCH₃ y H₂S nocondensables (Sánchez, 2017; OIT, 2012; EPA, 1995).

3.2.3.4. *Lavado y Deslignificación:* La pulpa proveniente de la etapa anterior es llevada a un tanque de soplado, donde se busca desintegrar las astillas previamente ablandadas, formando pulpa café. Esta pulpa es llevada a filtros lavadores donde es filtrada y lavada. La pulpa es lavada al mezclador donde primeramente es mezclada con oxígeno y vapor y luego homogenizada con los químicos. Posterior la pulpa pasa por dos reactores, el primero de oxígeno, donde se hace reaccionar la pulpa generando las condiciones para la delignificación. El segundo reactor por el que pasa la pulpa, continua la deslignificación de la pasta. Posteriormente, la pulpa pasa por un estanque de soplado de oxígeno, de manera de proporcionar alimentación constante y homogénea a los separadores de nudos. En los separadores de nudos, la pulpa mejora su calidad y se retiran las impurezas como nudos y finos. Concluido el paso por los separadores, la pulpa es llevada a los espesadores, aumentando la consistencia desde un 3% a un 4%. Esta pulpa es llevada entonces a un lavado post oxígeno, donde se lava y filtra la pulpa. (Sánchez, 2017; OIT, 2012).

3.2.3.5. *Blanqueo:* Es necesario que a la pulpa café que viene de la etapa anterior, se le retire los remanentes de lignina y otras impurezas presentes, para así aumentar la blancura y la calidad requerida. Para lograr lo anterior, es necesario agregar agentes oxidantes que sean selectivos con la lignina, donde se utiliza una secuencia de blanqueo en base a dióxido de cloro (ClO₂) y Peróxido de Hidrógeno (H₂O₂) como agente oxidante, utilizados en varias etapas sucesivas de extracción y lavados intermedios. De la etapa de blanqueo se obtienen una gran cantidad de Residuos Industriales Líquidos (RILes) los cuales son llevados a plantas de tratamientos y éstos a su vez desprenden olores (Sánchez, 2017; ECOTEC, 2013).

3.2.3.6. *Secado y formación de la hoja:* Para la formación de la hoja que es el producto final del proceso, la pulpa obtenida del blanqueo pasa por una máquina de secado, para lo cual previamente es necesario asegurar la homogeneidad, la consistencia, temperatura y pH de la pulpa. Posteriormente se dispone la pulpa de

forma uniforme sobre una superficie de tela obteniendo un gramaje uniforme. El agua de la pulpa es extraída por presión. La hoja en formación luego de ser ajustada en su tamaño pasa por dos rodillos pasando por 4 puntos de prensados para posteriormente ser secada por aire caliente (Sánchez, 2017).

3.2.3.7. *Recuperación de reactivos y energía:* El licor negro (lignina, cenizas, fibras degradadas) posee un alto valor energético. En los evaporadores, el licor negro logra una concentración de aproximadamente un 79%, eliminando el agua residual. Con la quema de la fracción orgánica, es posible obtener energía calorífica, la que se utiliza en la producción de vapor y energía eléctrica, carbonato de sodio (Na_2CO_3) y sulfuro sódico (Na_2S). Con las sales obtenidas se forma el licor verde, el cual se hace reaccionar con el óxido de calcio (CaO), formando el licor blanco el cual es reutilizado en el proceso de cocción. Esta etapa se le atribuye la mayor cantidad de emisiones al aire y es donde se producen los malos olores característicos del proceso (Sánchez, 2017; ECOTEC, 2013; EPA, 1995).

3.3. Evaluación de ciclo de vida

La evaluación de ciclo de vida (ECV) busca determinar cada uno de los efectos ambientales generados a lo largo de la vida de un producto, es decir, cada una de las fuentes de recursos primario hasta su disposición final, logrando identificar los impactos ambientales más allá de los límites de la planta, es decir, no solo se evalúan los residuos que se generan del proceso, sino también los recursos naturales que se requieren, los insumos, la energía y el agua que utilizan e incluso el transporte utilizado (Zaror, 2005). La ECV en la actualidad es una herramienta de gestión ambiental y diseño de procesos menos contaminantes, la cual debe ser realizada cumpliendo con lo establecido en la norma ISO 14040-44:2006. Su metodología consta de 4 partes fundamentales, tal como se describe en la Figura 4, la que consta de definición de objetivos y alcance, donde se enuncia el “por qué” de la realización de la ECV, el análisis de inventario donde se recolectan, y analizan los datos disponibles para la ECV, evaluación de los impactos ambientales potenciales y la interpretación de los resultados, la cual va de la mano de la aplicación que quiera dar a la ECV, ya que esta podría ayudar a identificar oportunidades de mejora en el desempeño ambiental de todo el ciclo de vida, informar a quienes toman decisiones tanto en el área privada como pública con el fin de realizar una planificación estratégica e incluso el marketing especialmente si se busca obtener algún etiquetado ecológico (NCh-ISO, 2012).

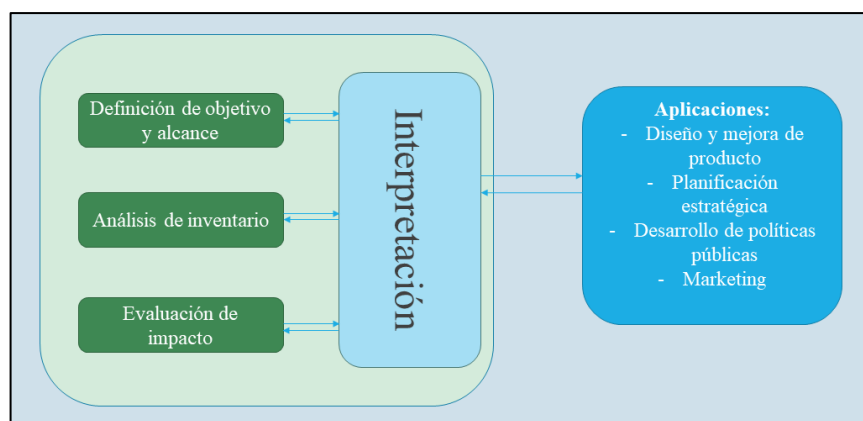


Figura 4: Marco de la Evaluación del ciclo de Vida (Zaror, 2005).

La bibliografía científica es escasa en cuanto al tema a nivel mundial, pero permite tener un parámetro de comparación al momento de aplicar esta metodología a la realidad nacional. Das et al. (2004) comparó 3 tipos de técnicas de producción: mecánica, química y biopulpaje (degradación de la lignina por medio de hongos) relacionando las cargas ambientales, con el uso de insumos y energía y la calidad del producto obtenido. De los resultados se tiene que se producen 1,6 ton de CO_{2eq} /ton de celulosa. Sin embargo, por el orden de magnitud de lo reportado por otros autores (Kuparinen, et al., 2019; González-García, et al., 2009; Lopes, et al., 2002), el resultado sugiere que contiene la suma de las emisiones tanto fósiles como biogénicas, lo cual no es explícito y no consistente con la actual metodología, ya que es necesario segregar las emisiones biogénicas de las fósiles, dado que las últimas son consideradas carbonos neutrales (GIZ, 2021; Kuparinen, et al., 2019).

Por otro lado, Lopes et al. (2002) evaluó la producción de celulosa por proceso Kraft y papel para escribir, a partir de fibra corta obtenida de eucaliptus *globulus* en Portugal comparando el impacto ambiental de la utilización gas natural y fuel oil pesado en el proceso. Metodológicamente, hace la diferencia entre el CO₂ de origen fósil y renovable, siendo este última cerca del 90% del CO₂ total generado en todo el ciclo. De los resultados obtenidos, si se observan las emisiones al aire, la emisión de CO₂ se ve asociadas principalmente a la generación de energía in situ en el proceso, como también al transporte desde el predio forestal a la planta de producción de celulosa. Según los cálculos realizados por Lopes se generan ceca de 400 kg de CO_{2eq}/ton celulosa. En el caso de los NO_x el transporte fue su mayor aportante, cercano al 50% de las emisiones, acompañado de la combustión de licor negro en lola caldera. En el caso de las emisiones al agua, se demuestra que la producción de pulpa de papel produce altas concentraciones de DQO y AOX generadas principalmente por el uso de dióxido de cloro en el proceso de blanqueamiento.

De igual manera, González-García, et al., (2009) identificaron y cuantificaron los impactos ambientales asociados a la producción de celulosa de Eucaliptus TCF. De ello se obtuvo 431,3 kg CO_{2eq} /tonelada de pulpa. Este CO₂ es de origen fósil ya que la quema de biomasa no está incluida en el cálculo. Del resultado cerca del 65% de las emisiones están asociada a la quema de combustible en el horno de cal, seguido de la producción de insumos químicos con un 31%. Es importante resaltar, que en este trabajo no se consideró el transporte de madera desde el predio forestal a la planta productiva.

De la base de datos Ecoinvent 3 *cut-off by classification- unit* (ver Anexo C) alojada en el Software SimaPro 8, (2019), para la producción de pulpa de celulosa en proceso Kraft libre de cloro elemental, que incluye el transporte de madera pulpable desde predios a planta de producción y el manejo forestal, el resultado de la categoría de potencial de Calentamiento Global es de 626 kgCO_{2eq}/ton de celulosa blanqueada, un Potencial de Acidificación terrestre de 3,4 kg de SO₂ eq/ton de celulosa blanqueada.

Para la realidad chilena, González, et al., (1998) realizó un análisis de inventario de ciclo de vida de producción de celulosa blanqueada. De él es posible identificar que, por cada tonelada de celulosa se generan 1,3 ton de CO₂ fósil, 1,83 ton de CO₂ biogénico, 2,9 kg de NO_x y 2,1 kg de SO₂. Al comparar resultados anteriores con lo publicado por otros autores (Kuparinen, et al., 2019; González-García, et al., 2009; Lopes, et al., 2002) con estudios más reciente, las emisiones de CO₂ fósil están fuera de magnitud, lo que se explica al considerar la tecnología disponible a la fecha y la tendencia a la autosuficiencia de la industria en la actualidad (Kuparinen, et al., 2019). De hecho, González, et al., (2011) realizó una comparación de inventario posterior, a partir de las modificaciones en el proceso productivo de las industrias en Chile y se informó una emisión de 120 kg de CO_{2fósil}/ton de celulosa, mostrándose una considerable reducción en el tiempo. En concordancia con lo último, Kuparinen, et al., (2019) señala que con la tecnología disponible actualmente y con la utilización de combustibles fósiles solo en el arranque y apagado de calderas y el horno de cal se espera una generación de 110 a 220 kg CO₂/ADT de los cuales entre 100-200 kg son generados en el horno de cal y a su vez se esperan una generación de entre 1.600 a 2.400kg CO₂/ADT biogénico por concepto de quema de biomasa.

Para la situación nacional Morales et al., (2015) estudió plantaciones de Eucaliptus *globulus* con rotación corta para la producción de biodiesel, con la cual fue posible obtener datos de inventario para la producción de la madera pulpable. Los límites del sistema en este caso incluyen el proceso de chipeo en el predio. De los resultados informados se calculó un CO_{2eq} de 16.3 kg CO_{2eq} /m³ de chip, asociando este valor principalmente a las etapas de poda y raleo,

por la utilización de maquinarias y vehículos lo que se condice con lo descrito por otros autores, (Morales et al., 2015; Prado, 2015).

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Evaluar ambientalmente con enfoque de ciclo de vida el proceso productivo de pulpa blanqueada de celulosa a partir de eucaliptus en Chile.

4.2. Objetivos específicos

- 4.2.1. Comprender la metodología de evaluación de ciclo de vida aplicada al sistema-producto estudiado.
- 4.2.2. Analizar los procesos productivos de pulpa de celulosa de fibra corta blanqueada en Chile desde la perspectiva de flujo de materiales y ciclo de vida.
- 4.2.3. Evaluar comparativamente el desempeño ambiental de los procesos productivos de la pulpa blanqueada a partir de fibra corta en Chile.

5. METODOLOGÍA

5.1. Generalidades: Para la realización una evaluación de ciclo de vida se necesita aplicar los requisitos de las normas ISO 14040-44:2012 (NCh-ISO, 2012a; NCh-ISO, 2012b).

5.2. Bases de datos y software

5.2.1. Bases de datos:

- a) MMA (2021). Emisiones al aire: Fuentes puntuales 2017. Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes.
- b) SAG (2021). Lista de plaguicidas con autorización. Servicio Agrícola y Ganadero.
- c) Energía Abierta (2021). Generación bruta mensual de matriz energética chilena. Comisión Nacional de Energía.
- d) SEIA. (2009). *Optimización Operacional de Planta Santa Fe - Línea 2*. Declaración de Impacto Ambiental, Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental, Evaluación ambiental, Concepción.
- e) Morales, M., Aroca, G., Rubilar, R., Acuña, E., Mola-Yudego, B., & González-García, S. (2015). Cradle-to-gate life cycle assessment of Eucalyptus globulus short rotation plantations in Chile. *Journal of Cleaner Production*.

5.2.2. Software:

- a) PRé (2014). *SimaPro8* (V2).[Software]. Pre-Consultants. <https://simapro.com/>
- b) Biblioteca Ecoinvent 3 alojada en SimaPro8, con análisis de impacto de punto medio ReCiPe 2016 Midpoint (E) V1.03/Word (2010).

5.3. Definición del objetivo y el alcance.

5.3.1. **Objetivo del estudio:** Evaluar los potenciales impactos ambientales involucrados en la elaboración de pulpa de celulosa blanqueada en la industria chilena.

5.3.2. **Alcance:** El estudio consideró todos los subsistemas que se involucran en la obtención de celulosa desde la cuna a la puerta de la planta de pulpaje. Consideró el subsistema silvícola el que involucra la etapa de vivero, establecimiento del cultivo, manejo forestal y la cosecha. Como etapa intermedia se consideró el transporte, y el el subsistema de pulpaje Kraft con cada una de sus etapas. Se excluye del estudio los posibles usos que se le puede dar a esta celulosa, y el transporte involucrado desde la planta de celulosa a otras plantas.

5.3.3. Unidad funcional: Para la etapa silvícola se consideró la producción de biomasa en 1 hectárea de *Eucalyptus globulus*. Para la etapa de pulpaje, se considera 1 tonelada de pulpa de celulosa blanqueada.

5.3.4. Límites del Sistema: El sistema estudiado comprende desde la cuna hasta la puerta de la planta, para la producción de una tonelada de celulosa blanqueada a través del proceso Kraft. En cada etapa se consideraron las adquisiciones de insumos, las entradas al sistema de materias primas, uso de energías, transporte, entre otras, como a su vez los efluentes, las emisiones al aire y residuos sólidos producidos en el proceso productivo.

5.3.5. Requisitos de calidad de los datos

5.3.5.1. *Cobertura temporal y fuente de datos*: El inventario del subsistema silvícola, se realizó a partir de los inventarios publicados (Morales, et al., 2015), complementando con reportes sectoriales (INFOR, 2005; INFOR, 2009; Corvalán & Hernández, 2012; Dropplemann, et al., 2019). Por otra parte, para el subsistema industrial, se utilizaron los datos disponibles publicados por la empresa CMPC Santa Fe (SEIA, 2009). Los datos de emisiones fueron recabados por lo publicado por el Ministerio de Medio ambiente (MMA, 2021). Los datos recabados por este último fueron los reportados en el año 2017 y con el fin de eliminar eventuales sesgos, se comparó con los datos publicados en 2009, 2018, verificando que los valores se encuentren en rango. De igual manera para complementar los datos de inventario, se realizó por medio de balance de materia el cálculo de emisiones de CO₂ fósil, la capacidad de captura de plantaciones forestales y rendimiento de biomasa de las plantaciones (Ver Anexo D ,Anexo E ,Anexo H).

5.3.5.2. *Cobertura geográfica*: Se consideró una planta ubicada en la Región del Biobío a unos 105 km al sureste de la Ciudad de Concepción y 501 km de la región Metropolitana. Se considera que los predios forestales se encuentran a 100 km a la redonda de la empresa de Celulosa y 150 km la distancia del traslado de insumos.

5.3.5.3. *Exactitud de los datos*: los datos del proceso Kraft son primarios, ya que son representativos de la operación de la planta. Los datos de las emisiones también son primarios y son obtenidos del sistema Nacional de Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RECT) donde cada planta reporta sus emisiones al sistema del Ministerio de Medio Ambiente. Los datos asociados a la etapa silvícola son representativos al proceso utilizado para la producción de celulosa,

asumiendo las suposiciones y consideraciones reportadas por Morales, et al., (2015). Con los datos obtenidos, normalizar los datos que permiten que el ECV sea representativo.

5.3.6. Suposiciones: Los principales supuestos utilizados son resumidos en la Tabla 3. En general se considerada uno de los subsistemas como una “caja negra”, 350 días/año corresponden a la operación normal, ya que se consideran 15 días de mantención de planta.

5.4. Análisis de inventario de Ciclo de Vida

5.4.1. Generalidades: El análisis de inventario implica la recopilación de datos y los procedimientos de cálculos para cuantificar las entradas y salidas de un sistema de producto. El proceso de análisis se considera de carácter iterativo, por lo cual requirió de diversas revisiones.

5.4.2. Recopilación de datos: Con la obtención de los datos recabados en las fuentes enunciadas en 5.4.2, éstos se clasificaron en entradas tanto de energía como de materias primas, producto y coproducto y emisiones al agua, aire y suelo.

Tabla 3: Suposiciones por subsistemas para la elaboración del ECV (Elaboración propia).

Subsistema silvícola	Subsistema Industrial
<ul style="list-style-type: none"> • Se considera un establecimiento de 552 plántulas en predio forestal, considerando una pérdida del 20% de ellas en el proceso. • Se consideró un rendimiento anual para Eucaliptus Globulus de 25 m³/há y para Eucaliptus nitens de 37,5 m³/há. • Se consideró como tiempo de cosecha los 13,5 años. • Se consideró un rendimiento máscico de 310 ton ssc/há. (Ver Anexo D) valor mínimo posible de producción en una hectárea. 	<ul style="list-style-type: none"> • No se Incluyó la etapa de construcción y desmontaje de la infraestructura de las plantas de pulpaje • No se consideran los efectos en el paisaje y comunidad colindante asociados al solo hecho de tener la planta en dicha ubicación. • No se consideran los impactos asociados al ruido proveniente de las diferentes maquinarias del proceso. • No se consideran los residuos domésticos de las empresas, asociadas a casinos o baños utilizados por trabajadores.

-
- Se consideró como CO₂ capturado del ambiente 240 tCO₂/há (Ver Anexo E).
 - Para efectos de las entradas y salidas del proceso, se ingresaron los usos de todas las maquinarias involucradas, las que contiene la cantidad de combustible, requerida en la operación (Ver Anexo F).
 - Se utilizó como herbicida el glifosato, como fertilizante el fosfato diamonio y un fertilizante ternario con K₂O, como fungicida el dicloropromeno genérico y como insecticida piretroides no especificados (SAG, 2021).
 - El esparcidor utilizado fue “Esparcidor de guano manual”.
 - No se consideró el consumo de agua de la plantación forestal.
 - Se consideran 70 km de distancia entre el predio forestal y el almacenamiento de insumos.
 - No se considera el movimiento interno de camionetas, autos y maquinarias, ni el transporte asociado a la llegada y salida de los trabajadores de la planta.
 - Respecto a la obtención de agua de proceso y descarga de efluente a cuerpos de aguas, no se consideran los efectos de las bombas de extracción o de empuje, ni los posibles efectos asociados a la mantención de dichas tuberías.
 - No se consideran los trabajos realizados en las paradas de planta.
 - Las emisiones por la quema de biomasa se consideran CO₂ biogénico. La tasa de captación de las plantaciones de eucaliptus se asume constante (González-García, et al., 2009; Lopes, et al. 2002, Kuparinen, 2019).
 - Se considera 1 tonelada de CO₂ biogénico por tonelada de biomasa quemada
 - La matriz energética utilizada, es la correspondiente a la matriz existente en el país en 2016 (Ver anexo G)

Transporte

- Se considera distancia de transporte de madera entre predio forestal y planta de producción de 100 km.
 - Se considera distancia del transporte de insumos de 150 km. Se considera todo el transporte en camiones.
 - Se considera para todo tipo de transporte, camiones de tecnología Euro 3.
-

5.4.3. Cálculo de datos: Los datos de proceso se validaron a través de balance de materia, particularmente para CO₂ fósil (Ver Anexo H) y biogénico. De igual forma se calculó el CO₂ capturado por hectárea de plantación forestal (Ver Anexo E). Asimismo, los consumos de insumos químicos y combustibles se validaron con

datos de la literatura (Morales, et al., 2015; González-García, et al., 2009; Zaror, 2005; González, 1998). El análisis de los datos y los resultados respecto a las diferentes categorías de impactos, fueron realizados por medio del Software SimaPro 8, utilizando la biblioteca Ecoinvent 3 como fuente de datos, y a través el método de impacto de punto medio ReCiPe 2016 Midpoint (E) V1.03/Word (2010). Se utiliza la evaluación de punto medio ya que este permite identificar mejor la intervención ambiental, permitiendo que los modelos de cálculo se ajusten mejor a aquella intervención, lo que tiene como resultado una información más detallada de los efectos en el medio (Antón, 2004).

5.5. Evaluación de impacto e interpretación del ciclo de vida

Los resultados se reportan según las categorías de impacto: Potencial de Calentamiento Global (PCG), Potencial de Acidificación (PA), Potencial de eutrofización de agua dulce (PEAD), Potencial de eutrofización marina (PEM), Ecotoxicidad terrestre (ET), Ecotoxicidad de agua dulce (EAD), Formación de ozono Troposférico -Salud Humana (FOTH), Formación de ozono Troposférico-Ecosistemas (FOTE). Las categorías antes mencionadas, tienen un impacto en tanto en la salud humana como en los ecosistemas. Las categorías PCG y FOTH tiene efectos en la salud humana, puesto que tienen un impacto final en la nutrición de las personas, disponibilidad de agua y en el incremento de enfermedades, en especial respiratorias. En el caso del PA, PEAD, PEM, ET, EAD, FOTE e incluso el PCG tienen un efecto en los ecosistemas ya que se ven afectadas especies de agua dulce, especies marinas y terrestres (Ecoinvent, 2015).

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan los resultados del inventario de ciclo de vida y de la evaluación ambiental de la producción de una tonelada de celulosa fibra corta blanqueada en proceso Kraft, representativo de la industria chilena. Los resultados y sus respectivos análisis serán presentados por cada subsistema del proceso, finalizando con un análisis comparativo de ambos.

6.1. Balances de materia y energía

6.1.1. Subsistema silvícola.

Considerándose los límites comprendidos en este subsistema (desde 3.1 y 3.2.1) y a partir de la recopilación de datos en las fuentes antes señaladas (5.4.2), se realizó un balance de materia y energía aplicado al sistema silvícola. Estos datos, fueron parametrizados, para llevarlos a una producción de 310 ton de madera de eucaliptus globulus, el cual es equivalente al producto de una hectárea cosechada.

De la Tabla 4 es posible identificar que, en el subsistema silvícola, las entradas son de 3 tipos: fertilizantes-biocidas, maquinaria-transporte y entradas desde la naturaleza. Respecto a los fertilizantes el más utilizado es el fosfato de diamonio (300 kg/há), el cual contiene una gran concentración de nitrógeno y fósforo. El fertilizante ternario, es otro de los insumos químicos utilizados en esta etapa, el cual contiene nitrógeno, fosforo y potasio, lo que lo clasifica como fertilizante complejo siendo de origen industrial y/o proveniente de reacciones químicas sintéticas (BioGes, 2019). La utilización de estos fertilizantes, más los requerimientos de herbicidas y fungicidas, al ser aplicados en los predios generan emisiones asociadas principalmente a N y P, tal como se muestra en las salidas. Dentro de los gases es posible identificar Óxidos de Nitrógenos (NO_x), que contribuyen a la generación de lluvia ácida y posteriormente de acidificar los terrenos. El amoníaco (NH_3) gas, que no contribuye al efecto invernadero, tiene el potencial de transformarse en un precursor del N_2O y el NO los cuales debilitan la atmósfera y pueden caer al suelo en forma de HNO_3 componente de la lluvia ácida, o a través de la lixiviación de nitratos puede llegar a cuerpos de agua (Garzón & Cárdenas, 2013).

Tabla 4: Entrada/Salida de recursos subsistema silvícola para la producción de una hectárea de terreno forestal plantado con eucaliptus (Elaboración propia).

Entradas			Salidas		
Parámetros	Unidad	Valor	Parámetro	Unidad	Valor
Desde la naturaleza			Emisiones al Aire		
Corteza de pino	dm ³	1324,8	N ₂ O	kg	9,3
Agua de Rio	l	596,2	NO ₂	kg	7,23x10 ⁻³
CO ₂ , del aire	ton	240	N ₂	kg	27,13
Desde la tecnósfera			NO _x	kg	15,50
Poliestireno expandido	kg	3,5 x10 ⁻⁵	NH ₃	kg	22,86
Urea	kg	0,02	Emisiones al suelo		
Fungicida (Thiram)	kg	8,310 ⁻⁵	PO ₄ ⁻³	kg	2,8x10 ⁻³
Fertilizantes ternarios	kg	32	Emisiones al agua		
Fosfato de diamonio	kg	300	NO ₃ ⁻	kg	585,13
Herbicidas (Glifosato)	kg	6,33	PO ₄ ⁻³	kg	4,65
Tractor con pala frontal	kg	30810	Producto		
Motosierra	hr	7,73	Madera pulpable	ton	310
Montacarga forestal	hr	47,2			
Retroexcavadora	hr	6,79			
Camión 3,5-7,5 ton	tkm	48			

Respecto a la utilización de maquinaria, tal como se explicó en 3.2.1, ésta es necesaria en las diversas etapas. En Tabla 4 no se declaran los consumos directos de combustibles que permiten su funcionamiento, ya que al considerar la operación de estas maquinarias desde base de datos, se incluye por arrastre el respectivo requerimiento de combustible y sus emisiones según corresponda las horas de funcionamiento de dicha máquina. De igual forma en Anexo F es posible ver la relación etapa de proceso, maquinaria, consumo de combustible, horas de trabajo por hectárea de terreno. En cuanto a las entradas de la naturaleza, resulta importante resaltar la captura de CO₂ del ambiente, lo que permite hacer frente al cambio climático. Según cálculos a partir de bibliografía la captura de CO₂ en una plantación de eucaliptus promedio es del orden de 240 tonCO₂/há (ver Anexo E). En el caso del agua utilizada sólo se consideró el agua

utilizada en la etapa de vivero, quedando fuera del análisis el agua utilizada por la plantación de eucalipto para el crecimiento por no contar con datos representativos de la realidad nacional.

6.1.2. Subsistema Industrial.

Se consideran límites del subsistema según se describe desde 3.1 y 3.2.2. incluyendo el transporte de madera desde el predio forestal hasta la planta como también el transporte de insumos. A partir de la recopilación de datos en las fuentes antes señaladas (5.4.2), se realizó un balance de materia y energía aplicado al subsistema industrial. Estos datos, fueron parametrizados, para llevarlos a una producción de 1 ton de celulosa blanqueada Kraft de eucalipto. De la Tabla 5 es posible identificar las entradas y salidas del sistema. Las entradas pueden ser divididas en 5 grupos: Materias primas y agua, insumos químicos, combustibles fósiles, biomasa y transporte.

Respecto a las materias primas fundamentalmente son 2: agua y trozas de madera. En el caso del agua, la industria de la celulosa realiza un uso intensivo del agua, siendo la tercera industria a nivel mundial en cuanto a extracción de agua dulce. Según literatura los volúmenes de descarga fluctúan entre los 30 y los 90 m³/ton celulosa blanqueada (Pokhrel & Viraraghavan, 2004; Zaror, 2005; Carrasco G.; 2015). Como se observa en Tabla 5, el uso de agua en la industria chilena se encuentra dentro de los rangos. En cuanto a la madera pulpable, se requieren 2,6 ton madera/ton celulosa promedio. Respecto a los combustibles fósiles, estos son utilizados en el horno, calderas y equipos móviles dentro de la planta. De la combustión de éstos se generan emisiones de CO₂ fósil, principal gas de efecto invernadero. Según el balance de materia y energía se generan 0,119 ton de CO₂ fósil/ton celulosa (ver Anexo H) considerando el proceso desde la cuna a la puerta. Adicionalmente, y dado que uno de los principales requerimientos del proceso es la energía, parte de ésta se produce a partir de la incineración de biomasa y licor negro. El CO₂ generado de esta incineración es CO₂ biogénico, por lo cual se consideran carbono neutral, lo que obliga a diferenciar estas emisiones de las fósiles (Kuparinen, Vakkilainen, & Tynjälä, 2019).

Por otro lado, es fundamental para el proceso el uso de insumos químicos, siendo los más relevantes el H₂SO₄, NaClO₃, O₂ y NaOH (ver Tabla 5) lo cual implica diversas emisiones tanto al aire como al agua. Por último, y muy relevante, es el transporte que se incluye en esta etapa, puesto que se considera el traslado de la madera pulpable desde el predio hasta la planta, así como también el traslado de insumos a planta.

Tabla 5: Entrada/salida de proceso para el subsistema industrial para la fabricación de pulpa de celulosa blanqueada de eucaliptus (Elaboración propia).

Entradas			Salidas		
Parámetros	Unidad	Valor	Parámetro	Unidad	Valor
Madera pulpable	ton	2,6	Emisiones al Aire		
Agua de rio	m ³	36,13	CO ₂ fósil	ton	0,119
Clorato de Sodio	kg	20	CO ₂ biogénico	ton	1,642
Soda Caústica	kg	28	SO ₂	ton	0,0052
Peróxido de Hidrógeno	kg	4	NO _x	ton	0,0019
Oxígeno	kg	22	NH ₃	ton	3,1x10 ⁻⁴
Ácido sulfúrico	kg	22	COV	ton	3,8x10 ⁻⁵
Metanol	kg	2	CO	ton	0,0064
Caliza	kg	12	MP	ton	6,7x10 ⁻⁵
Bisulfito de Sodio	kg	1	MP ₁₀	ton	5,7x10 ⁻⁵
Petróleo pesado (FO6)	kg	36	MP _{2.5}	ton	6,6x10 ⁻⁵
Gas Natural	m ³ N	1,08	Arsénico	ton	2,3x10 ⁻¹²
GLP (hornos y calderas)	kg	1	Emisiones al Agua		
GLP (equipos móviles)	kg	0,882	Aceites y grasas	ton	1,1x10 ⁻⁵
Diesel (eq. Electrónico)	kg	0,001	Aluminio	ton	1,3x10 ⁻⁶
Diesel (equipos móviles)	kg	0,413	Cloruros	ton	6x10 ⁻⁴
Consumo Licor negro	ton	1,43	Cobre	ton	6,7x10 ⁻⁹
Biomasa quemada (seca)	ton	0,784	Fosforo total	ton	4,2x10 ⁻⁵
Biomasa quemada húmeda (Caldera)	ton	1	Hidrocarburos	ton	2,3x10 ⁻⁵
Energía Autogenerada	kWh	500	Hierro	ton	3,3x10 ⁻⁷
Energía comprada al SIC	kWh	100	Fenol	ton	6,0x10 ⁻⁸
Energía autogenerada y vendida al SIC	kWh	50	Manganeso	ton	1,5x10 ⁻⁶
Energía consumida total	kWh	551	Nitrógeno Khjeldal	ton	8,9x10 ⁻⁵

Transporte			Sólidos suspendidos	ton	$3,4 \times 10^{-4}$
Transporte de madera	tkm	520	Sulfatos	ton	$2,3 \times 10^{-3}$
Transporte de insumos	tkm	45	Zinc	ton	$2,0 \times 10^{-8}$
			Arsénico	ton	$4,8 \times 10^{-9}$
			Residuos sólidos		
			Residuos sólidos	m ³	0,103
			Dregs, grits, purga de caldera	m ³	0,042
			Lodos de tratamientos	de m ³	0,038
			Cenizas y escorias	m ³	0,023
			Productos		
			Celulosa	ton	1
			Energía	kWh	50

6.2. Análisis de inventario

6.2.1. Subsistema Silvícola.

Como resultado de la simulación realizada a partir de los datos recabados y expuesto en Tabla 4, es posible obtener el inventario de ciclo de vida según se muestra en Tabla 6. Es relevante resaltar como principal insumo los combustibles extraídos desde la naturaleza, los que están relacionados con la operación de las maquinarias necesarias en esta etapa, así como también en la producción de fertilizantes y biocidas. La principal emisión al aire generada en el ciclo hasta esta etapa es el CO₂ de origen fósil, principal gas de efecto invernadero producto de la combustión de combustibles fósiles. En el inventario se separan las emisiones de CO₂ fósil de las biogénicas, siendo estas últimas 100 veces menor a las primeras, lo cual permite identificar que los combustibles renovables, como la biomasa, se han utilizado minoritariamente. Las principales emisiones tanto al agua como al suelo son producto de la fertilización y la aplicación de biocidas. En el caso del de los sulfatos, que son la principal emisión al agua, son generados por la ampliación de funguicidas generando la acidificación de los cuerpos de agua y en el caso

de las emisiones al suelo, las principales emisiones son de nitratos y fosfatos, provenientes de la aplicación de biocidas y fertilizantes.

Tabla 6: Inventario de ciclo de vida para subsistema silvícola, par 1 tonelada de troza pulpable (Elaboración propia).

Recursos naturales	Cantidad	Unidad	Emisiones al suelo	Cantidad	Unidad
Petróleo crudo	2,95	kg	NO ₃	1,E-04	kg
Gas natural	0,903	m ³	PO ₄	2,E-05	kg
Carbón	0,544	kg			
Emisiones al aire	Cantidad	Unidad	Emisiones al agua	Cantidad	Unidad
CO ₂ fósil	10,4	kg	SO ₄ ²⁻	0,321	kg
CO ₂ Biogénico	0,08	kg	NO ₂	7,21E-07	kg
N ₂ O	0,03	kg	NO ₃ ⁻	0,00189	kg
NO _x	0,121	kg	DBO	0,0315	kg
SO ₂	3,E-02	kg	DQO	0,0332	kg
MP ₁₀	6,E-03	kg			
MP _{2,5}	6,E-03	kg			

6.2.2. Subsistema Industrial.

Tal como en el inciso anterior, se obtiene inventario de ciclo de vida para la etapa industrial (ver Tabla 7). Los principales insumos desde la naturaleza son los combustibles fósiles (petróleo crudo y carbón), con consumos entre 22 y 140 veces el consumo de la etapa silvícola-forestal. El incremento se debe a que el combustible reportado en esta etapa incluye el de la etapa anterior en su respectiva proporción, además del combustible utilizado en las calderas y hornos del proceso industrial, en el transporte troza pulpable, en la producción de insumos químicos, entre otros. Es también relevante resaltar que dentro de la cadena de valor existen procesos que consumen de carbón, por lo que es necesario identificar que procesos en específico son los principales contribuyentes. Este aumento en el consumo de combustibles también se ve reflejado en las emisiones de CO₂ fósiles, las cuales aumentan de 10 kg/ton de troza a 400 kg/ton de celulosa. Este aumento no sólo está asociado a la quema de combustibles fósiles, sino que también está vinculado a la caustificación donde la caliza se calcina emitiendo CO₂ de origen fósil, para convertir el licor verde en licor blanco reconstituido. Respecto a las emisiones

al aire, la principal es el CO₂ biogénico el cual es casi 3 veces superior las emisiones fósiles. Esta emisión está asociada directamente a la incineración de biomasa para la generación de calor y electricidad. No obstante, metodológicamente (ver 6.1.2) estas emisiones se consideran neutras, por lo cual no tendrá influencia en los resultados según categoría de impacto. En este mismo sentido, las emisiones de SO₂ presentan un incremento de 2 órdenes de magnitud con respecto a la etapa silvícola, relacionadas con la quema del combustible fósil en las diversas etapas del ciclo (indirectas) y por las emisiones generadas en equipos de la planta de proceso. En el caso de las principales descargas al agua, corresponden a SO₄⁻ y NO₃⁻ las cuales se generan en las etapas de deslignificación, lavado y blanqueo.

Tabla 7: Inventario de ciclo de vida para subsistema Industrial, por 1 tonelada de celulosa blanqueada de eucaliptus (Elaboración propia).

Insumos	Cantidad	Unidad	Emisiones al suelo	Cantidad	Unidad
Petróleo crudo	66,5	kg	NO ₃	2E-06	kg
Gas natural	29	m ³	PO ₄	9E-05	kg
Carbón	77,4	kg			
Emisiones al aire	Cantidad	Unidad	Emisiones al agua	Cantidad	Unidad
CO ₂ fósil	410	kg	SO ₄ ⁻	11,9	kg
CO ₂ biogénico	1.620	kg	NO ₂	2E-04	kg
N ₂ O	0,086	kg	NO ₃ ⁻	5,04	kg
NO _x	1,25	kg	DBO	0,705	kg
SO ₂	6,22	kg	DQO	0,856	kg
MP ₁₀	0,057	kg			
MP _{2,5}	0,934	kg			

6.3. Cálculo e interpretación de los impactos.

6.3.1. Subsistema silvícola.

En la Figura 5 se describe la contribución porcentual de tres tipos de actividades del proceso: i) crecimiento forestal (etapas 3.2.1), ii) insumos (producción de poliestireno, urea, glifosato, pesticida, insecticida, fosfato diamónico y fertilizante terciario) y iii) maquinaria (fabricación y operación del montacargas, esparcidor, retroexcavadora, camión de bajo tonelaje y la motosierra). De estos resultados se observa que el crecimiento forestal es de los principales

contribuyentes en 4 de las 8 categorías de impacto (PCG, PA, PEAD y PEM) con al menos un 44,6% del total de la categoría. Le sigue el uso de maquinarias el cual se refleja en el aporte a FOTE, FOTH y ET, con al menos un 53,8% de los aportes. Finalmente, la producción de insumos aporta con un 63,6% a la categoría de EAD y un 42,2% a ET, las cuales son sus principales impactos. Las contribuciones en detalle de las actividades de esta etapa se encuentra descrito en Anexo I.

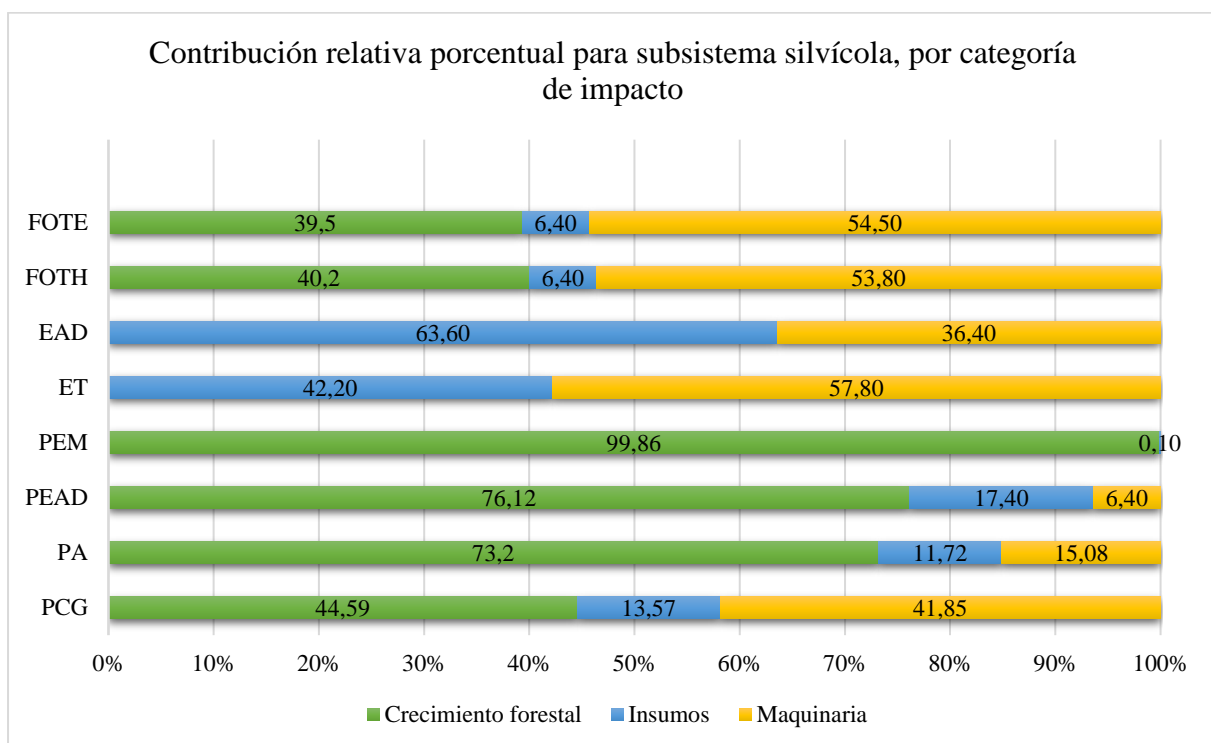


Figura 5: Contribución relativa porcentual para la etapa silvícola (Elaboración propia).

A continuación, se presentan los resultados por cada una de las categorías de impacto para la etapa silvícola.

6.3.1.1. *Potencial de calentamiento global (PCG)*: para esta etapa alcanzó 20,05 kg CO_{2eq}/tonelada de troza pulpable (Ver Anexo I). El resultado es superior a lo obtenido por Morales et al. (2018), lo cual se produce por la diferencia metodológica de los límites del sistema evaluado. Morales calcula exclusivamente las emisiones a partir de la quema de combustibles fósiles, mientras que en este trabajo se ha considerado toda la carga ambiental de la maquinaria desde su fabricación, transporte y uso.

De los resultados obtenidos, es relevante destacar que el 65% del total de PCG se encuentra asociado a la generación de fertilizantes y el proceso de obtención de

combustibles fósiles, ambos necesarios para la producción silvícola-forestal en sus diversas etapas. El 45% de impacto restante está asociado al proceso producción silvícola-forestal, donde se ve involucrada la quema de combustibles fósiles para el funcionamiento de la maquinaria utilizada para la apertura y mantención de caminos, poda, raleo y la cosecha (Morales, et al. 2015; CONAF, 2013). También la aplicación de diversos fertilizantes nitrogenados, que producto de procesos bioquímicos inherentes al ciclo del N (nitrificación y desnitrificación), aportan con emisiones fugitivas de N_2O (óxido nitroso) el cual es un gas de efecto invernadero de larga vida y con un PCG 298 veces superior al CO_2 (Solomon, et al., 2018; Vallejo, et al., 2013). Es necesario considerar lo anterior al momento de realizar cualquier tipo de análisis, pues las mejoras que pudieran vislumbrarse para disminuir el PCG en esta etapa, no solo deben considerar el reemplazo de maquinaria antigua y poco eficiente, si no también considerar sistemas de monitoreo y control de N, para así aplicar los fertilizantes según la demanda de la plantación forestal (riego de precisión), y reducir la aplicación de fertilizantes nitrogenados en la preparación del sitio, evitando la sobre fertilización de los predios (Vallejo, et al., 2013). Por otro lado, es importante mencionar que las plantaciones forestales son un gran aporte en la mitigación al cambio climático, ya que los árboles al encontrarse en rápido y constante crecimiento son excelentes captadores de carbono el cual queda almacenando en la estructura molecular de la biomasa, tanto en la fibra de celulosa como la de lignina (ver Anexo E). Junto a esto, el establecer plantaciones forestales en suelos degradados tendrá un impacto en la captura y retención de carbono, mejorando la calidad del suelo y aumentando la retención del agua, disminuyendo la pérdida de nutrientes, evitando así la erosión, mejorando la productividad e incrementando los servicios ecosistémicos (Prado, 2015).

6.3.1.2. *Potencial de acidificación (PA)*: el PA alcanzó 0,22 kg SO_{2eq} /tonelada de troza pulpable (ver Anexo I). Del total un 73% del aporte proviene del crecimiento forestal (Figura 5), asociado a la aplicación de fertilizantes y biocidas los cuales, suelen favorecer la acidificación del suelo. El fosfato diamónico, por ejemplo, tiene un efecto residual ácido sobre el suelo. El fertilizante ternario suministra azufre a los cultivos, ya que este se obtiene añadiendo una sal potásica (sulfato) y un abono nitrogenado (Gines & Mariscal-Sancho, 2002). Si a lo anterior

se le suma los efectos de la descomposición de la hojarasca del eucaliptus que genera acidez en el suelo (efectos no medidos en este estudio), es necesario corregir con cierta periodicidad la acidez de éste y así mejorar la disposición de nutrientes y no afectar el crecimiento de los árboles. Para esto es recomendable aplicar CaCO_3 en dosis relativamente bajas cercano a las 2 a 3 ton/ha cada 20 o 30 años, dosis suficiente para contrarrestar la acidez y no provocar efectos adversos en complementariedad de un buen plan de manejo forestal (Prado, 2015; Gines & Mariscal-Sancho, 2002; Espinoza, 1999). Es importante destacar que en este estudio no se han incluido las sustancias emitidas por el árbol mientras se encuentra en crecimiento, por lo tanto, se esperaría que, al incluirlas, los efectos de la acidificación aumenten. En el caso de la maquinaria, el montacarga es un gran aportante a esta categoría, puesto que éste tiene un alto consumo de combustible y existe una relación directa entre el porcentaje de azufre contenido en el combustible y las emisiones de dióxido de azufre generadas (EPA, 2010). Las demás maquinarias utilizadas en el proceso también son aportantes en esta categoría, pero en una menor medida. En el caso de los insumos el principal aportante al PA es el fosfato diamónico, utilizado como fertilizante, el cual arrastra una carga ambiental considerable como resultado de su proceso de producción (Anexo J).

6.3.1.3. *Potencial de Eutrofización de Agua Dulce (PEAD), Potencial de Eutrofización Marina (PEM), Ecotoxicidad Terrestre (ET), Ecotoxicidad Agua Dulce (EAD)*: El PEAD alcanzó 0,007 kg P_{eq} /ton troza pulpable; el PEM alcanzó 0,12 kg N_{eq} /ton troza pulpable; ET alcanzó 35,76 kg 1,4-DCB/ton troza pulpable; EAD alcanzó 0,15 kg 1,4-DCB/ton troza pulpable (Ver Anexo I). De la Figura 5 es posible identificar que tanto la ET como EAD no se ven afectados significativamente por el crecimiento forestal. Todos los aportes asociados a estas dos categorías tienen relación con la maquinaria y los insumos requeridos para esta etapa. El aporte de maquinarias está muy relacionado con el montacargas, que contribuye con su fabricación, operación, y los sistemas periféricos como lo es el desgaste de los neumáticos y sistema de frenos (ver 6.3.2.4). Entre los insumos el principal aportante es el fertilizante diamónico, siendo toda su contribución asociada a la fabricación del fertilizante y no como efecto de su aplicación. Si bien las contribuciones de estas categorías se asocian a procesos fuera de los límites directos del estudio, es parte de la responsabilidad empresarial extendida el identificar insumos que tengan el menor impacto en el ambiente (ver Anexo K, Anexo L). Por

otro lado, las categorías de PEAD y PEM son contribuidas principalmente por el crecimiento forestal. El potencial de eutrofización tanto de agua dulce como marina se encuentra principalmente relacionada por la aplicación de fertilizantes y pesticidas. Posterior a cada cosecha como parte de la preparación de los terrenos se aplican grandes cantidades de fertilizantes y pesticidas generando la lixiviación del N y el P a aguas subterráneas, como también por medio de la escorrentía a fuentes de agua dulce superficiales. El manejo responsable de plantaciones forestales debe considerar la evaluación de carga de nutrientes, puesto que los fertilizantes deben ser aplicado de acuerdo con requerimiento y no solo por cumplir un plan de fertilización.

6.3.1.4. *Formación de ozono troposférico-Salud Humana (FOTH), Formación de ozono troposférico-Ecosistemas (FOTE):* FOTH alcanzó fue de 0,124 kg NO_x eq /tonelada de troza pulpable y el FOTE alcanzó 0,126 NO_x eq/tonelada de troza pulpable (ver Anexo I). De los resultados obtenidos es importante resaltar las 2 principales fuentes que generan precursores del ozono troposférico; la maquinaria necesaria y los fertilizantes utilizados. En el caso de la maquinaria, el impacto está asociado a la quema de combustibles fósiles la cual genera CO, COV, NO y NO_x los principales responsables de generar ozono troposférico. En el caso de los fertilizantes producto del mismo ciclo del nitrógeno se generan gases precursores del ozono troposférico. El descuido de esta categoría tiene una relación directa con efecto en la salud de las personas y los ecosistemas, puesto que el ozono troposférico genera la oxidación en células y fluidos que recubren las vías respiratorias tanto de humanos como de animales (Zhang, et al., 2019), alteración en la biodiversidad, al verse mermada la reproducción y el crecimiento de plantas, disminución del crecimiento de los bosques y baja en el rendimiento de cultivos agrícolas (Bermejo, et al., 2009).

6.3.2. Subsistema Industrial

Tal como en la sección anterior, a partir del procesamiento de datos, es posible conocer la carga ambiental para 8 categorías de impacto (5.5). Como se muestra en la Figura 6, todas las entradas y salidas del sistema fueron agrupadas en 6 actividades: i) proceso industrial, que involucra la producción de celulosa blanqueada; ii) insumos, donde se agrupan todos los insumos químicos necesarios en el proceso; iii) transporte, que involucra el traslado de materia prima desde los

predios forestales; iv) materia prima (ver Tabla 3); v) electricidad y vi) combustibles. Como se observa en Figura 6, 3 de las 8 categorías (PA, FOTH y FOTE) el proceso industrial es el que aporta la mayor carga ambiental. Por el contrario, en PEM y ET el aporte del proceso industrial es despreciable. El transporte tiene su principal aporte en ET (77.4%) siendo la única categoría de impacto con una contribución mayoritaria. Los insumos químicos tienen aportes por sobre el 41.3% en PCG, PEAD y EAD.

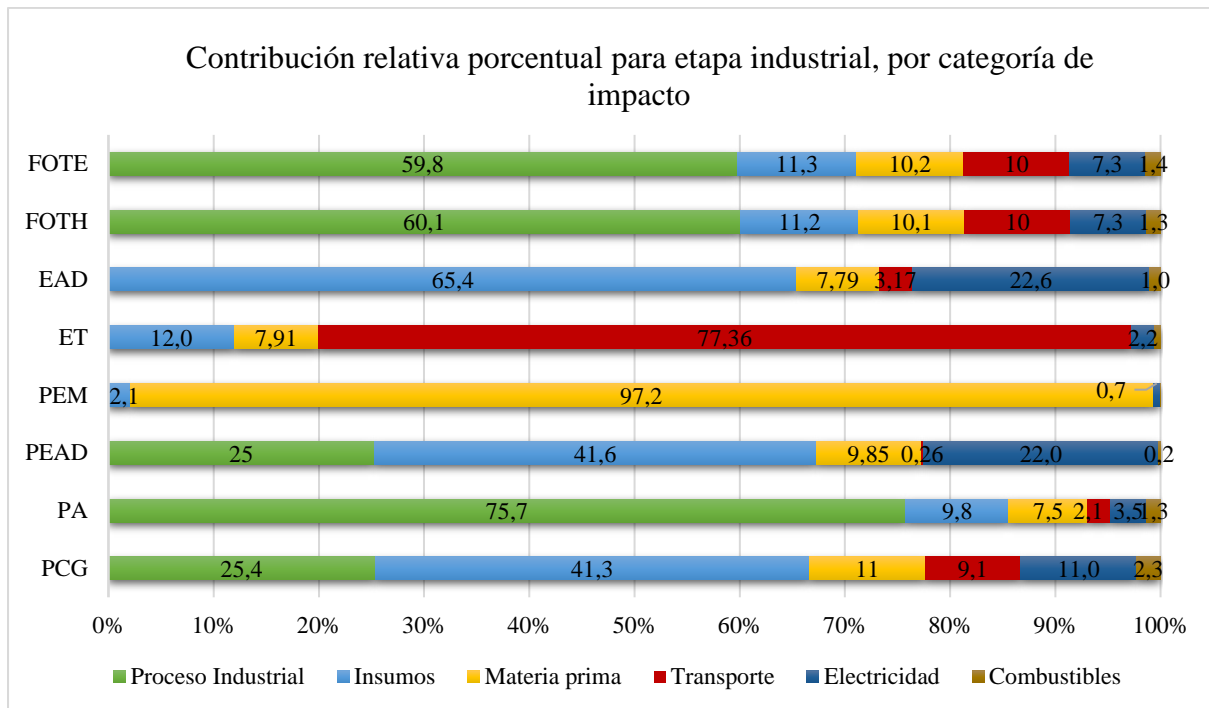


Figura 6: Contribución relativa porcentual para la etapa de producción industrial (Elaboración propia).

A continuación, se presentan los resultados en cada una de las categorías de impacto para la etapa industrial.

6.3.2.1. *Potencial de Calentamiento Global (PCG)*: el resultado del PCG es de 469 kg CO₂eq/tonelada de celulosa (Anexo M). Los principales aportes al PCG están asociados al proceso de producción en un 25% del total, los insumos por sobre un 40%, la generación de la electricidad comprada en un 11% y el transporte para el proceso con un 9%. Insumos como el clorato de sodio demanda grandes cantidades de energía por el proceso basado en electrólisis. Este insumo aporta con un 21,5%, dejando más atrás a otros como el hidróxido de sodio, oxígeno líquido, carbonato de calcio. El proceso productivo de celulosa requiere de gran consumo de energía,

lo que emite flujos de CO₂ producto de la quema de los combustibles fósiles en las fuentes emisoras: caldera recuperadora, caldera de biomasa y el horno de cal. Es relevante resaltar que sobre el 80% de las emisiones de CO₂ proceden de la quema de biomasa residual, por lo cual metodológicamente se considera como emisiones biogénicas o carbono neutral, por lo mismo estas emisiones que se diferenciaron en el inventario (GIZ, 2021; Kuparinen, 2019).

Las emisiones de CO₂ fósiles tienen 2 orígenes en el proceso, por una parte, la combustión de combustibles fósiles que según se detalla (ver Tabla 5), y por otra también, en el proceso de caustificación (ver Anexo H). De la combustión del fuel oil se generan emisiones de CO₂ en casi un 99%, pero también se genera CH₄ y N₂O ambos gases con potencial de calentamiento global, siendo el primero entre 28 y 34 veces superior al CO₂ y el último 298 veces mayor (EPA, 2010).

Según literatura existen diferentes formas de disminuir las emisiones de efecto invernadero o al menos formas gestionárselas, en especial de CO₂. Lopes, et al. (2002), concluyó que el cambio de fuel oil por gas natural, reduce las emisiones totales de CO₂ fósil en un 50%. Este cambio en conjunto a medidas como un transporte moderno que requiera combustibles menos contaminantes o que posean tecnologías que limiten las emisiones, permitiría una disminución de emisiones de CO₂ hasta valores mínimos esperados (Kuparinen, 2019). Por otra parte, Das et al., (2004) muestra que técnicas como el pulpaje mecánico y el bio-pulpaje, que pueden ser consideradas como alternativas al proceso Kraft, no presentan mejores perfiles asociados al PCG. Esto debido a que los dos primeros requieren para su proceso mayor cantidad de energía específica (para la pulpa química se necesitan $1,3 \times 10^4$ MJ/ton celulosa, para la pulpa mecánica $6,03 \times 10^4$ MJ/ton celulosa y en el caso del Biopulpaje $1,4 \times 10^4$ MJ/ton celulosa).

No obstante, la industria de la celulosa tiene el potencial de actuar como sitios de emisiones negativas (inmisiones) de CO₂, a través de la captura, almacenamiento y utilización de ésta como materia prima para otros bioprocesos. Kuparinen, (2019) propone estrategias de pre, post y oxicomustión tales como la absorción química mediante el uso de aminas, la adsorción mediante ciclos de calcio y la oxicomustión aplicada en la caldera recuperadora, siendo la primera de éstas la de mayor madurez para separar el CO₂ de los demás gases producidos. Este CO₂

capturado tendría el potencial de ser utilizado como materia prima de otros bioproductos tal como el aceite de resina (*Tall Oil*) el cual puede ser utilizado como combustible renovable, como acidificador en el proceso de extracción de lignina en reemplazo del ácido sulfúrico, y en el proceso de producción del carbonato de calcio. La rentabilidad de este modelo de negocio en Chile dependería de un plan estratégico, con el fin de acercar la planta de utilización de CO₂ a la planta emisora (GIZ, 2021).

6.3.2.2. *Potencial de Acidificación (PA)*: El resultado de PA para la industrial fue de 7,6 kg SO_{2eq}/tonelada de pulpa blanqueada (ver Anexo M). De los resultados obtenidos (Ver Figura 6) es posible ver que 75% de las contribuciones a esta categoría son productos del proceso industrial. Más atrás, se muestra con un 7,5% las contribuciones del proceso de producción de troza de madera tal como se explicó en 6.3.1.1. Otras de las contribuciones importante son los insumos químicos, donde el proceso de producción del clorato de sodio aporta un 4,4% del total. Así también, la electricidad que aporta con un 3,5% de la carga ambiental total seguida por el transporte con un 2,1%.

Si se comparan estos resultados con los propuestos por la base de datos Ecoinvent 3 *cut-off by classification-unit* (3,44 kg SO_{2eq}/ton celulosa) alojada en el Software SimaPro 8, (2019) (ver Anexo C), por ejemplo, es posible ver que el resultado obtenido es superior al de la biblioteca, pero aun así presentan ordenes de magnitud similares. Esta diferencia se puede dar por el combustible utilizado en los procesos y en transporte, toda vez que este varía su contenido de azufre de acuerdo con su procedencia. Del total de azufre contenido en el combustible, el 95% de éste se transforma en SO₂ (EPA, 2010).

Al estudiar el proceso productivo, la mayor generación de SO₂ se produce en el horno de cal (Donoso, 2008; González-García, et al., 2009, Lopes, et al., 2003). Esto se debe al contenido de azufre del combustible utilizado (fuel oil) y en un grado muy menor a los lodos que se alimentan al horno. Estos lodos son previamente lavados y se recuperan los compuestos que contienen azufre para su reutilización (Donoso, 2008), sin embargo, podrían quedar compuestos azufrados remanentes. En efecto, las emisiones de SO₂ obtenidos de la etapa industrial, son obtenidos de datos primarios, reportados a la autoridad ambiental. Es importante mencionar que

no identifica relación entre la morfología del horno y la generación de óxidos de azufres (EPA, 2010).

Las emisiones de SO₂ pueden generar problemas en la salud de las personas principalmente en personas que sufren asma y bronquitis y los efectos se ven incrementados al combinarse con partículas o humedad del aire (Donoso, 2008). Otro de los efectos de las emisiones de SO₂ es la generación de la lluvia ácida, la cual genera nocivos efectos en los ecosistemas naturales. Según literatura, existen diferentes formas de reducir las emisiones de óxidos de azufres. Lopes (2003), propone el cambio de combustible en el horno de cal de *fuel oil* por gas natural; este cambio puede reducir en cerca de un 75% el PA. Otra manera de reducir las emisiones de azufre, sin hacer cambio del proceso es, a través, de la desulfuración de gases de combustión (FGD, sigla en inglés), utilizando reactivos alcalinos para absorber el SO₂ de los gases de combustión y formar sulfatos de sodio o de calcio. Este proceso puede llegar a un 95% de eficiencia en la eliminación del azufre, minimiza las descargas de éste en aguas residuales y podrían abrir nuevas oportunidades de negocio ya que estos productos son vendibles (EPA, 2010).

6.3.2.3. *Potencial de Eutrofización de agua dulce (PEAD), Potencial de Eutrofización Marina (PEM):* El PEAD arrojó 0,17 kg P_{eq}/ton de celulosa; PEM arrojó 0,34 kg N_{eq}/ton de celulosa (ver Anexo M). Tal como se muestra en la gráfica (Figura 6) el PEAD se ve principalmente motivado por el proceso industrial de celulosa en un 25%, los insumos químicos que representan el 48% de los aportes siendo el proceso productivo del Clorato de sodio el principal aportante con un 25% y la generación de electricidad en un 22% (Anexo N). En el caso del PEM, se encuentra relacionado a la generación de troza en un 97%, (ver 6.3.1.3).

Respecto al proceso industrial, las mayores concentraciones de fósforo se registran a la salida del proceso de caustificación y de los lodos de tratamiento de efluentes primarios y secundarios (Lillo, 2013). Si las descargas de efluentes de la planta contienen altos niveles de fosforo y nitrógeno se generará un crecimiento bacterial y algal que, sumado al vertimiento de materia orgánica, provocará la eutrofización en el cuerpo de agua (Gutiérrez, 2021).

El vertimiento de RILes se encuentra regulado por la legislación nacional, bajo el amparo de la ley 19.300/1994 sobre bases generales del medio ambiente, y el D.S. 90/2000 en específico cuando se trata de cuerpos de agua superficiales (ver Anexo O); por lo cual es responsabilidad de las empresas lograr que sus vertimientos cumplan con dicha legislación. Los tratamientos necesarios para cumplir con la normativa y así disminuir al máximo las repercusiones en el medio acuático receptor más utilizados son los denominados “al final del tubo”, los que han sido bien estudiados y utilizados en las últimas décadas, los que incluyen de tratamiento por etapas: tratamiento primario, secundario y terciario (Ver Anexo P). En el caso específico del P, tratamientos como la precipitación química para la eliminación del P en sus formas inorgánicas es utilizada, reportando rendimientos superiores al 90%. Se requiere de un coagulante, utilizando comúnmente calcio, aluminio y hierro. También existen técnicas de procesos biológicos, en las cuales el P en el influente del agua residual se incorpora a la célula de la biomasa, la cual posteriormente se elimina como resultado de la deposición de lodo (Lenntech, 2022; Gutiérrez, 2021; Zaror, 2005).

6.3.2.4. *Ecotoxicidad Terrestre (ET) y Ecotoxicidad Agua Dulce (EAD):* ET arrojó 1.167 kg 1,4-DCB/ton de celulosa; para la EAD arrojó 5,05 kg 1,4-DCB/ton de celulosa (ver Anexo M). De los resultados obtenidos se observa que la ET se ve principalmente influenciada por el transporte (75%), seguido por los insumos químicos con un 12%. Destaca que el aporte del proceso productivo es prácticamente despreciable. En el caso de EAD, su principal aportante son los insumos químicos, donde el clorato de sodio aporta el 43,1% del total, seguido por la electricidad con un 22,6% y el oxígeno líquido con un 8,6% del total. Al comparar los valores absolutos obtenidos en ET (1.167 kg 1,4-DCB/ton de celulosa) con los obtenidos por la base de dato Ecoinvent (1.4001,4-DCB/ton de celulosa) se puede ver que son de similares ordenes de magnitud, siendo la última levemente superior, lo que permite validar dichos resultados. Este resultado es mil veces superior a lo obtenido por González-García, et al., (2009), dado que en este último caso no se consideró el transporte de las trozas de madera, el cual es el principal aportante en esta categoría. Al identificar que motiva estas emisiones, fue posible constatar que se da por emisiones no salidas del tubo de escape, sino más bien por la abrasión de los neumáticos frenos y el desgaste del pavimento (ver Anexo Q), lo que provoca

emisiones al aire al ras de suelo de partículas de neumático inferiores a los 100 μ m, generando presencia de éstas en el medio inmediatamente receptor. Estos valores son calculados relacionando el peso neto del vehículo y el peso neto de la carga donde existe una relación directa (Ecoinvent, 2015).

En el caso de EAD, dentro de los contribuyentes el principal aporte proviene de la producción de insumos (65,4%). Nuevamente el proceso productivo del clorato de sodio es relevante, aportando a través de los residuos sólidos generados y la energía utilizada en su producción. En el caso de la energía eléctrica, refiriéndose específicamente a la energía producida en Chile, el 99% de las emisiones atribuidas a esta categoría (Anexo R), está asociada a la energía producida por centrales que utilizan carbón (Ecoinvent, 2015).

6.3.2.5. *Formación Ozono troposférico -Salud Humana (FOTH) y Formación ozono troposférico-Ecosistemas (FOTE):* De los resultados obtenidos en la etapa industrial el FOTH arrojó 3,2 kg NO_xeq/ton de celulosa y el FOTE 3,21 kg NO_xeq/ton de celulosa (ver Anexo M).

Tal como se muestra (ver Figura 6) , tanto el FOFH como el FOFE tienen contribuciones equivalentes, y el principal aportante en estas categorías de impacto fue el proceso productivo con 60%, seguido por los insumos químicos (11,3%) donde la producción de clorato de sodio representa el 5,9%, luego le sigue el transporte y la producción de trozas con un 10%. Esta figura permite refrendar lo expuesto en 6.3.1.4, donde se argumenta que la generación de óxidos de nitrógeno está dada principalmente por la combustión tanto en fuentes fijas como en fuentes móviles. Por ello, las actividades intensivas en procesos de combustión son las principales aportantes. Al comparar el resultado con lo obtenido de la base de dato Ecoinvent registrada en Anexo C (3,26 kg NO_xeq/ton de celulosa) el resultado obtenido es equivalente.

En el proceso productivo, la generación de NO_x se da principalmente en la caldera recuperadora influenciado por el contenido de nitrógeno del licor negro y por un exceso de oxígeno en la combustión. En general, para evitar la generación de este gas, se debe tener bajas concentraciones de oxígeno, por lo cual es indispensable mantener controlado este flujo, lo que en la actualidad es simple de realizar

(Donoso, 2008). Otra fuente de emisión es el horno de cal ya que este necesita de combustible para su funcionamiento, el cual contiene nitrógeno y en presencia de aire los niveles de NO_x aumentan (Ríos & Araya, 2012).

Los efectos tanto en la salud humana, como en los ecosistemas fueron mencionados en 6.3.1.4 por lo que el control y abatimiento de NO_x cobran relevancia. Según literatura existen 2 tipos de medidas que permiten reducir las emisiones de NO_x en calderas: las medidas primarias, las cuales buscan incrementar la eficiencia térmica o minimizar las variables que generan NO_x , y las medidas secundarias o de fin de tubo las que buscan transformar las emisiones de NO_x en emisiones inocuas para el medio ambiente (Hoyos, et al., 2008).

Para disminuir las emisiones de NO_x , como medidas primarias se encuentran la optimización del proceso de combustión, bajar contenido de álcalis en el licor consumido y utilización de combustible bajo en nitrógeno. Otras técnicas también primarias incluyen inyección directa de agua en la cámara de combustión, previo a la aplicación de combustible, esto disminuye hasta un 50% las emisiones; recirculación de gases el cual puede disminuir hasta un 20% las emisiones; inyección de agua al aire de admisión, o emulsión de agua directa en el combustible. Además, existen medidas primarias conocidas como quemadores bajo NO_x , el que considera diseño que disminuyen las condiciones que favorecen la formación de este contaminante. Si estos últimos utilizan gas natural como combustible, es posible que las calderas dejen de ser consideradas “gran emisor” (Hoyos, et al., 2008; García, 2018; Oelker, 2022).

Como medida secundaria es posible implementar medidas como la reducción selectiva no catalítica la que puede alcanzar una remoción cercana al 80%, la reducción catalítica selectiva la que puede alcanzar eficiencias de remoción entre un 90 al 98% y las tecnologías de oxidación, utilizando un absorbente (Hoyos, et al., 2008; Ríos & Araya, 2012).

6.4. Comparación proceso global por subsistema.

Después de analizar los impactos por categoría en cada uno de los subsistemas por separado, es preciso comparar las mismas, considerando el aporte relativo de cada etapa en según categoría

de impacto. En la Figura 7 se muestran los aportes relativos por subsistema para cada categoría. Para esta comparación es preciso señalar que, para llevar ambos procesos a una unidad funcional equivalente en el subsistema silvícola-forestal se consideró la biomasa cosechada necesaria para producir dicha tonelada de celulosa (2,6 ton de madera pulpable), y para la etapa industrial se consideró 1 ton de celulosa blanqueada. En Anexo S se presentan los valores específicos de cada categoría.

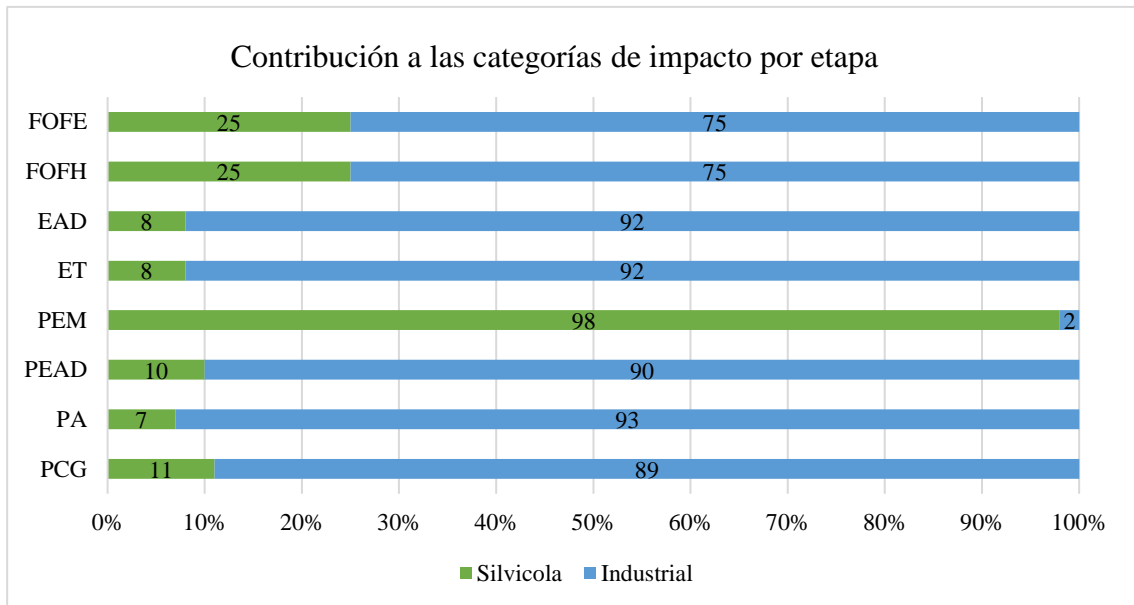


Figura 7: Aporte relativo por etapa de producción para las diversas categorías (Elaboración propia).

De los resultados obtenidos es posible que en las categorías PCG, PA, PEAD, ET, EAD, FOTH, FOTE el principal aportante de carga ambiental es el proceso industrial de celulosa. Solo en la categoría de PEM el mayor peso de carga ambiental (sobre el 95 %) recae en la etapa silvícola, asociado principalmente a la utilización de fertilizantes como se explicó en 6.3.1.3.

Pese a lo anterior, es necesario resaltar que en cada una de las categorías el aporte de la etapa silvícola es significativo. En las categorías de FOTE y FOTH la contribución de la etapa silvícola alcanza el 25%, y en ninguna categoría baja de 8%. En PCG la contribución de la etapa silvícola alcanzó el 11% del total de carga ambiental.

Cuando se analizan las principales causas de las contribuciones es cada etapa, en el caso de la etapa silvícola, es posible identificar dos principales contribuyentes que tributan en cada una de las categorías. Por un lado, los fertilizantes, y biocidas necesarios para lograr una producción

óptima, generan diversas externalidades tanto en la salud humana como en los ecosistemas al ser aplicados en los predios, y éstos a su vez, ya cuentan con una carga ambiental como consecuencia de su proceso de producción. Por otro lado, y tal como lo describe Morales, et al., (2015) o Pinilla (2011) se generan muchas externalidades ambientales en la generación y mantención de caminos, en la poda y raleo, puesto que en éstas se requiere de maquinaria que utiliza combustible fósil teniendo efecto sobre el PCG, pero también en el PA puesto que hay una relación directa entre el contenido de azufre del combustible y la generación de SO₂. Adicionalmente el montacargas, retroexcavadoras y tractores, generan partículas por desgaste de neumáticos y frenos que contribuyen fuertemente a categorías como ET, junto a la carga ambiental que traen desde su fabricación.

La etapa industrial es la que genera mayor contribución en las categorías de impacto con excepción del PEM. Tanto la literatura (Sánchez, 2017; OIT, 2012; EPA, 1995; González-García, et al., 2009; Kuparinen, et al., 2019), como los resultados obtenidos muestran que las mayores externalidades se producen en la caldera recuperadora y el horno de cal por las diversas emisiones que emiten al aire, tal como se explicó anteriormente. El tipo de combustible que se utilice en estos equipos tiene una estrecha relación con las emisiones generadas y por lo tanto con las externalidades provocadas (Lopes, et al., 2002). No menos importante es el aporte del transporte en las diversas categorías, siendo altamente notorio en la categoría ET, donde la contribución es determinante superando el 75%. Existen otros contribuyentes importantes como los insumos químicos utilizados en el proceso tal como el clorato de sodio, hidróxido de sodio, oxígeno líquido y otros, con procesos de producción intensivos en el uso de recursos desde la naturaleza y la tecnósfera. Por último, la electricidad utilizada es un aportante relevante a cada una de las categorías de impacto, siendo fundamental en el proceso industrial, y sus externalidades radican plenamente en las fuentes energéticas que utiliza la matriz.

7. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y LIMITACIONES

A partir de lo obtenido de este estudio es posible caracterizar la importancia de la industria forestal y de celulosa en Chile, particularmente en las regiones comprendidas desde el Maule hasta los Ríos. En estas regiones la contribución al PIB de la industria forestal y de celulosa es fundamental, llegando incluso al 60% en el caso de Biobío.

Incorporando los datos de proceso a los balances de materia y energía fue posible obtener resultados para el inventario y por categoría de impacto. A través de ellos es posible comparar los resultados con procesos reportados en países como España o Portugal, permitiendo evidenciar que la tecnología chilena en el proceso industrial de celulosa blanqueada Kraft para fibra corta es similar a dichos países, puesto que los resultados son consistentes en magnitud. Sin embargo, se identifican oportunidades de mejoras respecto a lo realizan países como Noruega o Finlandia, lo que permitiría transformar la industria de la celulosa chilena en sitios de emisiones negativas y así contribuir de manera permanente al enfrentamiento del cambio climático. Un asunto importante para considerar al momento de tomar decisiones es el impacto que tiene el transporte utilizado, puesto que éste trae consecuencias en cada una de las categorías de impacto, principalmente en la ET y los efectos en el PCG.

Al enfocarse en la etapa silvícola, es importante remarcar que la industria forestal presenta desafíos como la evaluación periódica de requerimiento de N y otros nutrientes que permitan la aplicación de fertilizantes de acuerdo con el requerimiento específico del predio. De esta forma se pueden disminuir las externalidades que provoca en el PCG, ya que se disminuiría la emisión de gases de efecto invernaderos como el N_2O , o los efectos en el PEAD y PEM producto de la eutrofización. El uso de maquinaria en la etapa silvícola es también una gran fuente de emisiones, contribuyendo a diferentes categorías de impacto por lo que el recambio por tecnologías más modernas y con requerimientos de combustibles menos contaminantes, ayudaría a mitigar estas externalidades. Por otro lado, las plantaciones forestales de rápido crecimiento como lo es una plantación de Eucaliptus es una muy buena herramienta de captación de CO_2 , sin embargo, es necesario asegurar que esa captura quede almacenada permanentemente en productos de larga vida útil.

El presente estudio deja abiertas diversas puertas de investigación asociado a esta industria, tal como el considerar una siguiente etapa de productiva, ya sea de la industria primaria b o industria secundaria, u otras líneas de producción. Junto a lo anterior, un área que debe ser investigada y que complementaria a este trabajo, es el consumo de agua de plantaciones forestales, en especial plantaciones de Eucaliptus y los efectos que esto trae en el ecosistema y

en las comunidades aledañas, de manera de implementar medidas de mitigación apropiadas o desestimar mitos que pudieran existir en la ciudadanía. De igual manera, resulta interesante complementar en la etapa silvícola los efectos de las sustancias emitidas por los árboles de eucaliptus y así tener una aún más completa visualización de los efectos en el suelo por AT.

Sin lugar a dudas, las mayores dificultades enfrentadas para la elaboración de este informe es la dificultad de acceder a la información, clara y actualizada, puesto que las fuentes disponibles son escasas y en ocasiones poco claras. Lo anterior debe ser un desafío del Estado, tal que todos los ciudadanos puedan hacer efectivo su derecho a acceder a la información de manera oportuna, incluidos los tomadores de decisiones, a quienes estudios como éste les sirven como antecedentes para mejorar la gestión ambiental integral de la industria de la celulosa y el papel.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Álvarez-Garretón, C., Lara, A., Boisier, J. P., & Galleguillos, M. (2019). The Impacts of Native Forests and Forest Plantations on Water Supply in Chile. *Forests*, 10(6). Recuperado el 13 de octubre de 2021, de <https://www.mdpi.com/1999-4907/10/6/473/htm>

Antón V., M. A. (2004). Utilización del Análisis del ciclo de vida en la evaluación del impacto ambiental del cultivo bajo invernadero mediterráneo. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya. doi: <http://hdl.handle.net/10803/6827>

ARAUCO. (2018). Informe de sostenibilidad. Santiago. Recuperado el 13 de octubre de 2021, de https://www.arauco.cl/wp-content/uploads/2017/07/REPORTE_ARAUCO_2018.pdf.

Barrera. (2018). Celulosa chilena: Avances y perspectivas de su comercio exterior. ODEPA. Santiago: Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. Recuperado el 13 de octubre de 2021, de <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2018/01/celulosaFinal.pdf>

Bermejo, V., Alonso del Amo, R., Elvira Cozar, S., Rábago Juan-Aracil, I., & García Vivanco, M. (2009). El ozono troposférico y sus efectos en la vegetación. Madrid: Centro de Investigaciones, Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT).

BioGes. (11 de julio de 2019). Bioges. Recuperado el 25 de abril de 2022, de Fertilizantes líquidos ternarios para plantas: ¿cómo elegir?: <https://www.bioges.it/es/2019/07/11/concimi-ternari-liquididi-per-le-piante-come-scegliere-segui-bioges-it/>

Boeykens, S. (2006). Procesos para la producción de papel y pulpa: De la naturaleza a la mesa. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires. Recuperado el 20 de octubre de 2021, de http://repositorioubas.sisbi.uba.ar/gsd/collect/encruce/index/assoc/HWA_416.dir/416.PDF

Cardemil Winkler, M. (2021). Industria forestal en Chile. Valparaíso: Biblioteca del Congreso Nacional. Recuperado el 12 de octubre de 2021, de https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/32419/1/N_68_21_Industria_Forestal_en_Chile.pdf

Carrasco G., G. R. (2015). Reúso de efluentes de celulosa Kraft, en la producción aeropónica de *Ililium asiático*, como planta ornamental. Concepción: Universidad de Concepción. Recuperado el 28 de abril de 2022, de <http://www.eula.cl/giba/wp-content/uploads/2017/09/tesis-guido-carrasco-2015.pdf>.

Centro UC. (2017). Impactos y Adaptación al cambio climático en Chile. Recuperado el 8 de noviembre de 2021, de Cambio global. Centro UC: <https://cambioglobal.uc.cl/comunicacion-y-recursos/impactos-y-adaptacion-al-cambio-climatico-en-chile>

CMPC. (2018). Reporte integrado 2018. Santiago. Recuperado el 13 de octubre de 2021, de CMPC. (2018). Reporte Integrado. http://www.argos.co/Media/Default/images/ReporteIntegradoArgos2012_Completo.pdf

CONAF. (2013a). Por un Chile sustentable. Corporación nacional forestal. Santiago: Zig- Zag. Recuperado el 2021 de octubre de 2021, de https://www.conaf.cl/wp-content/files_mf/1382992046CONAFporunChileForestalSustentable.pdf.

CONAF. (2013b). Guía de buenas prácticas para plantaciones forestales de pequeños y medianos propietarios. Santiago. Recuperado el 20 de octubre de 2021, de https://www.conaf.cl/wp-content/files_mf/1386687876guiabuenaspracticass_ppf.pdf.

Das, T., & Houtman, C. (2004). Evaluating chemical-, mechanical-, and bio-pulping processes and their sustainability characterization using life cycle assessment. Wiley InterScience. Recuperado el 30 de noviembre de 2021, de <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/38599>

Droppelmann, F., Grosse, H., & Laroze, A. (2019). Contribución de los bosques nativos y plantados a la mitigación de los impactos del cambio climático en Chile en un contexto de desarrollo sustentable. Ciencia e investigación forestal. INFOR. Recuperado el 3 de noviembre de 2021, de <https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/29182>

ECOTEC. (2017). Antecedentes para la regulación de olores en Chile. Santiago: ECOTEC Ingeniería Ltda. Recuperado el 25 de octubre de 2021, de <https://olores.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2019/03/ECOTEC-Ingenieria.pdf>

Ecoinvent. (2015). Ecoinvent database for studies and assessments based on ISO 14040 and 14044.

EPA. (1990). Chemical Wood Pulping. Final Section. United States. Environmental Protection agency. Recuperado el 15 de noviembre de 2021, de <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-fifth-edition-volume-i-chapter-10-wood-products-0>

EPA. (2010). AP 42, Fifth Edition, Volume I Chapter 1: External Combustion Sources. United States Environmental Protection Agency. Recuperado el 10 de noviembre de 2021, de <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-fifth-edition-volume-i-chapter-1-external-0>

Espinosa, J. (1999). Acidez y encalado de los suelos. San José: International Plant Nutrition Institute. Recuperado el 27 de febrero de 2022, de <http://www.cia.ucr.ac.cr/pdf/libros/Acidez%20y%20encalado%20de%20suelos,%20libro%20por%20J%20Espinosa%20y%20E%20Molina.pdf>

FAO. (5 de noviembre de 2021). Forestry Production and Trade. Obtenido de FAOSTAT: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>

Fernández. R., P., & Araya A., J. (julio de 2012). Tecnologías de reducción de emisiones de NOx. Caso: Uso sistema de Reducción Catalítica Selectiva (SCR). Recuperado el 5 de abril de 2022, de Better: <https://better.cl/tecnologias-de-reduccion-de-emisiones-de-nox-caso-uso-sistema-de-reduccion-catalitica-selectiva-scr/>

Fuenzalida, M., & Quiroz, R. (2012). La dimensión espacial de los conflictos ambientales en Chile. *Polis, Revista latinoamericana*, 11(31). Recuperado el 13 de octubre de 2021, de https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-65682012000100009&script=sci_arttext

García C., A. (2018). *Estudio sobre la reducción de las emisiones de NOx y SOx*. Cantabria: Universidad de Cantabria. Recuperado el 5 de abril de 2022, de <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/15456/Garc%C3%ADa%20Coterillo%2C%20A%C3%ADa.pdf>

Garzón, J., & Cárdenas, E. (2013). Emisiones Antropogénicas de amoniaco, nitratos y óxido nitroso: compuestos nitrogenados que afectan el medio ambiente en el sector agropecuario colombiano. *Med. Vet. Zoor.* Recuperado el 22 de abril de 2022, de <http://www.scielo.org.co/pdf/rfmvz/v60n2/v60n2a06.pdf>.

Ginés, I., & Mariscal-Sancho, I. (2002). *Incidencia de los fertilizantes sobre el pH del suelo*. Madrid: Fertiberia S.A. Recuperado el 5 de mayo de 2022, de https://oa.upm.es/3176/2/MARISCAL_MONO_2002_01.pdf.

GIZ. (2021). *Análisis de la captura de carbono para la producción de combustibles sintéticos en Chile*. Santiago: GIZ, INODÚ Chile energy&sustainability. Recuperado el 20 de enero de 2022, de https://www.energypartnership.cl/fileadmin/user_upload/chile/media_elements/Studies/20210818_Carbon_Capture_Resumen_ejecutivo.pdf

González, P., Parra, O., Zaror, C., & Vesovic, V. (1998). Life cycle inventory analysis of bleached kraft cellulose production from pinewood and eucalyptus in Chile. *Transactions on Ecology and the Environment*. Recuperado el 24 de marzo de 2022, de <https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/ENVMAN98/ENVMAN98011FU.pdf>

González, P., Vega, M., & Zaror, C. (enero de 2011). Life cycle inventory of pine and eucalyptus cellulose production in Chile: Effect of process modifications. Concepción, Chile: Universidad de Concepción. Recuperado el 24 de marzo de 2022, de https://www.researchgate.net/publication/226764144_Life_Cycle_Inventory_of_Pine_and_Eucalyptus_Cellulose_Production_in_Chile_Effect_of_Process_Modifications

González-García, S., Hospido, A., Moreira, M., Romero, J., & Feijoo, G. (2009). Environmental impact assessment of total chlorine free pulp from Eucalyptus globulus in Spain. *Journal of Cleaner Production*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.02.017>

Gutiérrez M., P. (2022). *Análisis de las brechas normativas y tecnológica de la industria de celulosa en la cuenca del Biobío, en el contexto de los potenciales impactos de sus efluentes líquidos en los ecosistemas acuáticos*. Concepción: Universidad de Concepción. Recuperado el 5 de marzo de 2022, de <http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/9344>

Hoyos Barreto, A., Jiménez Correa, M., Ortiz Muñoz, A., & Montes de Correa, C. (2008). Cement plant gaseous pollutant emission reduction technologies. *Ingeniería e investigación*. Recuperado el 30 de marzo de 2022, de <https://www.redalyc.org/pdf/643/64328306.pdf>

INFOR. (2005). El sector forestal chileno en una mirada. *Estadísticas forestales*, 64. Recuperado el 2 de noviembre de 2021, de <https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/3>

INFOR. (2015). Anuario forestal. *Boletín Estadístico*. Recuperado el 19 de octubre de 2021, de <https://wef.infor.cl/>

INFOR. (2018). Anuario forestal. *Boletín Estadístico* (163). Recuperado el 2021 de octubre de 2021, de <https://wef.infor.cl/publicaciones/anuario/2018/Anuario2018.pdf>

INFOR. (2020). Anuario forestal. *Boletín Estadístico* (174). Recuperado el 5 de noviembre de 2021, de <https://wef.infor.cl/publicaciones/anuario/2020/Anuario2020.pdf>

Jaimovich, D., & Toledo, F. (2020). The grievances of a failed reform: Chilean land reform and conflict with indigenous communities. Recuperado el 13 de octubre de 2021, de https://www.researchgate.net/publication/345339333_The_grievances_of_a_failed_reform_Chilean_land_reform_and_conflict_with_indigenous_communities/link/5fa41769299bf10f73253338/download

Kuparinen, K., Vakkilainen, E., & Tynjälä, T. (2019). Biomass-based carbon capture and utilization in kraft pulp mills. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. doi:<https://doi.org/10.1007/s11027-018-9833-9>

Lenntech. (2022). *Eliminación del fósforo del agua residual*. Recuperado el 2 de abril de 2022, de Lenntech: <https://www.lenntech.es/eliminacion-del-fosforo>

Lillo Lagos, F. E. (2013). *Estimar el balance de fósforo en el proceso de fabricación de celulosa de fibra corta: evaluación de la carga de fósforo aportado al río Biobío*. Concepción: Universidad de Concepción. Recuperado el 5 de marzo de 2022, de <http://www.eula.cl/giba/wp-content/uploads/2017/09/tesis-felipe-lillo-2013.pdf>.

Lima, J. L. (2016). *Estudio de caracterización de la cadena de producción y comercialización de la industria forestal: estructuras, agentes y prácticas*. Santiago: Oficina de Estudios y Políticas Agrarias del Ministerio de Agricultura. Recuperado el 19 de octubre de 2021, de <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2017/12/InformeIndustriaForestal2016.pdf>

Lopes, E., Dias, A., Arroja, L., Capela, I., & Ferreira, F. (2003). Application of life cycle assessment to the Portuguese pulp and paper industry. *Journal of Cleaner Production*. Recuperado el 26 de noviembre de 2021, de https://www.academia.edu/10740476/Application_of_life_cycle_assessment_to_the_Portuguese_pulp_and_paper_industry

MMA. (2021). *Registro de emisiones y transferencia de contaminantes*. Obtenido de RETC open data: <http://datosretc.mma.gob.cl/group>

Morales, M., Aroca, G., Rubilar, R., Acuña, E., Mola-Yudego, B., & González- García, S. (2015). Cradle-to-gate life cycle assessment of Eucalyptus globulus short rotation plantations in Chile. *Journal of Cleaner Production*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.085>

NCh-ISO 14040. (2012). Gestión Ambiental- Evaluación del Ciclo de vida- Principios y Estructura.

NCh-ISO 14044. (2012). Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Requisitos y directrices

Oelker B., A. (2022). *Quemadores de Bajo NOx para calderas*. Santiago: Thermal Engineering. Recuperado el 5 de abril de 2022, de http://www.thermal.cl/docs/articulos_tecnicos/articulo___reduccion_nox_en_calderas.pdf

OIT. (2012). *El Trabajo Decente en la Industria Forestal en Chile*. Santiago: Organización Internacional del Trabajo. Recuperado el 13 de octubre de 2021, de https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---americas/---ro-lima/---sro-santiago/documents/publication/wcms_206093.pdf

OLCA. (1 julio 2021). *Chile: formulan cargos por infracciones graves contra celulosa CMPC tras intoxicar a la población de Nacimiento*. Recuperado el 15 de octubre de 2021, de observatorio Latinoamericano de conflictos ambientales: <https://olca.cl/articulo/nota.php?id=108007>

Pérez, T. (4 de febrero de 2007). *Impacto de las plantaciones de eucaliptus en el suelo*. Recuperado el 1 de marzo de 2022, de Grupo Guayubira: <http://www.guayubira.org.uy/2007/02/impacto-de-las-plantaciones-de-eucaliptos-en-el-suelo/>

Pinilla, J. C. (2011). *Manejo y Rendimiento de plantaciones*. Instituto Forestal. Recuperado el 2 de marzo de 2022, de <https://bibliotecadigital.infor.cl/bitstream/20.500.12220/7741/2/15438-2.pdf>.

Pokhrel, D., & Viraraghavan, T. (2004). Treatment of Pulp and Paper Mill Wastewater—A Review. *Science of the Total Environment*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.05.017>

Prado D., J. A. (2019). *Plantaciones Forestales. Más allá de los Árboles*. Recuperado el 20 de febrero de 2021, de <https://cifag.cl/wp-content/uploads/2019/04/Libro-plantaciones.pdf>

Queiroz-Sperotto. (2018). La formación de paraísos de contaminación: un estudio de caso de la producción de celulosa en el Cono Sur. *EURE*, 44(132). Recuperado el 15 de octubre de 2020, de https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0250-71612018000200213&lang=pt#aff1

SAG (2021). Lista de plaguicidas con autorización. Servicio Agrícola y Ganadero. Recuperado el 10 octubre de 2021 de: <https://www.sag.gob.cl/content/lista-de-plaguicidas-autorizados-0>

Sánchez, C. (2017). *Optimización del nivel de inventarios de pulpa de celulosa en el proceso productivo*. Santiago: Universidad de Chile. Recuperado el 25 de octubre de 2021, de <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/148342/Optimizacion-del-nivel-de-inventarios-de-pulpa-de-celulosa-en-el-proceso-productivo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

SEIA. (2009). *Optimización Operacional de Planta Santa Fe - Línea 2*. Declaración de Impacto Ambiental, Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental, Evaluación ambiental, Concepción. Recuperado el junio de 2021, de https://seia.sea.gob.cl/expediente/expedientesEvaluacion.php?modo=ficha&id_expediente=4193511

SimaPro. (2020). *SimaPro Database Manual. Methods Library*. California. Recuperado el 30 de marzo de 2022, de <https://simapro.com/wp-content/uploads/2020/06/DatabaseManualMethods.pdf>

Vallejos García, A., Ábalos Rodríguez, D., Téllez del Río, Á., & Guardia, G. (2013). Fertilización y N₂O. Implicaciones en la huella de carbono. *Agricultura Revista Agropecuaria*. Recuperado el 25 de febrero de 2022, de <https://oa.upm.es/26295/>

Zaror, C. (2005). *Introducción a la ingeniería ambiental para la industria de procesos*. Concepción: Universidad de Concepción.

Zhang, J., Wei, Y., & Fang, Z. (2019). Ozone Pollution: A Major Health Hazard Worldwide. *Front Immunol*. doi: 10.3389/fimmu.2019.02518

ANEXOS**Anexo A Plantaciones de bosque nativo, forestal y bosque mixto por región.**

Tabla 8: Bosque nativo, plantación forestal y bosque mixto. Superficie de bosque, según región. Año 2010 en hectáreas (CONAF, 2018).

Región	Total	Nativo	Plantaciones	Mixto
Arica y Parinacota	-	-	-	-
Tarapacá	34.275	7.300	26.975	-
Antofagasta	3.411	-	3.411	-
Atacama	-	-	-	-
Coquimbo	34.309	31.266	2.937	106
Valparaíso	170.778	106.376	64.189	213
O'Higgins	306.067	185.313	119.7560	998
Maule	1.011.827	384.714	607.594	19.519
Biobío	2.052.982	768.553	1.227.788	56.642
Araucanía	1.538.4520	937.312	572.188	28.952
Los Ríos	1.040.156	849.771	179.5450	10.840
Los Lagos	2.795.921	2.736.333	54.223	5.365
Aysén	4.823.555	4.815.532	7.109	914
Magallanes	2.671.6150	2.671.592	23	-
Metropolitana	112.024	105.549	23	-
Total	16.595.372	13.599.610	2.872.007	123.754

Anexo B Capacidad instalada por tipo de celulosa, segregada por planta.

Tabla 9: Evolución de la capacidad instalada para la producción de celulosa en toneladas, por tipo, región, empresa y año. Periodo 2013-2015 (Lima, 2018).

Tipo de Celulosa	Región	Empresa	Toneladas 2013	Toneladas 2014	Toneladas 2015
Mecánica	Maule	CMPC	360.000	360.000	380.000
Mecánica	Biobío	Bío Bío	125.000	125.000	125.000
Mecánica	Biobío	CMPC	195.000	0	0
Mecánica	Los Lagos	CMPC	70.000	70.000	70.000
Química	Maule	Celco	495.000	495.000	505.000
Química	Bío Bío	Celco	1.820.000	1.820.000	1.860.000
Química	Bío Bío	CMPC	1.850.000	1.850.000	1.830.000
Química	Araucanía	CMPC	500.000	500.000	500.000
Química	Los Ríos	Celco	550.000	550.000	550.000
Total			5.965.000	5.770.000	5.820.000

Anexo C Evaluación de ciclo de vida de producción de celulosa libre de cloro elemental (ECF) (Ecoinvent, 2015).

La simulación se realizó a partir de la base de datos Ecoinvent 3 cut-off by classification- unit alojada en el Software SimaPro 8, (2019).

Tabla 10: Resultados de ECV para producción de celulosa libre de cloro elemental (ECF) (Ecoinvent, 2015).

Categoría de impacto	Unidad	Cantidad
Calentamiento Global	kg CO _{2eq}	626
Agotamiento del Ozono	kg CFC11 _{eq}	0,000315
Radiación ionizante	kBq CO-60 _{eq}	30,2
Formación Ozono troposférico, Salud Humana	kg NO _x _{eq}	3,26
Formación de partículas finas	kg PM _{2,5} _{eq}	1,79
Formación Ozono troposférico, Ecosistemas	kg NO _x _{eq}	3,3
Acidificación Terrestre	kg SO _{2eq}	3,44
Eutrofización de agua dulce	kg N _{2eq}	0,175
Eutrofización de agua marina	kg P _{eq}	0,0176
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DCB	1400
Ecotoxicidad de agua dulce	kg 1,4-DCB	11,4
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DCB	16,3
Toxicidad cancerígena humana	kg 1,4-DCB	26,8
Toxicidad no cancerígena humana	kg 1,4-DCB	440
Uso de tierra	m ² crop _{eq}	1660
Escasez de recursos minerales	kg Cu _{eq}	0,29
Escasez de recursos fósiles	kg oil _{eq}	164
Consumo de agua	m ³	31

Anexo D Cálculo de rendimiento forestal.

Consideraciones:

Distribución en la plantación de eucaliptus en Chile (INFOR, 2005)

Eucaliptus globulus: 70%

Eucaliptus Nitens: 30%

Crecimiento anual (Pinilla, 2011)

Eucaliptus globulus: 20-30 m³/ha/año (25 m³/ha/año promedio)

Eucaliptus Nitens: 30-45 m³/ha/año (37,5 m³/ha/año promedio)

Factor de conversión 0,8 ton/m³ssc al 60% de humedad

Tiempo de cosecha: 13,5 años

Cálculo de rendimiento por hectárea

$$25 \text{ m}^3 * 0,7 + 37,5 * 0,3 = 28.75 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año} \blacksquare$$

$$28,75 * 13,5 = 388,125 \text{ m}^3/\text{ha}$$

$$388,125 * 0,8 = 310 \text{ ton}/\text{ha}$$

Anexo E Cálculo de captura de CO₂ de plantaciones forestales de Eucaliptus.

Consideraciones:

Distribución en la plantación de eucaliptus en Chile (INFOR, 2005)

Eucaliptus globulus: 70%

Eucaliptus Nitens: 30%

Captura de CO₂ por hectárea según especie de eucaliptus en rotación de 13 años (Dropplemann, et al., 2019).

Eucaliptus globulus: 200 tCO₂/ha

Eucaliptus Nitens: 332 tCO₂/ha

Cálculo de captación

$$\frac{tCO_2}{ha} = 200 * 0,7 + 332 * 0,3 = 239,6 \approx 240$$

Anexo F Operaciones forestales, maquinaria utilizada, característica de la maquinaria, combustible e insumos utilizados por etapa.

Tabla 11: Secuencia en el sistema de producción de trozas de eucalipto en evaluación basado en prácticas reales realizadas en Chile (Elaboración propia a partir de lo publicado por Morales et al., 2022).

Fase	Operación	Acción	Maquinaria	Potencia (kW)	peso (kg)	h/ha	Fuel cons. (L/há año)	Insumos
0	Preparación del terreno	Preparar suelo	Tractor	205	9357			
			Pala			4250	5	5,4
1	Establecimiento de la Plantación	Apl. Herbicida	Esparcidor		4,3	12	0	3,5 l/ha Glifosato
		Plantación						
		Apl. Herbicida Fertilización	Esparcidor Manual	0	4,3	12	0	3,5 l/ha Glifosato 32 k/ha fertilizante ternario
2	1 ciclo	Apl. Herbicida Fertilización	Esparcidor Manual	0	4,3	12	0	2 l/ha Glifosato 100 kg/ha fertilizante ternario
		Tala	Motosierra	3,4	5,6	28	0,8	
		Cargador y transporte	montacargas	125	12000	11,8	14,5	
2	2 ciclo	Apl. Herbicida Fertilización	Esparcidor Manual	0	4,3	12	0	2 l/ha Glifosato 100 kg/ha fertilizante ternario
		Tala	Motosierra	3,4	5,6	28	0,8	
		Cargador y transporte	montacargas	125	12000	11,8	14,5	
2	3 ciclo	Apl. Herbicida Fertilización	Esparcidor Manual	0	4,3	12	0	2 l/ha Glifosato 100 kg/ha fertilizante ternario
		Tala	Motosierra	3,4	5,6	28	0,8	

		Cargador y montacargas		125	12000	11,8	14,5
3	Eliminación de tocones		Retroexcavadora	119	20000	6,5	15,1
4	Establecimiento de Infraestructura	Construcción de camino	de Tractor-Pala	205	10287	1,7	15
		Mantenimiento de camino	de Tractor-Pala	205	10287	0,6	14
		Construcción de camino	de Retroexcavadora	119	20000	0,23	15
		Mantenimiento de camino	de Retroexcavadora	119	20000	0,06	14

Anexo G Matriz energética 2016

La matriz energética asociada al año 2016 en Chile, se calculó a partir de las bases de datos entregadas por www.energiaabierta.cl, promediando la generación bruta mensual en cada uno de los ítems.

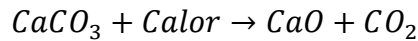
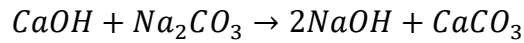
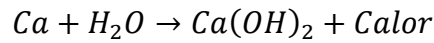
Tabla 12: Matriz energética chilena en el año 2016 (Elaboración propia)

Composición de la matriz	Producción promedio (MWh)	%
Biomasa	198922,39	3,2
Carbón	2442040,74	38,8
Eólica	297330,658	4,7
Gas Natural	954927,509	15,2
Geotérmica	17811,7558	0,3
Hidráulica de embalse	908831,319	14,4
Hidráulica de pasada	866209,058	13,8
Minihidráulica	153661,239	2,4
Petróleo Diesel	25466,5042	0,4
Fotovoltaica	426561,472	6,8
Total	6291762,65	100,0

Anexo H Cálculo CO₂ de origen fósil

Cálculo de emisión de CO₂ de caldera recuperadora.

Se consideran las siguientes reacciones:



Datos para considerar:

Caliza (Tabla 4)
12kg/ ton celulosa

Peso molar $CaCO_3$
100 kg/kmol

Peso molar CO_2
44 kg/kmol

Cálculo de moles de $CaCO_3$

$$mol_{CaCO_3} = \frac{12kg}{100kg/kmol} = 0,12 \text{ mol } CaCO_3$$

Por relación estequiométrica 1 mol de $CaCO_3$ es a CO_2 por lo tanto:

$$kg_{CO_2} = 44 \frac{kg}{kmol} * 0,12_{kmol} = 5,28_{kgCO_2/ton}$$

Cálculo de emisiones de CO_2 a partir de combustibles fósiles utilizados.

Combustible	Fuel oil	Gas Natural	Diésel	LPG
% de C	80	75	80	82
Inventario entrada	36 kg	1,08 (m ³)	0,5 kg	1,882 kg
Densidad		0,743 kg/m ³ N		

$$\text{Fuel oil} = 36 * 0,8 * \frac{44}{12} = 105,6 \text{ kgCO}_2/\text{ton}$$

$$\text{Diesel} = 0,5 * 0,8 * \frac{44}{12} = 0,9 \text{ kgCO}_2/\text{ton}$$

$$\text{LPG} = 1,882 * 0,8 * \frac{44}{12} = 5,5 \text{ kgCO}_2/\text{ton}$$

$$\text{Gas Natural} = 1,08 * 0,743 * 0,8 * \frac{44}{12} = 2,35 \text{ kgCO}_2/\text{ton}$$

Total CO_2 de origen fósil:

$$\frac{\text{kgCO}_2}{\text{ton}} = 5,28 + 105,6 + 0,9 + 5,5 + 2,35 = 119,63$$

Anexo I Resultados nominales por categoría de impacto para etapa silvícola.

Tabla 13: Resultados nominales por categoría de impacto para etapa silvícola (Elaboración propia).

Categoría de impacto	Unidad	Total	Tozas	Poliestireno	Urea	Glifosato	Montacarga	Esparcidor	Retroexcavadora
PCG	kg CO2 eq	20,052	8,94	4,1,E-06	1,9,E-04	2,3,E-01	6,71	2,7,E-05	1,44
FOFH	kg NOx eq	0,124	5,0,E-02	6,4,E-09	1,9,E-07	4,5,E-04	5,5,E-02	3,5,E-07	9,5,E-03
FOFE	kg NOx eq	0,127	5,0,E-02	7,0,E-09	1,9,E-07	4,6,E-04	5,6,E-02	3,5,E-07	9,6,E-03
PA	kg SO2 eq	0,222	1,6,E-01	9,7,E-09	8,8,E-07	8,1,E-04	2,8,E-02	1,6,E-07	4,9,E-03
PEAD	kg P eq	0,007	5,0,E-03	1,2,E-10	1,3,E-08	3,1,E-04	4,0,E-04	2,2,E-10	1,4,E-05
PEM	kg N eq	0,127	1,3,E-01	0	6,4,E-09	2,1,E-05	3,1,E-05	0	2,6,E-06
ET	kg 1,4-DCB	35,762	0	1,2,E-06	7,0,E-04	3,6,E-01	1,9,E+01	2,8,E-05	1,08
EAD	kg 1,4-DCB	0,152	0	1,8,E-08	5,2,E-07	3,6,E-03	5,4,E-02	1,9,E-08	8,9,E-04

Continuación tabla 13

Categoría de impacto	Unidad	Camión baja tonelaje	Pesticida	Insecticida	Motosierra	Fertilizante diamónico	Fertilizante ternario
PCG	kg CO2 eq	6,4,E-02	1,1,E-06	8,8,E-03	1,8,E-01	2,45	2,7,E-02
FOTH	kg NOx eq	4,2,E-04	1,9,E-09	1,5,E-05	2,1,E-03	6,7,E-03	1,6,E-04
FOTE	kg NOx eq	4,2,E-04	2,0,E-09	1,6,E-05	3,2,E-03	6,8,E-03	1,7,E-04
PA	kg SO2 eq	2,2,E-04	3,2,E-09	3,0,E-05	3,9,E-04	2,5,E-02	9,3,E-05
PEAD	kg P eq	6,6,E-07	3,2,E-10	2,0,E-06	6,9,E-06	8,2,E-04	1,1,E-06
PEM	kg N eq	1,2,E-07	0	5,6,E-07	5,3,E-05	7,0,E-05	1,1,E-07
ET	kg 1,4-DCB	6,1,E-01	7,1,E-07	6,6,E-03	9,1,E-02	14,33	4,0,E-01
EAD	kg 1,4-DCB	1,3,E-04	9,6,E-09	7,3,E-05	5,7,E-04	9,3,E-02	9,9,E-05

Anexo J Gráfica de red para Potencial de Acidificación (PA) en etapa silvícola

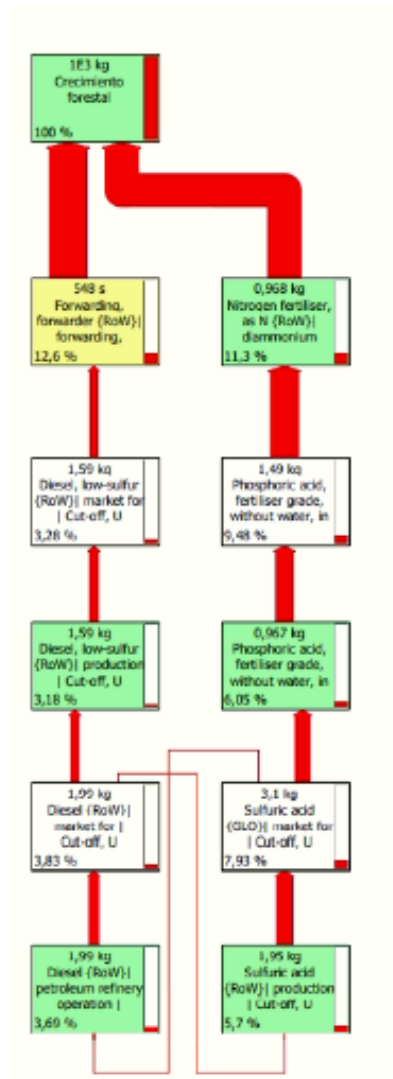


Figura 8: Potencial de Acidificación (PA) etapa silvícola (Elaboración propia).

Anexo K Gráfica de red para Ecotoxicidad Terrestre (ET) en etapa silvícola.

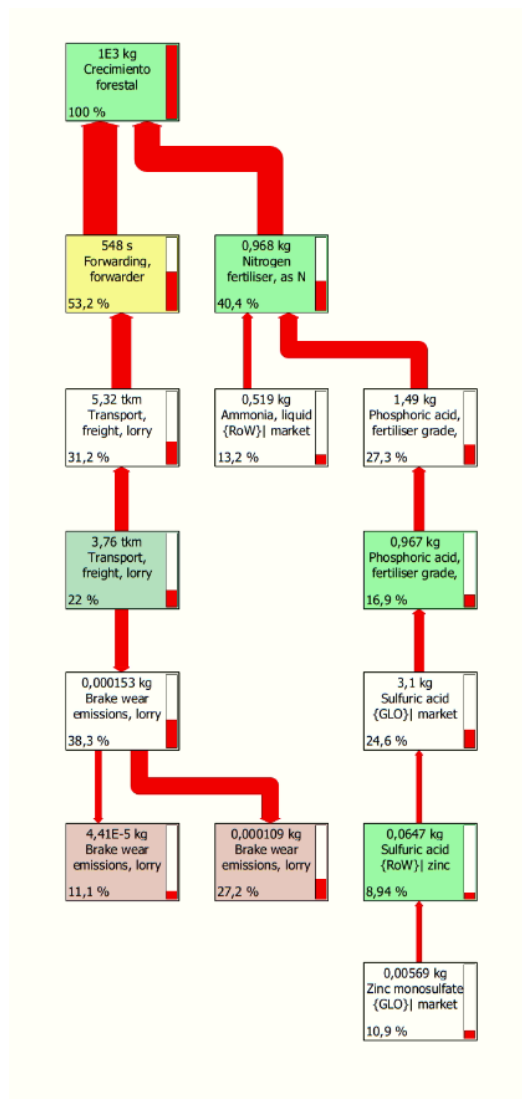


Figura 9: Ecotoxicidad Terrestre (ET) en etapa silvícola (Elaboración propia).

Anexo L Gráfica de red para Ecotoxicidad Agua Dulce (EAD) en etapa silvícola.

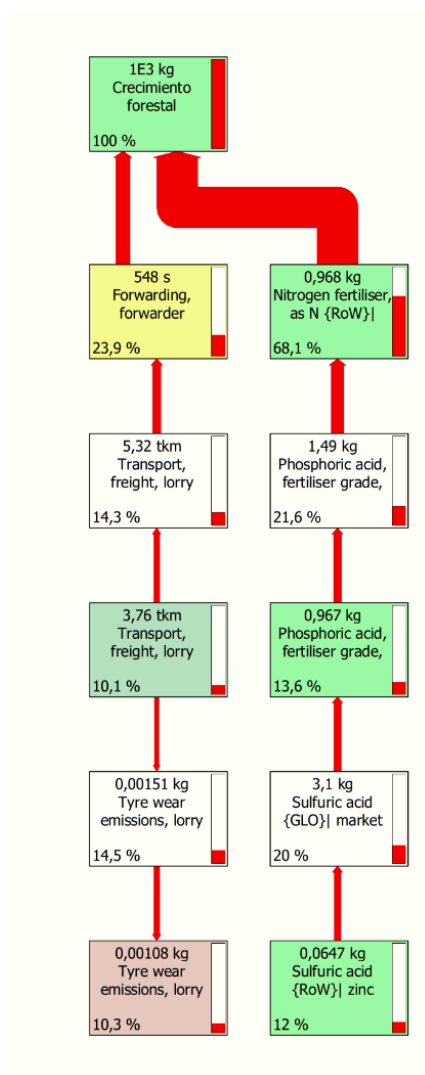


Figura 10: Ecotoxicidad Agua Dulce (EAD) en etapa silvícola (Elaboración propia).

Anexo M Resultados nominales por categoría de impacto para etapa Industrial.

Tabla 14: Resultados nominales por categoría de impacto para etapa industrial (Elaboración propia, 2022).

Categorías	Unidad	Total	proceso productivo celulosa	Clorato de sodio	Hidróxido de sodio	Oxígeno líquido	Peróxido de Hidrogeno	Ácido Sulfúrico	Metanol	Carbonato de Calcio
PCG	kg CO2 eq	468,7987	119,0000	100,8369	34,6090	27,1671	5,7080	1,3868	1,2983	20,0436
PA	kg SO2 eq	7,6697	5,8076	0,3393	0,1220	0,0921	0,0157	0,1425	0,0029	0,0369
PEAD	kg P eq	0,1717	0,0420	0,0428	0,0147	0,0117	0,0013	0,0002	0,0002	0,0031
PEM	kg N eq	0,3393	0,0000	0,0040	0,0015	0,0008	0,0003	0,0000	0,0000	0,0004
ET	kg 1,4-DCB	1167,2605	0,0000	51,2144	24,4431	12,5962	7,0647	1,1607	0,4511	43,1353
EAD	kg 1,4-DCB	5,0561	0,0044	2,1815	0,4353	0,3476	0,1938	0,0198	0,0239	0,1016
FOTH	kg NOx eq	3,1969	1,9200	0,1884	0,0688	0,0508	0,0087	0,0141	0,0019	0,0229
FOTE	kg NOx eq	3,2130	1,9200	0,1895	0,0693	0,0511	0,0092	0,0145	0,0021	0,0232

Continuación tabla 15

Categorías	Unidad	Fuel Oil	Diesel	GLP	GN	Trozas	Transporte	Electricidad
PCG	kg CO2 eq	9,5134	0,1860	1,1077	0,4108	52,0866	42,8771	52,5675
PA	kg SO2 eq	0,0892	0,0017	0,0090	0,0015	0,5770	0,1608	0,2715
PEAD	kg P eq	0,0003	0,0000	0,0001	0,0000	0,0169	0,0004	0,0378
PEM	kg N eq	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,3298	0,0001	0,0023
ET	kg 1,4-DCB	5,2997	0,1774	1,1406	0,0158	92,2754	903,0074	25,2787
EAD	kg 1,4-DCB	0,0449	0,0007	0,0044	0,0020	0,3940	0,1605	1,1416
FOTH	kg NOx eq	0,0399	0,0006	0,0031	0,0007	0,3230	0,3196	0,2344
FOTE	kg NOx eq	0,0434	0,0006	0,0033	0,0008	0,3286	0,3221	0,2354

Anexo N Gráfica de red para Potencial de Eutrofización de agua dulce (PEAD), etapa industrial.

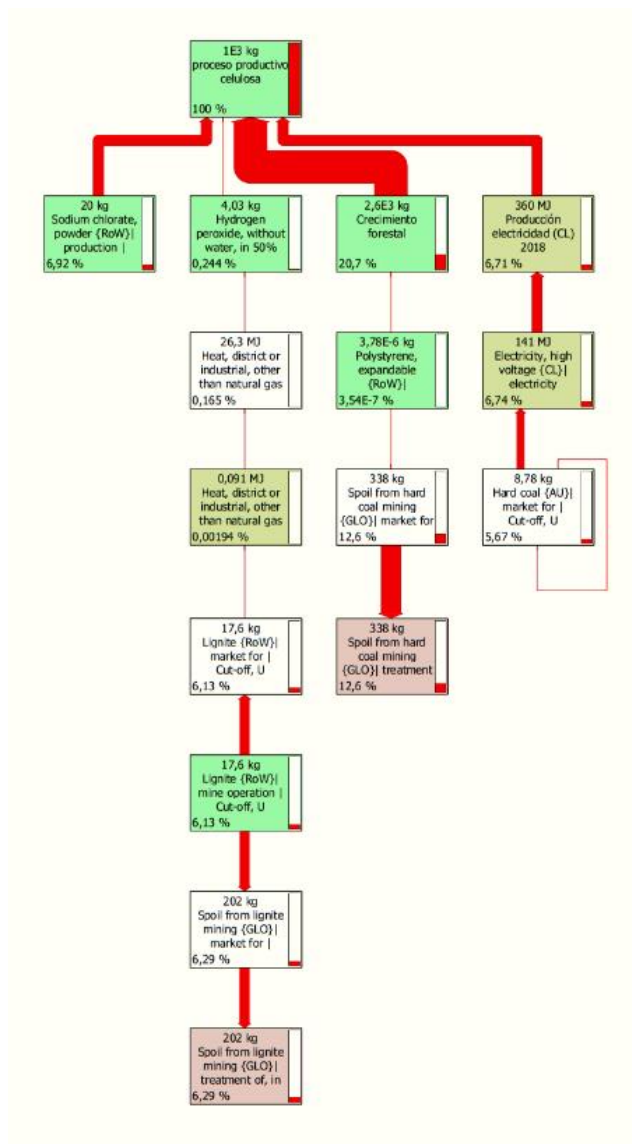


Figura 11: Potencial de Eutrofización de agua dulce (PEAD) (Elaboración propia)

Anexo O Legislación de emisión para descarga de RILes

Tabla 15: Legislación medioambiental para la descarga de RILes (Elaboración propia, según información de la biblioteca del congreso nacional).

N° de Ley	Nombre de ley	Observaciones
Ley 19.300/1994	Ley de Bases generales del Medio Ambiente.	Recoge de forma global e integral las principales temáticas ambientales para ser base de posteriores legislaciones.
Ley 24.417/2010	Modificación de ley 19.300. Reestructuración de estructuras medioambientales.	Crea el Ministerio de Medio Ambiente (MMA), Servicio de Evaluación Ambiental (SEA)
D.S. N° 609/1998 del MOP	Norma de emisión para descarga de RILes Alcantarillado	Establece límites de concentración físico químicos de las descargas emitidas por al fuente emisora.
D.S. N° 90/2001 MINSEGPRES	Norma de emisión para descarga de RILes a aguas marinas y continentales superficiales	Establece límites de concentración físico químicos de las descargas emitidas por fuente emisora.
D.S. N° 46/2002 MINSEGPRES	Norma de emisión para descarga de RILes a aguas subterráneas	Regula las descargas de aguas residuales que se disponen mediante filtración hacia aguas subterráneas.
Si la industria se emplaza en la cuenca del Bío-Bío		
D.S. N° 9/2015 MMA	Norma secundaria de calidad ambiental para la protección de las aguas continentales	Establece Valores de concentraciones y periodos máximos o mínimos permisibles de sustancias que puedan poner en riesgo la protección de los ecosistemas.

	superficiales de la cuenca del río BíoBío	
Instrumento de gestión	Norma Secundaria de Calidad ambiental para la cuenca del río BíoBío (NSCA)	Instrumento de gestión que diagnostica de forma permanente la calidad de aguas a lo largo del río BioBio.

Anexo P Tratamientos típicos de residuos líquidos.

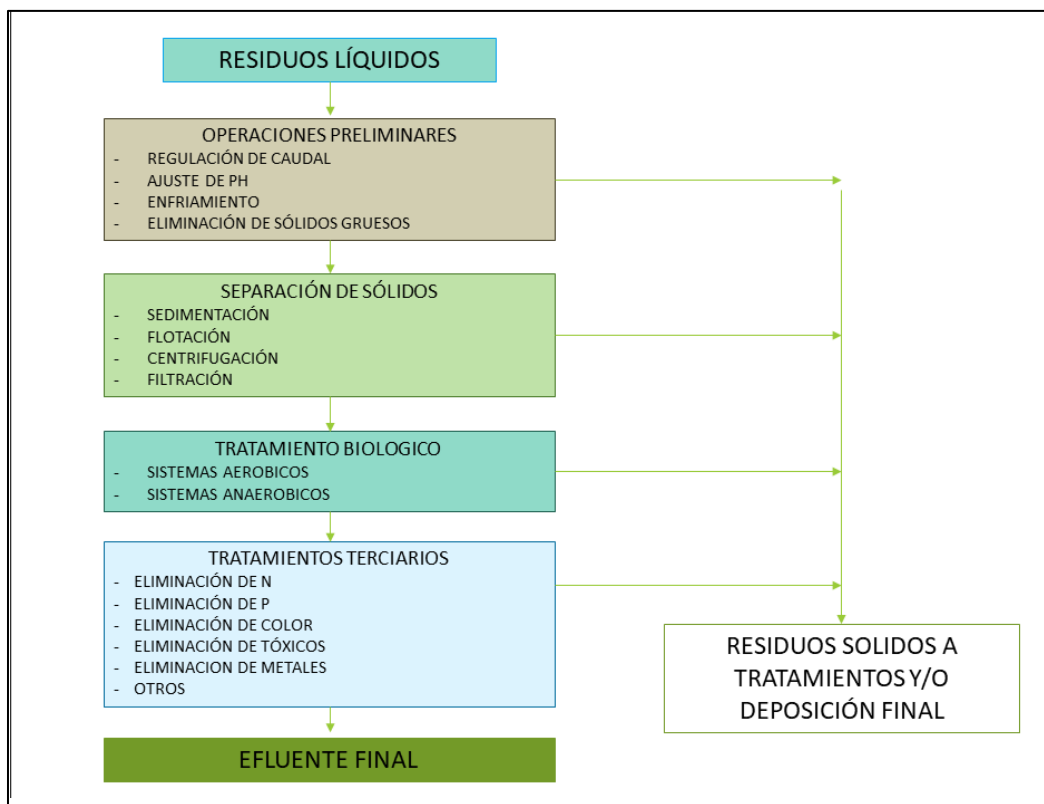


Figura 12: Tratamientos típicos de residuos líquidos (Zaror, 2005).

Anexo Q Gráfica de red para Ecotoxicidad Terrestre (ET), etapa industrial.

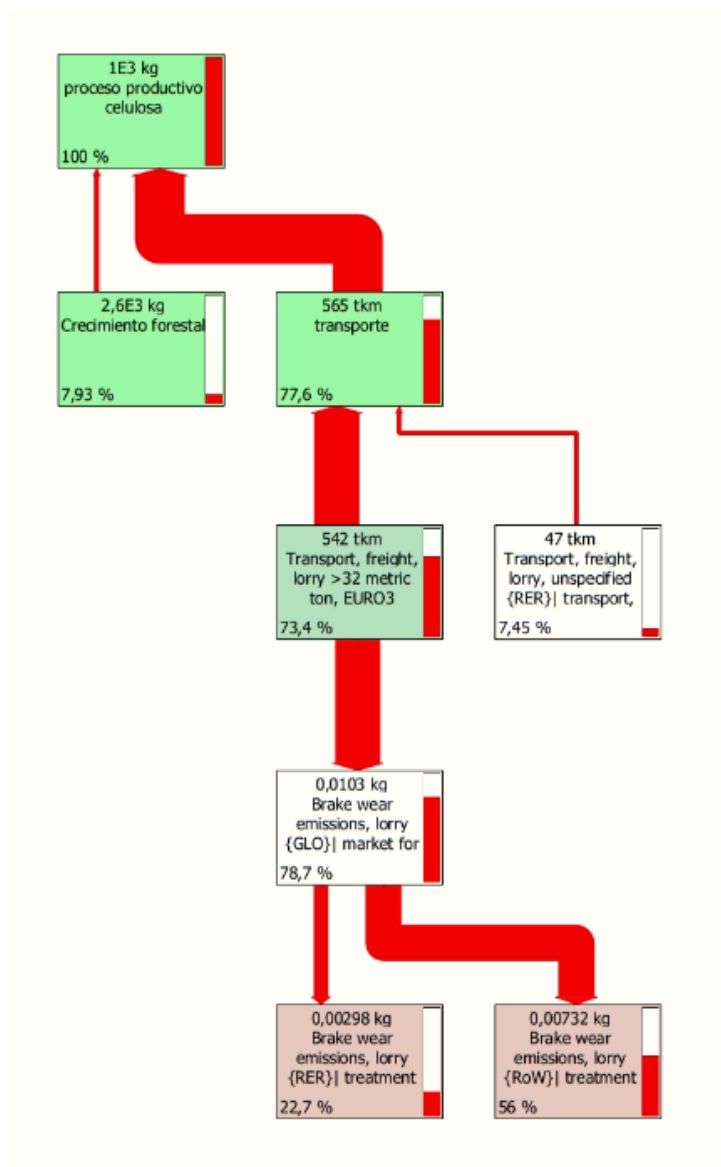


Figura 13: Ecotoxicidad Terrestre (ET) (Elaboración propia).

Anexo R Gráfica de red para Potencial de Ecotoxicidad de Agua Dulce (EAD), etapa industrial.

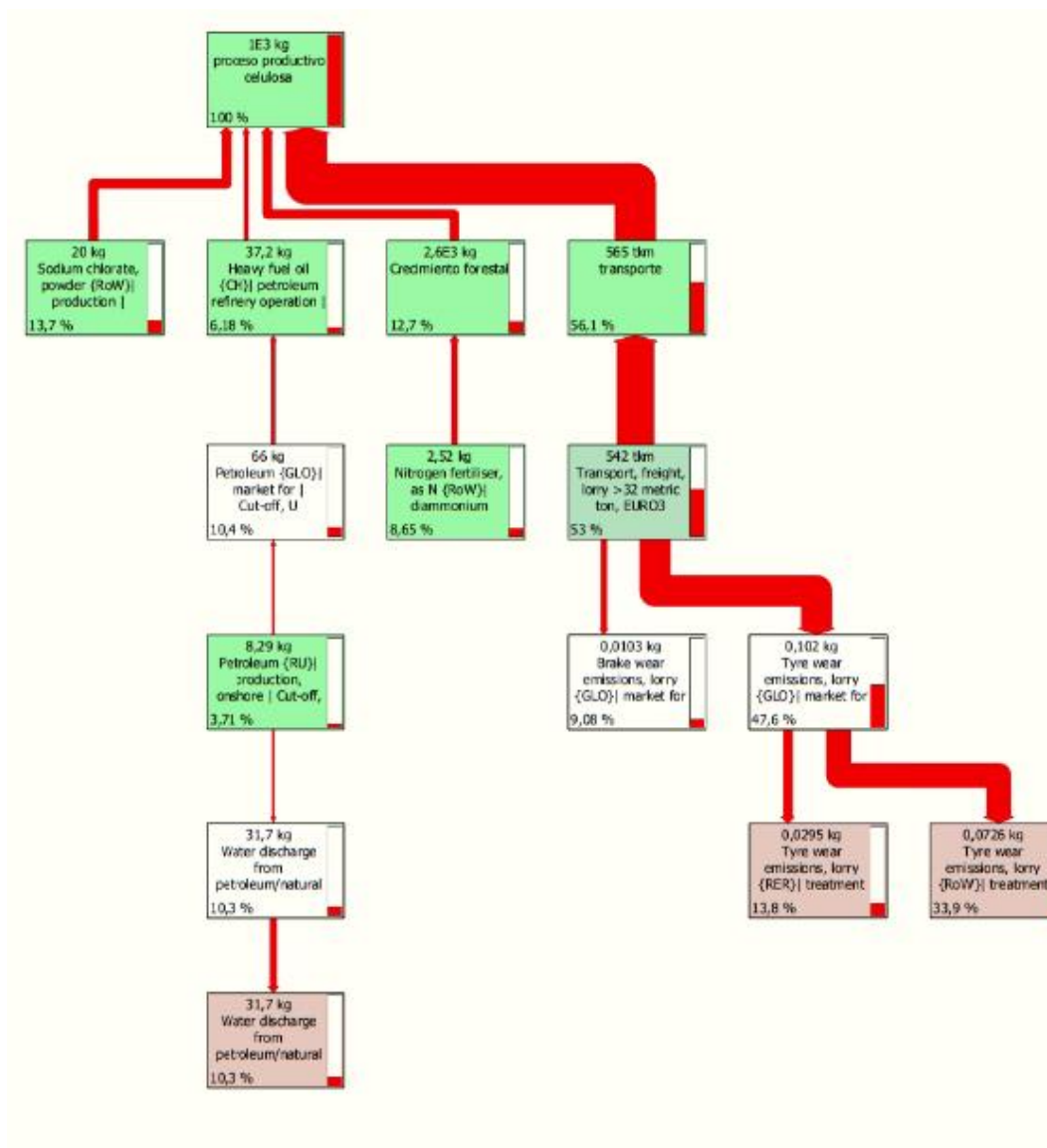


Figura 14: Ecotoxicidad de Agua Dulce (EAD), para etapa industrial (Elaboración propia)

Anexo S Contribución por etapa en cada categoría de impacto.

Tabla 16: Contribución nominal por categoría de impacto, separado por etapa de producción (Elaboración propia).

Categorías de impacto	Industrial (ton/ton celulosa)	Silvícola (ton/2.6 ton de troza pulpable)
PCG	469	52,1
PA	7,67	0,57
PEAD	0,172	0,016
PEM	0,339	0,33
ET	1,17E+03	92,3
EAD	5,06	0,39
FOFH	1,28	0,323
FOFE	1,29	0,32