



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**Evaluación de Ciclo de Vida de la Producción de Celulosa ECF utilizando
Modelo ReCiPe**

Por

Pablo Vicente Barrientos Bermúdez

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de
Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Químico.

Patrocinantes

Claudio Zaror

Patricia González

Enero, 2023

Concepción (Chile)

© 2023, Pablo Vicente Barrientos Bermúdez

© 2023 Pablo Vicente Barrientos Bermúdez

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

Resumen

Las crecientes presiones del mercado internacional han obligado a la industria celulósica a gestionar sus aspectos e impactos socioambientales en todo el ciclo de vida de sus productos, mediante herramientas metodológicas estandarizadas, con el fin de cuidar el prestigio y competitividad de sus productos. En este contexto, el objetivo de esta memoria de título es obtener el perfil ambiental de la producción de celulosa ECF a partir de pino en Chile y evaluar potenciales escenarios de mejoramiento.

Como marco metodológico se utilizó la Norma ISO/NCh 14040-44:2006 para la realización de la evaluación ambiental de ciclo de vida, en base a información primaria proveniente de una planta tipo a nivel nacional y de las bases de datos de Ecoinvent. Estas bases de datos fueron adaptadas a la red eléctrica nacional del año 2018. El perfil ambiental de la celulosa ECF se determinó mediante el modelo ReCiPe 2016, considerando 11 impactos intermedios y 3 impactos finales, utilizando el software SimaPro.

Los resultados muestran que la categoría de impacto intermedio más afectada es la eutroficación de agua dulce, principalmente relacionada con la producción de insumos químicos, como el clorato de sodio e hidróxido de sodio. El segundo impacto intermedio más relevante es la escasez de recursos fósiles, donde el consumo de fuel oil es el responsable de un 40% de dicho impacto, seguido por la producción de insumos químicos con un 20%. En lo que respecta a la categoría de calentamiento global, la contribución mayoritaria corresponde a la producción de insumos químicos, causada por la utilización intensiva de electricidad en los procesos electroquímicos asociados. Por su parte, la categoría de impacto final más relevante es el daño a la salud humana, principalmente por la producción de insumos químicos.

Para todos los indicadores, la electricidad vendida al SEN produce un importante impacto positivo debido a los impactos que se evitan al reemplazar una cantidad equivalente de energía que se generaría con la matriz fósil del sistema público. El reemplazo del fuel oil por gas natural licuado es ambientalmente favorable, aunque su efecto cuantitativo significa una reducción inferior a 10% en la categoría de calentamiento global. Finalmente, el escenario con la matriz energética 100% renovable tiene un claro impacto positivo en todos los impactos, principalmente en las categorías de calentamiento global, generación de partículas finas y eutroficación; sin embargo, su efecto cuantitativo en el perfil ambiental total se ve reducido por la menor cantidad de impactos evitados, al ser una matriz eléctrica en base renovable.

Debido a que no existen estudios publicados de esta índole para la realidad nacional, este trabajo se puede considerar como una primera aproximación para construir una línea base que sirva de referencia para trabajos posteriores, tanto en aspectos metodológicos como en sus resultados. Cabe destacar que no existen trabajos publicados acerca del perfil ambiental de la producción de celulosa con categorías de impacto final, por lo que este trabajo debe ser considerado como pionero en este aspecto.

Abstract

The growing pressures of the international market have forced the pulp industry to manage its socio-environmental aspects and impacts throughout the life cycle of its products, using standardized methodological tools, to protect the prestige and competitiveness of its products. Within this context, the objective of this work is to obtain the environmental profile of ECF pulp production from pinewood in Chile and identify options for environmental improvement.

The ISO/NCh 14040-44:2006 Standard was used as a methodological framework to carry out the environmental assessment of the life cycle, based on primary data from a standard plant at the national level and from the Ecoinvent databases. These databases were adapted to the 2018 national electricity grid. The environmental profile of ECF pulp was determined using the ReCiPe 2016 model, considering 11 intermediate impacts and 3 final impacts, using the SimaPro software.

Results show that the most affected intermediate impact category is freshwater eutrophication, mainly related to the production of chemicals, such as sodium chlorate and sodium hydroxide. The second most relevant intermediate impact is the scarcity of fossil resources, where fuel oil consumption is responsible for 40% such impact, followed by the production of chemicals with 20%. Regarding the global warming category, the main contribution corresponds to the production of chemicals, caused by the intensive use of electricity in the associated electrochemical processes. The most relevant final impact category is damage to human health, mainly due to the use of electricity in the chemicals production system.

In all cases, the electricity sold to the SEN produces an important positive effect due to the impacts that are avoided by replacing an equivalent amount of energy that would be generated with the fossil matrix of the public system. The replacement of fuel oil by liquefied natural gas is environmentally favorable, although its quantitative effect means a reduction of less than 10% in the global warming category. Finally, the scenario with the 100% renewable energy matrix has a clear positive impact on all impacts, mainly in the categories of global warming, generation of fine particles and eutrophication; however, its quantitative effect on the total environmental profile is reduced by the lower number of impacts avoided, as it is a renewable-based electrical matrix.

Since there are no published studies of this nature for the national reality, this work should be regarded as a first approximation to build a baseline that serves as a reference for subsequent work.

Finally, it should be mentioned that there are no published works on the environmental profile of pulp production using end-point impact categories, so this work should be considered pioneering in this regard.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres por todo el amor, esfuerzo y apoyo incondicional que me han entregado todos los días de mi vida. Quiero que sepan que estaré eternamente agradecido por entregarme las herramientas y la sabiduría que me han permitido llegar hasta este punto. Siempre estaré para ustedes. Sin ustedes nada de esto sería posible, los amo.

También, a mis hermanas por el infinito amor que me entregan cada vez que nos vemos, por cada juego, por cada risa y por cada abrazo. Son las mejores y no me cabe duda de que serán excelentes personas y tendrán todo el éxito del mundo en lo que hagan. Siempre podrán contar con su hermano, las amo.

A mis amigos Mauri y Marco, que sin ellos esta vida no sería lo mismo. Gracias por cada aventura, por cada carcajada y cada palabra de ánimo. Son lo máximo, los amo.

A mi polola por bancarme todo este año, todo este proceso ha sido increíble a tu lado. Gracias por tu amor y amistad, por hacer los días más divertidos y especiales. Eres una persona increíble y estoy muy seguro de que serás una excelente profesional. Te amo preciosa.

Quiero agradecer especialmente a mi abuela por estar a mi lado todos estos años de universidad. Gracias por hacer de esta etapa una muy especial.

Por supuesto agradecer al profesor Claudio Zaror, por la paciencia, tiempo, consejos y la oportunidad de trabajar con usted. Muchas gracias Profe. También a cada persona del departamento de ingeniería química que siempre están para ayudar con una sonrisa y la mejor disposición.

Finalmente, a todos quienes han formado parte de mi vida en algún momento. No tengo espacio para agregarlos a todos, pero están en mis pensamientos. Muchas gracias.

Índice

Índice de tablas	7
Índice de figuras.....	9
1. Introducción	11
2. Objetivos	13
2.1. Objetivo general.....	13
2.2. Objetivos específicos	13
3. Marco teórico.....	14
3.1. Proceso de producción de celulosa	14
3.2. Modelos de impacto ambiental	19
3.3. Evaluación de Ciclo de Vida (ECV) de la Celulosa – Revisión de Literatura.....	20
4. Metodología.....	29
4.1. Enfoque metodológico	29
5. Resultados y discusión	33
5.1. Objetivo y alcance.....	33
5.2. Límites del sistema	33
5.3. Unidad funcional.....	34
5.4. Análisis de inventario	34
5.5. Evaluación de impacto ambiental	36
6. Conclusiones	61
7. Referencias.....	64
8. Anexos	66
Anexo A: tablas de resultados.....	66
Anexo B: literatura.....	79
Anexo C: Descripción general de la metodología de Evaluación de Ciclo de Vida, de acuerdo con la norma NCh-ISO 14040.....	83
Anexo D: Cálculos para escenario de reemplazo de fuel oil por gas natural.....	89

Índice de tablas

Tabla 1. Procesos originales de la base de datos de Ecoinvent. (Elaboración propia).....	30
Tabla 2. Distribución mensual de energía por tipo de fuente para el año 2018. (Elaboración propia).....	30
Tabla 3. Distribución de energía para la construcción de matriz renovable 2030. (Elaboración propia) ...	32
Tabla 4. Datos para análisis de inventario. (Elaboración propia)	35
Tabla 5. Resultados de ECV para la producción de 1 ton de celulosa ECF. Impactos intermedios.	54
Tabla 6. Resultados de ECV para la producción de 1 ton de celulosa ECF. Impactos finales.	54
Tabla 7. comparación de impactos ambientales intermedios en distintos escenarios. Modelo ReCiPe.	59
Tabla 8. comparación de impactos ambientales finales en distintos escenarios. Modelo ReCiPe.....	59
Tabla A.1. Resultados de impactos intermedios por etapas para la producción de biomasa.	66
Tabla A.2. Resultados de impactos finales por etapas para la producción de biomasa.	66
Tabla A.3. Resultados de impactos intermedios por etapas para la producción de clorato de sodio.	66
Tabla A.4. Resultados de impactos finales por etapas para la producción de clorato de sodio.	67
Tabla A.5. Resultados de impactos intermedios por etapas para la producción de ácido sulfúrico.....	67
Tabla A.6. Resultados de impactos finales por etapas para la producción de ácido sulfúrico.....	67
Tabla A.7. Resultados de impactos intermedios por etapas para la producción de hidróxido de sodio.....	68
Tabla A.8. Resultados de impactos finales por etapas para la producción de hidróxido de sodio.....	68
Tabla A.9. Resultados de impactos intermedios por etapas para la producción de cal viva.	68
Tabla A.10. Resultados de impactos finales por etapas para la producción de cal viva.	69
Tabla A.11. Resultados de impactos intermedios por etapas para la producción de oxígeno líquido.	69
Tabla A.12. Resultados de impactos finales por etapas para la producción de oxígeno líquido.	69
Tabla A.13. Resultados de impactos intermedios por etapas para la producción de peróxido de hidrógeno.	69
Tabla A.14. Resultados de impactos finales por etapas para la producción de peróxido de hidrógeno.....	70
Tabla A.15. Resultados de impactos intermedios por etapas para la producción de metanol.....	70
Tabla A.16. Resultados de impactos finales por etapas para la producción de metanol.....	70
Tabla A.17. Resultados de impactos intermedios por etapas para la producción de diésel.	71
Tabla A.18. Resultados de impactos finales por etapas para la producción de diésel.	71
Tabla A.19. Resultados de impactos intermedios por etapas para la producción de fuel oil.	71
Tabla A.20. Resultados de impactos finales por etapas para la producción de fuel oil.	72
Tabla A.21. Resultados de impactos intermedios por etapas para la producción de GLP.	72
Tabla A.22. Resultados de impactos finales por etapas para la producción de GLP.	72
Tabla A.23. Resultados de impactos intermedios por etapas para la producción de GNL.	73
Tabla A.24. Resultados de impactos finales por etapas para la producción de GNL.	73
Tabla A.25. Resultados de impactos intermedios por etapas para 1 tkm por camión.....	74
Tabla A.26. Resultados de impactos finales por etapas para 1 tkm por camión.	74

Tabla A.27. Resultados de impactos intermedios por etapas para 1 tkm por tren.	74
Tabla A.28. Resultados de impactos finales por etapas para 1 tkm por tren.	74
Tabla A.29. Resultados de impactos intermedios por etapas para 1 tkm por barco.....	75
Tabla A.30. Resultados de impactos finales por etapas para 1 tkm por barco.....	75
Tabla A.31. Resultados de impactos intermedios por etapas para la producción de electricidad SEN.	75
Tabla A.32. Resultados de impactos finales por etapas para la producción de electricidad SEN.	76
Tabla A.33. Resultados de impactos intermedios por etapas para la producción de celulosa ECF.	76
Tabla A.34. Resultados de impactos finales por etapas para la producción de celulosa ECF.	76
Tabla A.35. Resultados de impactos intermedios por etapas para la producción de celulosa ECF con factor de planta.....	77
Tabla A.36. Resultados de impactos finales por etapas para la producción de celulosa ECF con factor de planta.....	77
Tabla A.37. Resultados de impactos intermedios por etapas para la producción de celulosa ECF sin fuel oil.	77
Tabla A.38. Resultados de impactos finales por etapas para la producción de celulosa ECF sin fuel oil. .	78
Tabla A.39. Resultados de impactos intermedios por etapas para la producción de celulosa ECF con electricidad 2030.....	78
Tabla A.40. Resultados de impactos finales por etapas para la producción de celulosa ECF con electricidad 2030.....	79
Tabla B.1. Resultados del estudio de D. Echeverría.....	80
Tabla B.2. Resultados etapa de caracterización del estudio de S. González-García.....	80
Tabla B.3. Resultados de exceso de electricidad y huella de carbono para el estudio de P. Jour.....	82

Índice de figuras

Figura 1. Proceso Kraft de una planta local de la región del Bio-Bio.....	15
Figura 2. Etapas de proceso Área de Fibra. (Elaboración propia)	15
Figura 3. Etapas de proceso Área de recuperación de reactivos y energía. (Elaboración propia)	17
Figura 4. Límites del sistema. (Elaboración propia).....	34
Figura 5. Resultados evaluación de ciclo de vida para la producción de 1 m ³ de madera de pino. Impactos intermedios.....	37
Figura 6. Resultados análisis de ciclo de vida para la producción de 1 m ³ de madera de pino. Impactos finales.....	37
Figura 7. Resultados evaluación de ciclo de vida para la producción de 1 m ³ de madera de pino. Impactos intermedios normalizados.	38
Figura 8. Resultados evaluación de ciclo de vida para la producción de 1 m ³ de madera de pino. Impactos finales normalizados.	39
Figura 9. Resultados evaluación de ciclo de vida para la producción de insumos químicos. Impactos intermedios.....	42
Figura 10. Resultados evaluación de ciclo de vida para la producción de insumos químicos. Impactos finales.....	42
Figura 11. Resultados evaluación de ciclo de vida para la producción de insumos químicos. Impactos intermedios normalizados.	43
Figura 12. Resultados evaluación de ciclo de vida para la producción de insumos químicos. Impactos finales normalizados.	44
Figura 13. Resultados evaluación de ciclo de vida para la producción de combustibles. Impactos intermedios.....	45
Figura 14. Resultados evaluación de ciclo de vida para la producción de combustibles. Impactos finales.	46
Figura 15. Resultados evaluación de ciclo de vida para la producción de combustibles. Impactos intermedios normalizados.	47
Figura 16. Resultados evaluación de ciclo de vida para la producción de combustibles. Impactos finales normalizados.	47
Figura 17. Resultados evaluación de ciclo de vida para el transporte hacia la planta de celulosa. Impactos intermedios.....	49
Figura 18. Resultados evaluación de ciclo de vida para el transporte hacia la planta de celulosa. Impactos finales.....	49
Figura 19. Resultados evaluación de ciclo de vida para el transporte hacia la planta de celulosa. Impactos intermedios normalizados.	50
Figura 20. Resultados análisis de ciclo de vida para el transporte hacia la planta de celulosa. Impactos finales normalizados.	50
Figura 21. Resultados evaluación de ciclo de vida para 1 kWh de electricidad producida por el SEN. Impactos intermedios.....	51
Figura 22. Resultados evaluación de ciclo de vida para 1 kWh de electricidad producida por el SEN. Impactos finales.....	52

Figura 23. Resultados evaluación de ciclo de vida para 1 kWh de electricidad producida por el SEN. Impactos intermedios normalizados.....	53
Figura 24. Resultados evaluación de ciclo de vida para 1 kWh de electricidad producida por el SEN. Impactos finales normalizados.....	53
Figura 25. Resultados evaluación de ciclo de vida para 1 ton de celulosa ECF. Impactos intermedios.....	56
Figura 26. Resultados evaluación de ciclo de vida para 1 ton de celulosa ECF. Impactos finales.....	56
Figura 27. Resultados análisis de ciclo de vida para 1 ton de celulosa ECF. Impactos intermedios normalizados.....	57
Figura 28. Resultados análisis de ciclo de vida para 1 ton de celulosa ECF. Impactos finales normalizados.....	58
Figura B.1. Datos de inventario del estudio de S. González-García.....	80
Figura B.2. Datos de inventario para el estudio de X. Ma.	81
Figura B.3. Cargas de insumos químicos para el estudio de P. Jour.....	81
Figura B.4. Resultados para la huella de carbono por etapa para el estudio de P. Jour.	82
Figura B.5. Resultados huella de carbono para pulpa sin blanquear y blanqueo para el estudio de P. Jour.	82
Figura B.6. Contribución a la huella de carbono para etapas de blanqueo para el estudio de P. Jour.	83

1. Introducción

En los últimos años, se constata una creciente preocupación de la ciudadanía y los mercados hacia los impactos socioambientales asociados a la actividad productiva de los distintos sectores. Hoy en día, los mercados internacionales han incorporado criterios, convenios y normas, con el fin de reducir o mitigar dichos impactos, lo cual ha motivado a las empresas a tomar medidas para mejorar su prestigio y fortalecer la competitividad de sus productos.

En Chile, el sector forestal y, en particular la industria de la celulosa, es un importante agente económico, con un aporte de 1,7% al Producto Interno Bruto (PIB) en 2021, principalmente asociado a exportaciones al mercado internacional (Álvarez-González et al., 2022). Sin embargo, este sector industrial es responsable del uso de grandes cantidades de recursos naturales y sustancias químicas peligrosas, además de la generación de residuos líquidos, atmosféricos y sólidos. Por estos motivos, las plantas de celulosa se encuentran en constante cuestionamiento por parte de las comunidades locales, centros académicos, fiscalizadores y otras partes interesadas. Para hacer frente a estos cuestionamientos, las empresas del rubro han implementado nuevas tecnologías de producción junto con políticas de gestión que buscan el mejoramiento del desempeño socioambiental, logrando reducir significativamente sus impactos ambientales.

A pesar de estos avances, aún existen serios desafíos en materias relacionadas con el consumo de agua, emisiones de gases de efecto invernadero, uso de combustibles fósiles, uso de sustancias peligrosas, entre otras materias.

Más aún, en el último tiempo, se ha puesto énfasis en evaluar el desempeño socioambiental más allá de los límites de la planta de producción de celulosa, ya que los efectos negativos de esta actividad repercuten en todo el ciclo de vida del producto, desde la extracción de recursos naturales, como la madera; la producción de materias primas e insumos, y los transportes de cada uno de éstos, hasta la distribución y procesamiento posterior del producto, consumo y disposición final. Por tal motivo, se ha establecido la exigencia de evaluar los aspectos e impactos ambientales desde una perspectiva de ciclo de vida, usando herramientas metodológicas estandarizadas, que permitan comparar los atributos socioambientales en todo el sistema-producto. Un ejemplo de esto

es la huella de carbono de un producto, donde se busca cuantificar las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en toda su cadena de valor.

La herramienta metodológica más utilizada para realizar la evaluación socio-ambiental de ciclo de vida (ECV) de un producto está dada por las normas ISO 14040 (ISO, 2006a) e ISO 14044 (ISO, 2006b), que se utilizan en las Declaraciones Ambientales de Productos y en otros casos de información ambiental certificada por terceros. La ECV constituye hoy una poderosa herramienta en el diseño de nuevos productos y procesos, en gestión ambiental y como apoyo a la toma de decisiones estratégicas, donde sea relevante el enfoque de ciclo de vida.

Existe una importante base de datos y literatura acerca de ECV para diferentes tipos de productos y se ha realizado bastante investigación a nivel internacional (De Figueirêdo et al., 2012)(Arvidsson et al., 2015). En el caso de la celulosa, existen publicaciones y declaraciones ambientales de productos de procesos en países industrializados, en donde los atributos ambientales de los materiales y fuentes de energía son diferentes a la realidad nacional (González-García et al., 2009)(Lopes et al., 2002)(Jawjit et al., 2006). Por esto último, es importante trabajar en el desarrollo de bases de datos propias para los productos de exportación nacional, considerando las particularidades locales, buscando reflejar de manera más precisa los aspectos socioambientales del proceso o producto nacional.

Desgraciadamente, la ECV de la producción de celulosa bajo las condiciones de operación existentes en Chile no se encuentra documentada en literatura, lo que representa una potencial vulnerabilidad frente a otros países que compiten en este mercado internacional.

Esta memoria de título se enmarca en este contexto y tiene como objetivo principal obtener el perfil ambiental de la producción de celulosa ECF¹ para una planta local, como una primera aproximación a la obtención de inventarios e impactos que se basen en fuentes primarias, con una perspectiva de ciclo de vida. Como resultado de este trabajo, se espera contar con una línea de base preliminar que sirva para evaluar el efecto de nuevos escenarios productivos en la ECV de la celulosa chilena.

¹ ECF: acrónimo de Elementary Chlorine Free; blanqueo libre de cloro elemental

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

- 2.1.1.** Obtener el perfil ambiental de la producción de celulosa ECF, utilizando categorías de impacto intermedio y final del modelo ReCiPe, en base a datos primarios complementados con la base de datos Ecoinvent.

2.2. Objetivos específicos

- 2.2.1.** Calcular los inventarios de materiales y energía asociados al ciclo de vida de la producción de celulosa, utilizando un enfoque de la cuna a la puerta.
- 2.2.2.** Evaluar los impactos ambientales en el ciclo de vida, mediante el modelo ReCiPe.
- 2.2.3.** Simular escenarios basados en una matriz eléctrica 100% renovable y reemplazo de fuel oil por gas natural licuado en el horno de cal.

3. Marco teórico

En este capítulo se presentan antecedentes de literatura relevantes a este trabajo. Primeramente, se describen las etapas del sistema de producción de celulosa y las principales características del proceso estudiado aquí. En segundo lugar, se describe la selección del modelo de evaluación de impacto ambiental a utilizar. Luego, se resume el estado del arte de la evaluación de ciclo de vida reportada para la producción de celulosa. Finalmente, se identifican las principales brechas de información para la elaboración de este trabajo.

3.1. Proceso de producción de celulosa

La celulosa se obtiene, principalmente, a partir de material lignocelulósico. En Chile, dicha materia prima proviene de un sistema de plantaciones de monocultivo de pino y eucalipto basado en rotaciones con ciclos de 20 y 10 años, respectivamente. La madera pulpable se alimenta a las plantas de celulosa donde se obtiene el producto final, en base a tratamientos químicos. El proceso químico más utilizado por la industria de la celulosa es el proceso Kraft, que permite recuperar los reactivos químicos y aprovechar al máximo el potencial energético de la biomasa. Este proceso se encuentra ampliamente documentado en literatura, por lo que aquí se presenta un breve resumen de las principales características del proceso de producción utilizado en este estudio (Smook, 1998)(Libby, 1969)(Casey, 2012).

Típicamente, las operaciones de las plantas de celulosa se pueden dividir en dos grandes áreas, a saber: área de fibra y área de recuperación de reactivos y energía. La primera comprende tres etapas, cocción, deslignificación y blanqueo, mientras que el área de recuperación de reactivos y energía incluye las secciones de caldera de biomasa, evaporadores, caldera recuperadora, caustificación y el horno de cal. En la figura 1 se presenta un esquema ilustrativo del proceso Kraft.

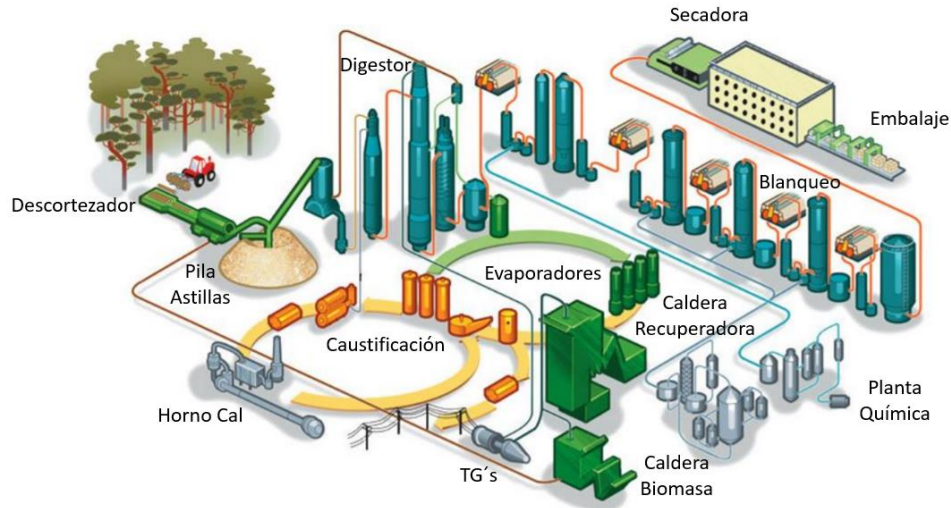


Figura 1. Proceso Kraft de una planta local de la región del Bio-Bio.

3.1.1. Área de Fibra

Esta línea empieza con la materia prima (rollizos de madera) y termina con el flujo de hojas de celulosa. En la figura 2 se presenta un diagrama de la línea de fibra. A continuación, se describen las operaciones realizadas en cada una de las etapas que componen este proceso.

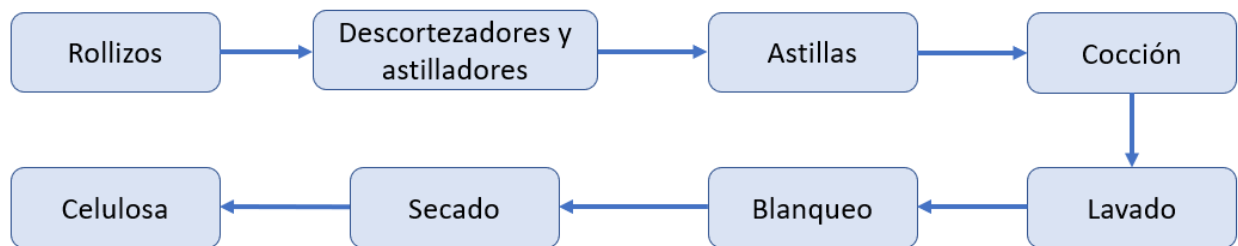


Figura 2. Etapas de proceso Área de Fibra. (Elaboración propia)

La materia prima del proceso corresponde a rollizos y astillas de madera. Los rollizos son cortes de troncos de árboles, que son acopiados en canchas existentes para esta función, tienen una capacidad de 14 hectáreas totales, pudiendo llegar a almacenar 300.000 m³, en bloques de 90m x 90m x 5m.

Luego existen tres líneas de descortezado por las cuales ingresan los rollizos desde las canchas de acopio. En los equipos pasan por una etapa de lavado para eliminar barro y otras impurezas. Ingresan al tambor rotatorio, donde a los rollizos se les empieza a desprender la corteza por fricción entre ellos.

Posteriormente, el sistema conduce los rollizos descortezados hacia los astilladores, con el propósito de generar las astillas para el proceso de cocción. La clasificación de las astillas se realiza según su tamaño en cuatro tipos: astillas aceptadas, pin chip, sobretamaño y finos. Las astillas aceptadas y el pin chip siguen el proceso hacia la cocción, los sobretamaño vuelven a ser procesados y son enviados a reclasificación y los finos son llevados a la pila de corteza, los cuales son utilizados para la generación de energía en la caldera de biomasa. La selección tiene como objetivo poder realizar una extracción eficiente de la celulosa.

La siguiente etapa es la cocción, cuyo objetivo es realizar las reacciones químicas entre licor blanco (NaOH y Na_2S) y la lignina presente en las astillas, disolviendo esta última para lograr la separación de las fibras. Luego, se añade vapor para eliminar su contenido de aire. Posteriormente, ingresan a la torre de impregnación donde se busca impregnar las astillas con el licor blanco para lograr la separación de la lignina. Finalmente son llevadas hasta el tope del digestor para iniciar la cocción.

Para la etapa de lavado, la pulpa proveniente del digestor entra al estanque de soplado, donde se realiza un soplado de la materia, con el objetivo de desintegrar las astillas que ya fueron ablandadas en la cocción para formar la pulpa café. Luego, la pasta es bombeada hasta los filtros lavadores, donde es filtrada y lavada. A continuación, se encuentra la fase de deslignificación con oxígeno, cuyo objetivo es separar la mayor cantidad de lignina para mejorar la calidad de la pulpa, lo que permite reducir la cantidad de reactivos químicos en la etapa de blanqueo.

Posteriormente la etapa de blanqueo (ECF) tiene como objetivo extraer la lignina remanente y otras impurezas de la pulpa, y aumentar la blancura logrando la calidad requerida. Durante el proceso se agregan diferentes agentes químicos que facilitan la disolución de la lignina y su posterior extracción.

Primero, se tiene una etapa ácida (etapa D_0), donde la fibra es sometida a una reacción de acidificación con dióxido de cloro (ClO_2), durante un tiempo de residencia óptimo para la reacción. La pulpa se descarga por el tope del reactor y es enviada hacia lavadores de filtro.

La segunda etapa del blanqueo (etapa Eop presurizada) busca remover la lignina soluble, en un medio alcalino. La pulpa pasa a un mezclador donde se adiciona oxígeno y peróxido de hidrógeno, esperando el tiempo necesario para que ocurran las reacciones esperadas. Luego la pulpa ingresa a la torre de extracción, para finalmente llegar a un filtro, siendo lavada y filtrada.

El proceso continúa con la etapa D_1 , donde se incrementa la blancura, mediante la adición de dióxido de cloro. Se inicia en el mezclador de dióxido, para luego pasar al reactor propiamente tal, otorgando el tiempo necesario para la reacción. Posteriormente, se cambia la condición de la pulpa, adicionando hidróxido de sodio y dióxido de azufre para neutralizar.

Según los requerimientos de blanqueo, pueden existir etapas adicionales de blanqueo ácido con dióxido de cloro (D_2 - D_n), con el objetivo de lograr las especificaciones y la calidad esperada del producto.

Finalmente, en la etapa de secado, se seca la fibra en secadores continuos generando las hojas de celulosa. Posteriormente, se llega a la cortadora y la línea de embalaje del producto, de acuerdo con el formato final deseado.

3.1.2. Área de recuperación de reactivos y energía

Esta área busca, como su nombre lo indica, recuperar los reactivos químicos del proceso y obtener energía que es aprovechada en las distintas etapas del proceso. En la figura 3 se observa un diagrama del proceso.

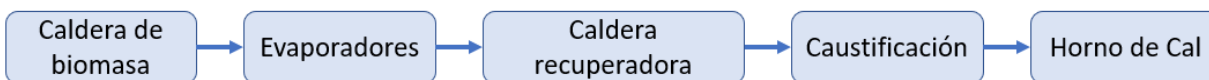


Figura 3. Etapas de proceso Área de recuperación de reactivos y energía. (Elaboración propia)

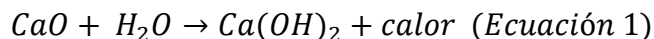
Los residuos forestales sólidos generados en la línea de fibra son enviados a la caldera de biomasa, en esta se obtiene vapor y electricidad a partir de dichos residuos. Cabe destacar que la mayoría de las plantas de celulosa se autoabastecen de energía eléctrica debido a esta caldera, incluso pueden llegar a exportar energía al sistema nacional.

Por otra parte, el líquido residual del proceso de cocción, el licor negro, corresponde a una mezcla de componentes degradados de la madera, reactivos químicos utilizados en la cocción que no han reaccionado y otros componentes. Los evaporadores tienen como objetivo aumentar la concentración de sólidos del licor negro desde un 14% a un 79%. El proceso se compone de siete evaporaciones.

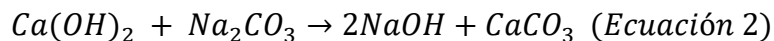
Luego, la caldera de recuperación se encarga de eliminar el agua residual que trae el licor negro concentrado de los evaporadores, se quema la fracción orgánica de esta corriente y el calor generado se emplea para producir vapor, además, reduce los compuestos oxidados de azufre y los transforma en sulfuros, también separa la fracción inorgánica para, finalmente, recuperar los químicos del proceso (Licor verde).

La etapa de Caustificación tiene como objetivo recuperar los reactivos químicos utilizados en la cocción para regenerar el licor blanco. En primer lugar, se tiene el licor verde crudo, proveniente de la caldera de recuperación, que contiene carbonato de sodio (Na_2CO_3) y sulfuro sódico (Na_2S).

A continuación, el flujo de licor se dirige al apagador de cal, en este se produce cal apagada, esta reacción empieza a ocurrir cuando se mezcla parte del agua del licor verde con cal viva u óxido de calcio (CaO) proveniente del horno de cal; como producto de esta reacción se obtiene hidróxido de calcio o lechada de cal y gran cantidad de calor (Ecuación 1)

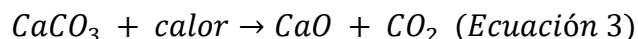


La reacción de caustificación comienza en el apagador y sigue en los caustificadores, los cuales propician un mayor tiempo de residencia aumentando la conversión. En la Ecuación 2, se observa la obtención del hidróxido de sodio que es reutilizado en el proceso de cocción.



Finalmente, el producto es filtrado para obtener el licor blanco y es enviado a los estanques para su almacenamiento. Los lodos, que corresponden a la parte que no reacciona, son enviados hacia el Horno de Cal.

En el horno de cal se busca transformar el carbonato de calcio de los lodos de la caustificación en cal viva nuevamente. El proceso sucede mediante una reacción de calcinación. La reacción solo necesita agregar calor, como se observa en la Ecuación 3.



El horno de cal es un reactor químico que tiene 125m de largo y 4,5m de diámetro, cuyo interior está recubierto con ladrillos refractarios y utiliza principalmente fuel oil como combustible.

En la parte final del horno de cal se ubica la zona de ingreso de aire, lo que permite bajar la temperatura y detener la reacción. En caso de ser necesario, se puede adicionar caliza externa ($CaCO_3$) con el fin de obtener la cantidad de cal viva requerida, compensando las pérdidas en el ciclo de la cal.

3.2. Modelos de impacto ambiental

En la evaluación ambiental de ciclo de vida se busca determinar los impactos ambientales potenciales que se pueden generar en las diferentes etapas de la cadena de valor de un producto o proceso. La Norma NCh ISO 14040-44 establece lineamientos metodológicos para elaborar ese tipo de evaluación y se encuentra ampliamente documentada (ISO, 2006a, 2006b). Al respecto, la evaluación ambiental debe realizarse en base a procedimientos estandarizados que se han ido estructurando en las últimas décadas y existen decenas de propuestas que se pueden utilizar, dependiendo de los objetivos de los estudios. En este trabajo, se seleccionó el modelo de evaluación de impacto conocido como ReCiPe, que utiliza una sólida base científica para modelar

los impactos genéricos y permite una mejor interpretación de los resultados (Huijbregts et al., 2017).

3.3. Evaluación de Ciclo de Vida (ECV) de la Celulosa – Revisión de Literatura

A nivel internacional se encontraron artículos sobre evaluación de ciclo de vida de la producción de celulosa, en base a procesos basados en las condiciones de España, Portugal, EE. UU. y Brasil, cuyos principales resultados se describen a continuación. Los principales resultados cuantitativos para las diversas tecnologías descritas en esta sección se encuentran detallados en el Anexo B. Cabe señalar que, en todos los casos, la unidad funcional utilizada es una tonelada de celulosa secada al aire (10% de humedad).

La publicación más reciente es la de D. Echeverría publicada en 2021 (Echeverría et al., 2021). En ésta se realiza una ECV para la utilización de ácido peracético (PPA) para la tecnología de blanqueo totalmente libre de cloro elemental (Totally Chlorine Free; TCF) y compara estos resultados con la tecnología ECF (Elemental Chlorine Free). Para la producción de PPA, se utilizan dos vías, una en base de ácido acético (ePAA) y otra en base a triacetina (tPAA). Los límites del sistema definidos para este estudio son de la cuna a la puerta. La vía de ePAA es una mezcla en equilibrio de ácido acético con peróxido de hidrógeno, donde las materias primas utilizadas son peróxido de hidrógeno, ácido sulfúrico y ácido acético. Mientras que la vía de tPAA, es una mezcla con exceso de triacetina y peróxido de hidrógeno; para este caso se desarrollaron dos escenarios, uno con 50% de exceso y otro con 100% de exceso, con el fin de evaluar los impactos ambientales asociados al exceso de triacetina. La secuencia de blanqueo TCF es la tradicional y consta de seis etapas: dos etapas de deslignificación con Oxígeno (O_2), otra con Quelantes (Q1), una de oxígeno con peróxido de hidrógeno (Op), otra de ácido peracético con quelantes (PAAQ2) y por último con peróxido de hidrógeno (P). Mientras que la secuencia ECF utilizada es un proceso de cuatro etapas: una deslignificación con oxígeno, otra con ClO_2 (D1), una etapa de extracción con NaOH y H_2O_2 (Eop) y finalmente con ClO_2 (D2). Al igual que en nuestro caso de estudio, la energía y el vapor requeridos son producidos en la misma planta.

En general, el proceso TCF usando PAA tiene menores impactos ambientales que ECF para las categorías de potencial de calentamiento global (PCG), eutrofización de agua dulce (EA) y agotamiento de recursos fósiles (ARF), pero resultados más altos en las demás categorías. También se puede observar que el proceso TCF tiene resultados negativos en las categorías de impacto PCG y EA. El resultado de PCG se debe a la gran cantidad de CO₂ (biogénico) secuestrado por los bosques. Los estudios ECV que informan un resultado positivo de PCG no consideran el carbono biogénico; por su parte, el carbono basado en fósiles de este estudio es consistente con otros trabajos previos. Por otro lado, los valores negativos de EA se deben a la gran cantidad de excedentes de energía eléctrica generado por TCF y vendidos a la red pública, lo que se contabiliza como emisiones evitadas. La tecnología ECF posee una cantidad relativamente menor de superávit de electricidad debido a un mayor consumo de electricidad para la generación de ClO₂. Se estima que ECF consume un 14% más de electricidad que TCF. Esto genera un importante beneficio para la tecnología TCF basada en PAA: reducción en el consumo de electricidad y mayor generación de electricidad verde. El estudio también informa que la producción aguas arriba de los insumos químicos son los principales impulsores de los impactos ambientales.

Otro de los estudios relevantes es el de S. González-García (González-García et al., 2009) cuyo objetivo fue identificar y cuantificar los impactos ambientales asociados a la fabricación de celulosa TCF de eucalipto mediante una ECV. Los autores reconocen que, a pesar de las dificultades de la tecnología TCF para lograr altos grados de brillo, las secuencias TCF se han introducido en la industria europea para evitar los compuestos clorados en los efluentes y productos finales. Los límites del sistema fueron definidos de la cuna a la puerta, divididos en dos subsistemas, a saber: S1) operaciones forestales que incluyen a las operaciones silvícolas y cosecha; S2) corresponde a la producción de celulosa propiamente tal, que incluye todas las actividades industriales tales como astillado, cocción, lavado, entre otros. El estudio menciona las grandes cantidades de agua y energía que se utilizan en los procesos de fabricación de pulpa; sin embargo, la planta en cuestión es autosuficiente, ya que casi todos sus requisitos de energía son satisfechos por las unidades de cogeneración a partir de desechos de biomasa y licor negro. Los datos de inventario para ambos subsistemas fueron proporcionados por una de las principales empresas con certificación forestal en España, complementados con visitas, declaraciones ambientales de producto y fuentes bibliográficas. El estudio muestra las contribuciones relativas

de los dos subsistemas, donde S2 predomina claramente respecto a S1 en todas las categorías de impacto. Los resultados muestran que la producción in situ de energía para cumplir con los requerimientos energéticos y térmicos del proceso de pulpa juega un papel importante en PCG, ACO, FOF y A, con más de la mitad de la contribución total. En el caso del potencial de calentamiento global (PCG) la combustión de fuel oil en el horno de cal fue responsable del 65%, seguido por la producción de productos químicos. El estudio plantea como posible solución reemplazar los combustibles fósiles por renovables.

Por su parte, la acidificación (A) está relacionada en un 67% a la producción de energía. En concreto, la unidad de recuperación química es el principal responsable de las emisiones de SO_2 debido al uso de Na_2SO_4 y el uso de fuel oil en el horno de cal. Las emisiones de SO_2 y NO_x contribuyen al 69% y 31% del impacto de acidificación, respectivamente, provenientes principalmente de la combustión de las calderas (biomasa y recuperación) y de fuel oil en horno de cal.

Para la categoría de eutroficación (E), los tratamientos de residuos, producción de energía y tratamiento de aguas, son las mayores contribuciones con 35%, 29% y 25% respectivamente. Adicionalmente, las emisiones de DQO al agua representaron más del 62% de dicho impacto. Por otro lado, las emisiones de NO_x al aire provenientes de la producción de energía contribuyeron al 33% del total del potencial de eutroficación.

La etapa de producción de insumos químicos también se ha identificado como una etapa crítica debido a su alta contribución a AEA, TH, EA, EM y ET. Específicamente la producción de H_2O_2 , NaOH y EDTA. El proceso del peróxido de hidrógeno se distingue por ser intensivo en energía. El subsistema de producción de madera S1 juega un papel menor en los impactos ambientales, aunque su contribución en FOF, A y E, debido a su alto uso de combustibles fósiles (alto grado de mecanización), así como la aplicación de fertilizantes no es despreciable.

Finalmente, el estudio califica como positivo el cambio de tecnología ECF a TCF, ya que permite

la reducción de las emisiones totales de AOX² y DQO³ hasta un 75% y 60%, respectivamente. Además, habiendo visto el dominio de S2, plantea posibles mejoras para ese subsistema. Se propone que una de las alternativas para el futuro en la digestión de la pulpa sea el uso de ozono y la deslignificación enzimática, lo que podría reducir considerablemente el consumo de agentes blanqueadores (Jawjit et al., 2007). Otra opción de mejora, en el caso de la producción de energía in situ, es la sustitución de fuel oil por gas natural, que se identifica como una alternativa atractiva ya que permitiría reducir las emisiones de SO₂, NO_x y CO₂, mitigando el impacto de PCG, A y E.

Otro estudio interesante es el de E. Lopes (Lopes et al., 2002). Su objetivo fue la identificación y evaluación de los impactos ambientales asociados con la producción, uso y disposición final de productos de imprenta y papel de escribir, producido y consumido a partir de Eucalyptus Globulus en Portugal. Las dos principales razones para realizar este estudio son determinar la contribución de los distintos procesos a los impactos ambientales y comparar estos impactos potenciales desde dos fuentes diferentes de combustibles fósiles (gas natural y fuel oil) utilizados en la producción de pulpa y energía in situ. Los límites del sistema definidos son de la cuna a la tumba, e incluyen los bosques de eucalipto y coníferas, producción de pulpa de eucalipto y coníferas, producción de papel para imprimir y escribir, disposición final (reciclaje, vertedero y compostaje), producción de reactivos químicos, transporte, producción de energía eléctrica y combustibles (incluida extracción). En este caso, la unidad funcional definida es una tonelada de papel blanco para imprimir y escribir, con un estándar de 80 g/m², producido a partir de pulpa Kraft de eucalipto. Cabe destacar que los datos de inventario fueron proporcionados por la industria de celulosa y papel, complementados a partir de la literatura. En este artículo solo se analizaron parámetros comúnmente discutidos desde un punto de vista ambiental: consumo de energía renovable y no renovable, dióxido de carbono renovable (CO₂), NO_x, dióxido de azufre (SO₂), demanda química de oxígeno (DQO) y halógenos orgánicos adsorbibles (AOX). Las categorías de impacto evaluadas son similares a las utilizadas en los estudios citados anteriormente en este capítulo.

Los resultados del estudio para la categoría de potencial de calentamiento global muestran que la mayor parte del impacto es responsabilidad de la disposición final, esto debido a las grandes

² AOX: acrónimo de Adsorbable Organic Halides; halógenos orgánicos adsorbibles.

³ DQO: acrónimo de Demanda Química de Oxígeno

emisiones de gas metano (CH_4) que se producen en los vertederos. Sin embargo, las emisiones totales de CO_2 del sistema son 8 (gas natural) a 15 (fuel oil) veces mayor que las emisiones de CH_4 , no obstante, asume un papel más importante debido a que su potencial de calentamiento global es 24,5 veces mayor que el del CO_2 . La segunda mayor contribución es la producción de energía in situ, debido a las emisiones de CO_2 . La sustitución de fuel oil por gas natural origina una disminución de alrededor un 20%, debido a la reducción de emisiones de CO_2 .

En el caso de la acidificación la producción de papel es el mayor contribuyente, esta se debe principalmente a las emisiones de SO_2 de la producción de energía. Otras etapas importantes son el transporte, producción de pulpa y producción de energía eléctrica. En el transporte, su contribución está dominada por las emisiones de NO_x , mientras que para las otras dos etapas por las emisiones de SO_2 . El cambio de escenario reduce en casi un 75% la acidificación total, principalmente por la reducción para la producción de papel a casi 0%. Las demás etapas también presentan variaciones ligeras.

Para la categoría de eutroficación la mayor contribución es la producción de pulpa, principalmente como resultado de las emisiones de DQO. El transporte y la producción de papel también son subsistemas relevantes. En el caso del transporte se debe a las emisiones de NO_x mientras que para la producción de papel a las emisiones de DQO. La eutroficación total se reduce cerca de un 20% con el cambio de combustible, debido a la disminución en la contribución de la producción de papel. Los demás subsistemas presentan ligeras variaciones.

Finalmente, el estudio llega a la conclusión de que la sustitución del fuel oil pesado por gas natural en los procesos del ciclo de vida es ambientalmente favorable, siempre y cuando se instale una unidad de cogeneración para producir energía en el proceso de fabricación. De esta forma, este proceso, que es un consumidor neto de energía, se convierte en un exportador neto al sistema eléctrico nacional, con las correspondientes emisiones “evitadas”. La sustitución de combustible reduce las emisiones totales de CO_2 , SO_2 y NO_x , lo que conduce a una menor contribución en las categorías de calentamiento global, acidificación y Eutroficación. También se disminuye el agotamiento de los recursos no renovables en más de un 45%.

Otro estudio interesante de analizar es el de X. Ma (Ma et al., 2018) en China, cuyo objetivo fue evaluar la huella hídrica de cinco papeles de pulpa Kraft de madera (especial, artístico, doméstico, con revestimiento ligero y tisú), realizar un análisis comparativo de los procesos de pulpaje y tratamiento de aguas residuales, analizar los factores claves durante las etapas del proceso productivo y proporcionar sugerencias útiles para reducir el consumo de energía, emisiones de carbono y huella hídrica durante la producción. Los límites del sistema se definen como de puerta a puerta, involucrando la adquisición de las astillas de madera, producción de pulpa y papel. Además, se consideran dos tecnologías en la etapa de blanqueo, la tradicional cloración-extracción alcalina-blanqueo con hipoclorito (CEH) y el blanqueo libre de cloro elemental (ECF). Los resultados indican que, para todos los tipos de papel, la producción a través de blanqueo CEH presenta una mayor huella hídrica. También se puede observar que para el agotamiento de recursos fósiles (ARF) y el potencial de calentamiento global (PCG), los dos principales contribuyentes son la generación de vapor y electricidad en base a carbón. Las astillas de madera, transporte y productos químicos también muestran una contribución adicional a todos los impactos ambientales estudiados. Por otro lado, el fósforo, DQO y DBO⁴, generados a partir de aguas residuales y la producción de reactivos químicos fueron los principales responsables de la eutrofización acuática. Los autores informan que el consumo energético, de agua dulce y descarga de aguas residuales, se reducen entre un 10% y 20% con el cambio de tecnología de blanqueo. Finalmente, las emisiones GEI de este estudio son inferiores a 1.500 kg CO₂ equivalente, lo que está dentro del rango de valores reportados en la literatura para la realidad europea (350 - 3.000 kg CO₂ eq). Cabe señalar que la matriz energética de China es muy diferente a la europea; en efecto, mientras en China domina ampliamente la generación en base a carbón, en Europa la energía hidroeléctrica, eólica y nuclear, tienen una contribución significativa. Esto demuestra la importancia de focalizar los estudios en la estructura energética del sistema productivo.

Finalmente, es interesante mencionar el artículo publicado por P. Jour (Jour et al., 2013) que presenta la ECV de la producción de celulosa Kraft blanqueada de eucalipto en Brasil. El objetivo del estudio fue comparar el desempeño ambiental, con enfoque en la huella de carbono, de una pulpa Kraft de eucalipto blanqueada producida de 4 formas diferentes:

⁴ DBO: acrónimo de Demanda Biológica de Oxígeno

- ECF, state of art, D_{HOT} (EPO) D D.
- ECF light, state of art, D_{HOT} (EPO) D P.
- ECF, promedio, D_{HOT} (EPO) D D.
- ECF Ozono, a Ze D P.

Para estos 4 casos se estudiaron dos escenarios con el fin de investigar las consecuencias del uso de diferentes conjuntos de datos para la producción de reactivos químicos de blanqueo.

- a) Escenario de Isla Química: se produce clorato de sodio in situ en la planta de celulosa. El beneficio de este escenario es que el clorato de sodio se produce usando energía eléctrica a partir de biomasa y no se requiere transporte.
- b) Escenario Ecoinvent: utiliza un conjunto de datos de huella de carbono para los productos químicos, dióxido de cloro (ClO_2), peróxido de hidrógeno (H_2O_2) e hidróxido de sodio (NaOH), existente en la base de datos Ecoinvent.

Cabe destacar que los cálculos de huella de carbono realizados en este estudio se excluyen las emisiones biogénicas de CO_2 , lo que significa que ni el dióxido de carbono absorbido por los eucaliptos en crecimiento ni la liberación de vuelta a la atmósfera han sido contabilizados. La liberación de este carbono ocurre al producir vapor y electricidad a partir de biomasa en la planta de celulosa. Los límites del sistema se definen como de la cuna a la puerta y se incluye la silvicultura y la producción de pulpa sin blanquear para comprender la importancia de la etapa de blanqueamiento. La electricidad utilizada para la producción de clorato de sodio y dióxido de cloro es un mix eléctrico europeo llamado UCTE, con un alto porcentaje de energía en base fósil. La recopilación de datos fue en base a datos públicos/publicados para modelar las plantaciones forestales y de eucalipto en Brasil, producción de energía y el transporte, producción de celulosa sin blanquear y producción de productos químicos. Por último, se utilizaron datos específicos del sitio para modelar los productos químicos blanqueadores como dióxido de cloro, clorato de sodio y peróxido de hidrógeno producidos por AkzoNobel. Para la secuencia ECF y ECF light, las cargas son representativas de una fábrica moderna en Brasil, mientras que para la ECF promedio, las cargas fueron calculadas en base al consumo promedio de clorato de sodio para el blanqueo de pulpa de eucalipto en Brasil. Finalmente para el ECF Ozono, se han utilizado las cargas reportadas

en literatura (Hostachy, 2010).

Para una planta de celulosa sin isla química y producción de ozono in situ, el 100% del exceso de electricidad se puede exportar a la red nacional (ie. 1.627 MJ/ton pulpa). Este exceso reemplaza la producción de electricidad correspondiente al mix de la red nacional brasileña. La huella de carbono es un poco inferior al caso en que no hay exceso de electricidad (181 kg CO₂ eq. /ton pulpa). Con una isla química, una parte del exceso de electricidad se utiliza para producir el clorato de sodio, por lo tanto, habrá menos exceso para vender a la red nacional, lo que resulta en una mayor huella de carbono (191 kg CO₂ eq./ton pulpa). Sin embargo, esto se compensa cuando se observa la huella de carbono total de la pulpa blanqueada, debido al uso de clorato de sodio/dióxido de cloro con baja huella de carbono. Cuando se ocupa el blanqueo ECF con ozono, una parte del exceso de electricidad se ocupa para la producción de ozono; por lo tanto, su huella de carbono es mayor al escenario que no incluye ozono (192 kg CO₂ eq. /ton pulpa). Si el escenario implica tanto el blanqueo con ozono y la isla química, la huella de carbono será aún mayor (202 kg CO₂ eq. /ton pulpa). La huella de carbono de la pulpa sin blanquear está fuertemente determinada por la silvicultura (43-45%) y la generación de vapor y electricidad (44-47%), con una menor contribución del transporte de madera (6-7%) y de la producción de reactivos químicos (4%). Para el escenario de la isla química (ver Anexo B) la contribución del proceso de pulpaje sin blanquear varía entre 193 y 204 kg CO₂ eq/ton pulpa blanqueada, para el proceso ECF y ECF ozono, respectivamente. Por su parte, el escenario de Ecoinvent resulta en 183 a 194 kg CO₂ eq/ton pulpa blanqueada. Esta diferencia a favor del escenario de Ecoinvent se explica por la cantidad de exceso de electricidad disponible para la exportación. Las consecuencias de producir in situ el clorato de sodio/dióxido de cloro se ven reflejadas al agregar la etapa de blanqueo. Una alternativa que se plantea para el escenario de isla química es usar el hidrógeno generado en la planta de clorato para reemplazar parte del combustible fósil empleado en el horno de cal.

Por otra parte, se observa que el blanqueo ECF de última generación ofrece la huella de carbono más baja en ambos escenarios, mientras que ECF-ozono y ECF promedio dan la mayor huella de carbono en ambos escenarios. La etapa de blanqueo (producción de químicos y proceso) contribuye entre un 15-17% en el escenario de isla química, mientras que en el escenario de Ecoinvent contribuye entre un 34-41% de la huella de carbono total para la pulpa blanqueada.

Los resultados demuestran que los aportes a la huella de carbono son muy similares para todas las secuencias de la isla química, con valores entre 36 y 41 kg de CO₂ eq/ton pulpa blanqueada, siendo la ECF de última generación la mejor alternativa y la ECF-ozono la peor. En el escenario de Ecoinvent la contribución del blanqueo es mayor, con valores entre 97 y 125 kg de CO₂ eq/ton pulpa blanqueada. También se constata que, en todas las secuencias de blanqueo, el hidróxido de sodio y el dióxido de cloro son los máximos contribuyentes.

Esta revisión de literatura demuestra la amplia variabilidad que existe entre los resultados de ECV para diferentes procesos y realidades locales, principalmente en relación con la matriz energética. Ello refuerza la necesidad de llevar a cabo estudios basados en datos primarios que reflejen la realidad nacional.

4. Metodología

En este capítulo se presenta la metodología utilizada en este trabajo, siguiendo los lineamientos de la Norma internacional ISO 14040-44:2006, la cual se encuentra ampliamente documentada y se detalla en el Anexo C. En primer lugar, se resume el procedimiento de búsqueda de información relacionada con los ECV para la producción de celulosa. En segundo lugar, se describe la realización del inventario. Luego, se describen los modelos de impacto utilizados en este trabajo. Finalmente, se detallan los cálculos para los distintos escenarios analizados para la producción de celulosa.

4.1. Enfoque metodológico

La metodología de trabajo utilizada para la realización de este trabajo se basa en los lineamientos de la Norma NCh-ISO 14040-44 que establece el marco metodológico para la Evaluación de Ciclo de Vida de la Organización Internacional de Estándares, ISO (homologada en Chile por el Instituto Nacional de Normalización, INN). El procedimiento utilizado se divide principalmente en cuatro etapas y se describe en el Anexo C.

4.1.1. Recopilación de información general para realizar el estudio

Se llevaron a cabo búsquedas de información relacionadas al proceso de producción de celulosa ECF, estudios acerca de los impactos ambientales y ECV de dicho sector productivo. Para la recopilación de esta información se utilizaron diferentes buscadores y bases de datos como: Scopus, Web of Science (WOS), Google, entre otros. Las palabras claves utilizadas en estos buscadores son: “Cellulose production”, “life cycle assessment”, “environmental impact assessment”, “cellulose inventory analysis”, entre otros.

4.1.2. Datos para realizar el inventario de ciclo de vida

Se obtuvo información de los consumos de insumos materiales y energéticos de una planta de producción de celulosa existente en la Región del Biobío, correspondiente al año 2018. Estos datos se normalizaron para cuantificar dichos requerimientos por cada tonelada de pulpa blanqueada

seca al aire, que corresponde a la unidad funcional utilizada en este trabajo.

Los aspectos e impactos ambientales asociados a la producción de los diferentes insumos fueron obtenidos utilizando el software Simapro y la base de datos Ecoinvent. La Tabla 1 presenta un listado de los procesos de Ecoinvent que fueron empleados para describir los diferentes insumos requeridos en la producción de celulosa ECF, a saber, ácido sulfúrico, cal, clorato de sodio, hidróxido de sodio, metanol, oxígeno líquido, peróxido de hidrógeno, diésel, fuel oil, gas natural licuado, sistemas de transporte, producción de madera y generación de electricidad

Tabla 1. Procesos originales de la base de datos de Ecoinvent. (Elaboración propia)

Nombre del proceso original en Ecoinvent
sulfuric acid {CL} smelting of copper concentrate, sulfide ore APOS, U.
Quicklime, milled, loose {RoW} production APOS, U.
Sodium chlorate, powder {RoW} production APOS, U.
Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {RoW} chlor-alkali electrolysis, membrane cell APOS, U.
Methanol {GLO} production APOS, U.
Oxygen, liquid {RoW} air separation, cryogenic APOS, U.
Hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state {RoW} hydrogen peroxide production, product in 50% solution state APOS, U.
Diesel {BR} diesel production, petroleum refinery operation APOS, U.
Heavy fuel oil {BR} heavy fuel oil production, petroleum refinery operation APOS, U.
Liquefied petroleum gas {BR} liquefied petroleum gas production, petroleum refinery operation APOS, U.
Natural gas, high pressure {RoW} natural gas production APOS, U.
Transport, truck >20t, EURO4, 100%LF, empty return/GLO Mass.
Transport, freight train, diesel, container, 100%LF, flat terrain, default/GLO Mass.
Transport, sea ship, 10000 DWT, 100%LF, middle, empty return/GLO Mass.
Pulpwood, softwood, measured as solid wood under bark {RoW} softwood forestry, pine, sustainable forest management APOS, U.
Electricity, high voltage {CL} production mix APOS, U.

En el caso de la generación eléctrica, se actualizó la base de datos Ecoinvent para la matriz eléctrica chilena, en base a la generación del año 2018, que corresponde al mismo año de los datos utilizados para elaborar el inventario de ciclo de vida de este estudio. Para esto se utilizaron los reportes mensuales de la Comisión Nacional de Energía (CNE), a partir de los cuales se construyó la matriz del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) para el año 2018, detallada en la Tabla 2 siguiente.

Tabla 2. Distribución mensual de energía por tipo de fuente para el año 2018. (Elaboración propia)

Distribución de energía por fuente 2018														
Fuente/Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	total anual	Fracción por Fuente
Carbón	2.696	2.285	2.533	2.618	2.839	2.593	2.771	2.721	2.568	1.938	1.653	2.078	29.293	0,39
Diésel	-	-	-	-	-	65	-	130	-	-	61	-	256	0,00
Gas natural	723	1.082	1.299	1.096	1.355	1.426	924	1.231	836	500	551	550	11.574	0,15
Eólica	263	241	325	244	258	324	330	324	358	375	306	367	3.714	0,05
Solar fotovoltaica	460	421	455	365	323	324	330	389	478	500	551	550	5.146	0,07
Biomasa	263	241	195	244	258	194	198	194	179	188	122	122	2.398	0,03
Hidráulica de pasada	1.249	1.022	909	731	710	843	924	777	956	1.313	1.470	1.406	12.309	0,16
Hidráulica de embalse	921	722	780	792	710	713	1.121	713	597	1.438	1.408	1.039	10.952	0,14
Total [GWh]	6.575	6.013	6.496	6.089	6.452	6.482	6.597	6.479	5.972	6.250	6.123	6.113	75.641	1,00

Para cada uno de los procesos descritos en la Tabla 1 que se realizan en Chile, se reemplazó la fuente de electricidad por la correspondiente a la matriz del SEN de 2018. De este modo, el perfil ambiental obtenido en cada caso refleja una parte significativa de la realidad nacional.

4.1.3. Selección del modelo de evaluación de impacto ambiental

Para realizar esta evaluación se utilizan las categorías de impactos ambientales intermedios y finales del modelo ReCiPe. Las categorías de impacto ambiental intermedios del modelo ReCiPe utilizadas aquí son:

- Calentamiento global
- Agotamiento de ozono estratosférico
- Formación de partículas finas
- Acidificación terrestre
- Eutroficación de agua dulce
- Eutroficación marina
- Toxicidad cancerígena humana
- Toxicidad humana no cancerígena
- Escasez de recursos minerales
- Escasez de recursos fósiles
- Consumo de agua

Las categorías de impacto ambiental finales del modelo de ReCiPe son:

- Daño a la salud humana
- Daño al ecosistema
- Daño a los recursos

Las características y aspectos cuantitativos de estas categorías de impacto se encuentran plenamente documentadas en literatura por lo que no serán detalladas acá (Huijbregts et al., 2017).

4.1.4. Cálculos para distintos escenarios en la producción de celulosa ECF

El primer escenario fue agregar al ECV de la producción de celulosa los inventarios e impactos ambientales asociados a la construcción de la infraestructura de la planta, considerando un tiempo

de vida útil de 30 años, en base a datos de Ecoinvent. Esto permite cuantificar la contribución del “factor de planta de celulosa” al perfil ambiental de la celulosa y evaluar su nivel de significancia.

El segundo escenario fue reemplazar el fuel oil por gas natural, como se propone en los estudios de literatura reportados en el Capítulo 3 (González-García et al., 2009; Jour et al., 2013; Lopes et al., 2002). Los cálculos para determinar la cantidad de gas natural requerido en este escenario se presentan en el Anexo D.

El tercer escenario estudiado es el reemplazo de la matriz eléctrica actual del SEN por una basada en la matriz energética proyectada al año 2030, con 100% de fuentes renovables, de acuerdo a la “Hoja de ruta para una transición energética acelerada” del Coordinador Eléctrico Nacional (Coordinador Eléctrico Nacional, 2022). La Tabla 3 muestra la hipotética distribución de generación eléctrica para las diferentes fuentes renovables, basadas en dichas proyecciones:

Tabla 3. Distribución de energía para la construcción de matriz renovable 2030. (Elaboración propia)

Tipo de energía	porcentaje 2030
Geotérmica	3
Hidráulica de pasada	7,5
Hidráulica de embalse	7,5
Biomasa	2
Eólica	30
Solar Fotovoltaica	35
Concentración Solar	15

En dicho escenario, la matriz energética del 2018 se reemplazó con esta matriz renovable para cada uno de los procesos unitarios utilizados para la celulosa ECF.

5. Resultados y discusión

En este capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos para la producción de celulosa ECF en Chile. Primeramente, a modo de introducción se define el objetivo y alcance, límites del sistema y unidad funcional de este estudio. Posteriormente, se detalla el análisis de inventario para el proceso estudiado, seguido de los resultados de evaluación de impacto correspondientes a las diferentes etapas del ciclo de vida (ie. producción de madera, insumos químicos y combustibles, transportes, generación de electricidad en el SEN y producción de celulosa ECF propiamente tal). Finalmente, se detallan algunos escenarios alternativos estudiados para mejorar el desempeño ambiental del proceso de producción de la celulosa en Chile.

5.1. Objetivo y alcance

El objetivo de este estudio es analizar y cuantificar el impacto ambiental asociado a la producción de celulosa por tecnología de blanqueo ECF a partir de pino, con el fin de identificar aquellos procesos que conllevan los mayores impactos ambientales a lo largo de la cadena productiva. El estudio utiliza datos correspondientes a las condiciones de operación de una planta tipo de Chile.

5.2. Límites del sistema

Los límites del sistema estudiado aquí se definen como de la cuna a la puerta. Estos incluyen desde la producción de materias primas, tales como: madera, insumos químicos, electricidad y combustibles; transporte de estos materiales, hasta la producción de celulosa ECF propiamente tal. En la figura 4 se ilustran los límites del sistema. Cabe señalar que la electricidad producida por el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) es utilizada en todos los procesos productivos que se realizan dentro del territorio nacional, tales como, producción de clorato de sodio, hidróxido de sodio, metanol, peróxido de hidrógeno y ácido sulfúrico.

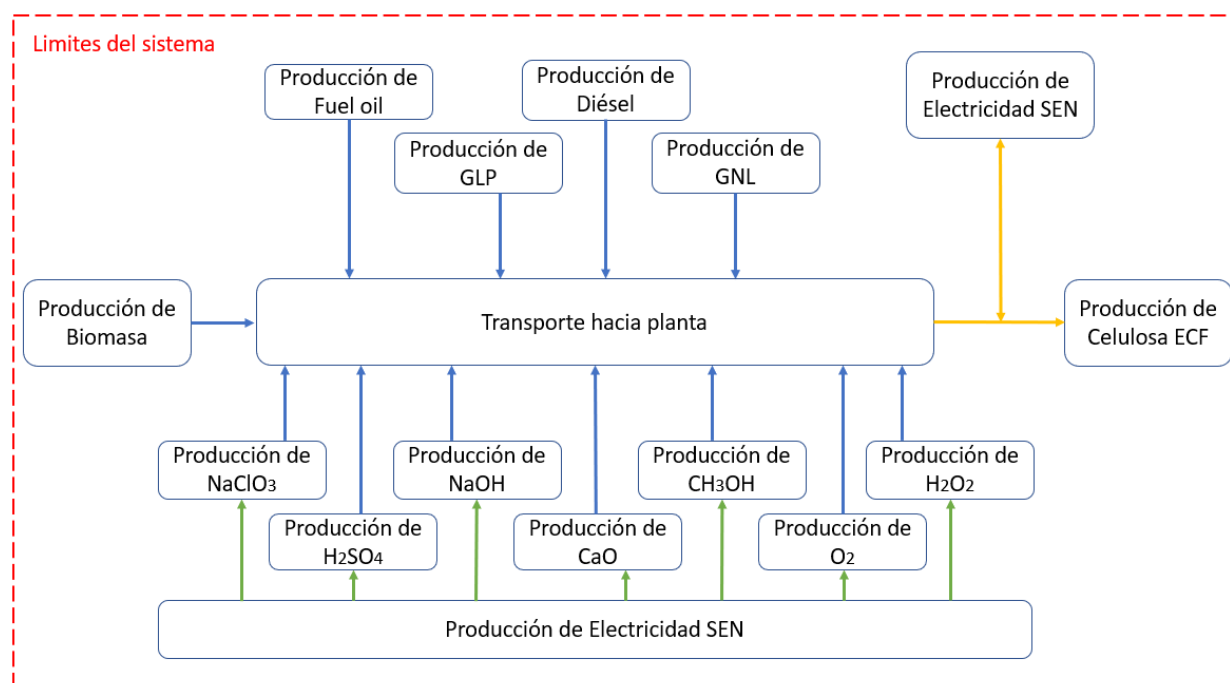


Figura 4. Límites del sistema. (Elaboración propia)

5.3. Unidad funcional

La unidad funcional definida en este estudio es de una tonelada de celulosa ECF secada al aire, con 10% de humedad. La elección de esta unidad funcional se ajusta a la literatura analizada con el fin de comparar los resultados obtenidos posteriormente.

5.4. Análisis de inventario

Los datos para construir el inventario fueron facilitados por una de las principales empresas forestales del país, correspondientes a una planta local de la Región del Biobío, para el periodo de producción del año 2018. En la tabla 4 se muestra los datos de inventario, con los consumos específicos por cada tonelada de pulpa blanca ECF seca al aire.

Tabla 4. Datos para análisis de inventario. Unidad Funcional: 1 ton celulosa seca al aire. (Elaboración propia)

Materiales	Valor	Unidad/ton pulpa
Madera de Pino	3,5	ton
Energía		
Electricidad neta	-303,3	kWh
Combustibles		
Gas Natural Licuado (GNL)	4,8	m ³
Diésel	7*10 ⁻⁴	ton
Gas Licuado de Petróleo (GLP)	3,3*10 ⁻³	ton
Fuel oil	8,5*10 ⁻²	ton
Productos químicos		
Ácido Sulfúrico (H ₂ SO ₄)	4,7*10 ⁻²	ton
Clorato de sodio (NaClO ₃)	3,3*10 ⁻²	ton
Cal viva (CaO)	4,3*10 ⁻²	ton
Metanol (CH ₃ OH)	3,1*10 ⁻³	ton
Oxígeno líquido (O ₂)	3,1*10 ⁻²	ton
Peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂)	1,3*10 ⁻³	ton
Hidróxido de sodio (NaOH)	8,7*10 ⁻²	ton
Transporte		
Camión	1.450	tkm
Ferrocarril	42,4	tkm
Barco	29,3	tkm

Algunas consideraciones al momento de construir este inventario fueron:

- La electricidad neta es la diferencia entre la electricidad producida en la planta, mediante biomasa, que se vende al Sistema Eléctrico Nacional (SEN) y la electricidad comprada al SEN. El signo negativo indica que, en este caso, existe un excedente neto de electricidad que se entrega a la red pública.
- Algunos productos químicos tienen distintos orígenes y medios de transporte para llegar a la planta. Se agruparon por cantidades y por tipo de transporte.
- Se consideró una distancia entre la planta y la plantación forestal de 114 km.
- La cantidad de Diésel corresponde a la usada en equipos electrógenos, móviles y calderas. La cantidad de GLP (Gas Licuado de Petróleo) corresponde a consumos en calderas, hornos y equipos móviles. El consumo de GNL (Gas Natural Licuado) y fuel oil es exclusivo en hornos y calderas.
- Los transportes corresponden a los productos químicos y biomasa.
- No se consideran productos secundarios.

5.5. Evaluación de impacto ambiental

La ECV de la producción de celulosa ECF se divide en los procesos ilustrados en la Figura 4. A continuación, se presentan los resultados de cada uno de los procesos involucrados en la producción de celulosa. Los resultados presentados aquí solo consideran las etapas que contribuían en más de un 5% a alguna categoría de impacto. Además, para efectos de visualización de los resultados normalizados fue excluida la categoría de toxicidad cancerígena humana, debido al orden de magnitud mucho mayor con respecto a las demás categorías.

En cada caso, se presentan de manera gráfica los resultados de evaluación de impactos intermedios y finales normalizados. Primeramente, se ilustran las contribuciones de los diferentes procesos dentro de cada categoría de impacto y, luego, las comparaciones utilizando factores de normalización, de acuerdo con la metodología utilizada en Simapro.

5.5.1. Producción de biomasa

Los impactos ambientales asociados a la producción de biomasa fueron obtenidos de la base de datos de Ecoinvent, donde se incluye la preparación del sitio, plantación, producción de plántulas, operaciones de cuidado, crecimiento, limpieza y cosecha, además del mantenimiento y construcción de caminos forestales, y secado antes del transporte. Los resultados para este proceso se muestran en la Figura 5 para impactos intermedios y en la Figura 6 para impactos finales. Las tablas detalladas con los resultados para la producción de 1 m³ de madera de pino se encuentran en el anexo A.

Figura 5. Resultados evaluación de ciclo de vida para la producción de 1 m³ de madera de pino. Impactos intermedios.

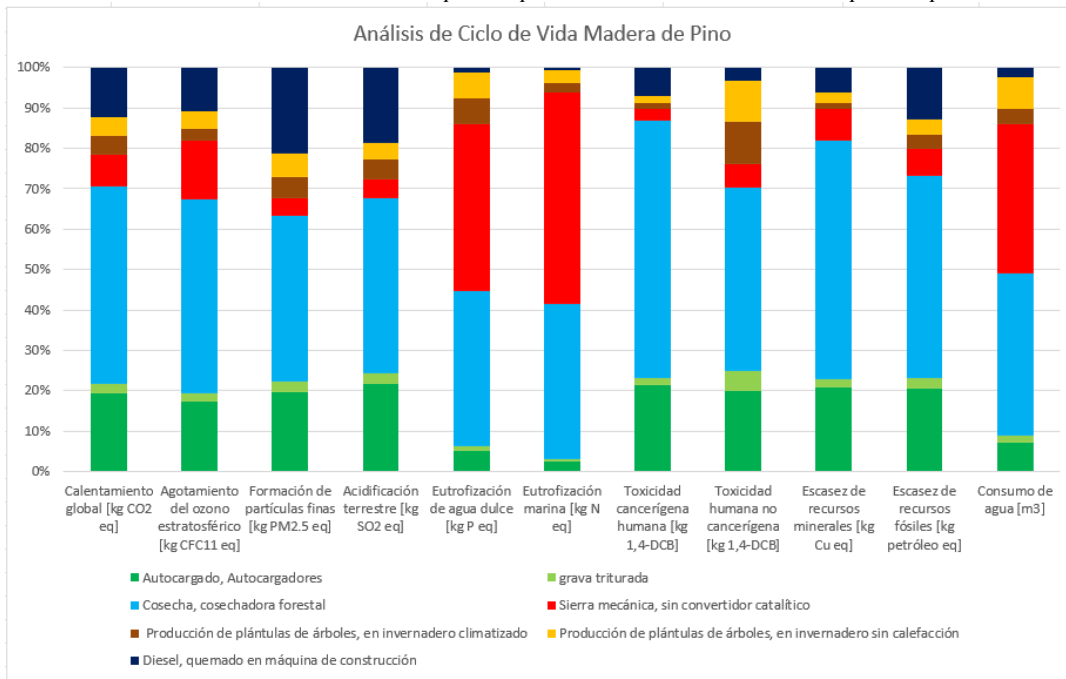


Figura 6. Resultados análisis de ciclo de vida para la producción de 1 m³ de madera de pino. Impactos finales.

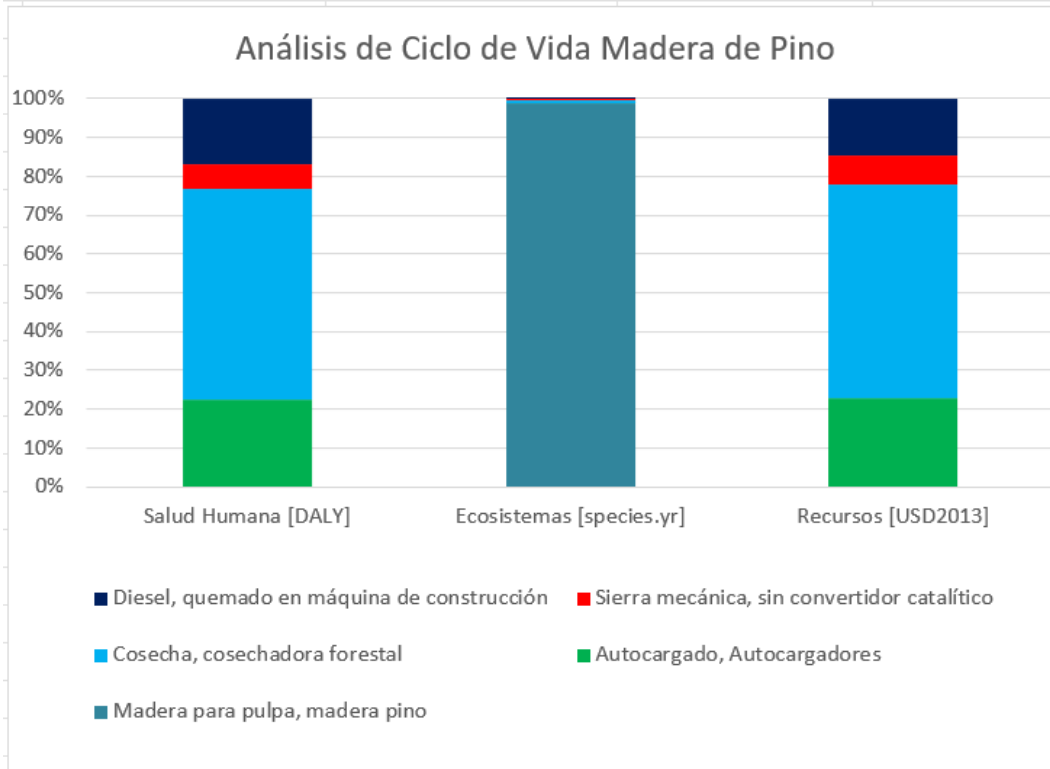
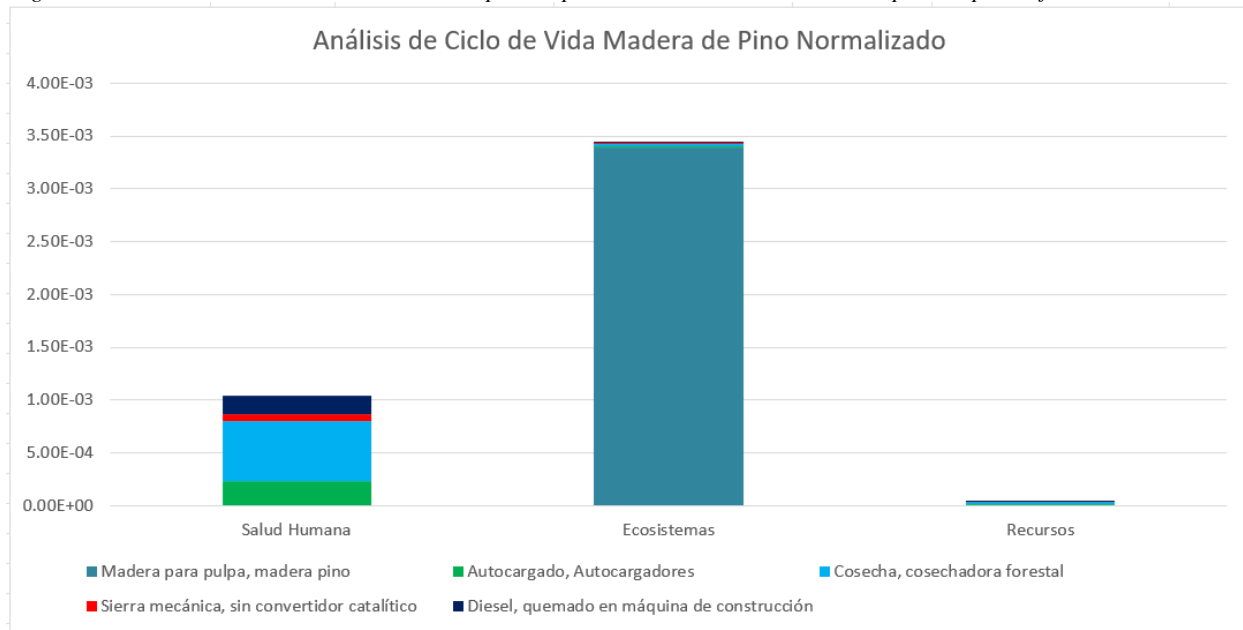


Figura 8. Resultados evaluación de ciclo de vida para la producción de 1 m³ de madera de pino. Impactos finales normalizados.



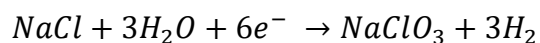
Las categorías de eutroficación de agua dulce, escasez de recursos fósiles y calentamiento global son las más importantes de este proceso. Se vuelve a observar el dominio de la etapa de cosecha en los impactos intermedios, mientras que en los impactos finales se observa que el mayor daño de este proceso es hacia el ecosistema.

5.5.2. Producción de insumos químicos

Los impactos intermedios y finales correspondientes a los insumos químicos se detallan en el Anexo A. A continuación, se incluye una breve descripción de los procesos utilizados extraídos de la base de datos de Ecoinvent.

Producción de Clorato de sodio (NaClO₃)

El clorato de sodio es un sólido blanco, higroscópico y cristalino, que se usa en la fabricación del dióxido de cloro (ClO₂). Su proceso de fabricación se basa en la electrólisis de una solución acuosa de cloruro de sodio, de acuerdo con la siguiente reacción:



El proceso que se encuentra en Ecoinvent incluye la purificación de salmuera, el secado final de los cristales de clorato de sodio y la producción de gas hidrógeno. Se incluye el procesamiento de materias primas, el consumo de auxiliares y energía eléctrica, infraestructura y uso de suelo, así como las emisiones al aire y al agua. El hidrógeno no se considera un subproducto del proceso, sino una emisión al aire. En el anexo A se pueden observar las tablas de resultado para la producción de 1 ton de clorato de sodio.

Producción de ácido sulfúrico (H_2SO_4)

El proceso extraído de la base de datos de Ecoinvent está basado en la producción de ácido sulfúrico en Chile, a partir del procesamiento del concentrado de sulfuro de cobre, donde se genera ácido sulfúrico como subproducto de la oxidación del SO_2 catalizada con pentóxido de vanadio. Se incluyen dentro del proceso la obtención del concentrado de cobre y su fundición, entre otros. En el anexo A se pueden observar las tablas de resultado para la producción de 1 ton de ácido sulfúrico.

Producción de Hidróxido de sodio (NaOH)

La producción de cloro e hidróxido de sodio modelada en Ecoinvent se basa en la electrólisis de cloro-álcali utilizando una celda de membrana. Este proceso es la tecnología utilizada en Chile para la producción de cloro molecular e hidróxido de sodio. Además del proceso de electrólisis en una celda de membrana, en donde se necesita una gran cantidad de energía eléctrica, se incluye la producción de salmuera, purificación de salmuera, resaturación de salmuera, así como el manejo final de los productos de electrólisis, sin la licuefacción del cloro. En el anexo A se pueden observar las tablas de resultado para la producción de 1 ton de hidróxido de sodio.

Producción de Cal viva (CaO)

La cal viva se utiliza en el proceso de recuperación de reactivos, tal como se describió en la sección 3.1.2. El proceso modelado en Ecoinvent incluye los procesos de producción de cal viva en trozos,

trituration, molienda, filtrado, eliminación de polvo, transporte y almacenamiento. En el anexo A se pueden observar las tablas de resultado para la producción de 1 ton de cal viva.

Producción de Oxígeno líquido (O₂)

El proceso de la base de datos de Ecoinvent representa la producción de nitrógeno, oxígeno y argón licuados mediante la separación criogénica del aire. La separación criogénica del aire es actualmente la tecnología más eficiente y rentable para producir grandes cantidades de oxígeno, nitrógeno y argón como productos líquidos o gaseosos. La fracción de salida está basada en la composición del aire (1.4% Argón, 23.1% Oxígeno y 75.5% Nitrógeno). Se incluye la entrada de electricidad para el procesamiento, el agua de enfriamiento y la infraestructura para la planta de separación de aire. En el anexo A se pueden observar las tablas de resultado para la producción de 1 ton de oxígeno líquido.

Producción de Peróxido de hidrógeno (H₂O₂)

El proceso modelado en Ecoinvent incluye las entradas de materiales y energía, así como la producción de desechos y emisiones por el proceso de autooxidación. El proceso de autooxidación o antraquinona es la técnica más común para la producción de peróxido de hidrógeno. En el anexo A se pueden observar las tablas de resultado para la producción de 1 ton de peróxido de hidrógeno.

Producción de Metanol (CH₃OH)

Ecoinvent representa la producción de metanol a partir de gas natural. El proceso se inicia cuando las materias primas ingresan al proceso y finaliza con la producción de metano, e incluye el consumo de materias primas y energía, uso de catalizador, emisiones al aire y agua, así como el uso de la infraestructura. No incluye el uso de CO₂ y se supone que el hidrógeno que se produce durante el proceso se quema en el horno. En el anexo A se pueden observar las tablas de resultado para la producción de 1 ton de metanol.

A continuación, se presentan las Figuras 9 y 10 donde se ilustran los resultados de impactos ambientales intermedios y finales respectivamente, mostrando la contribución porcentual de cada insumo químico a cada categoría de impacto.

Figura 9. Resultados evaluación de ciclo de vida para la producción de insumos químicos. Impactos intermedios.

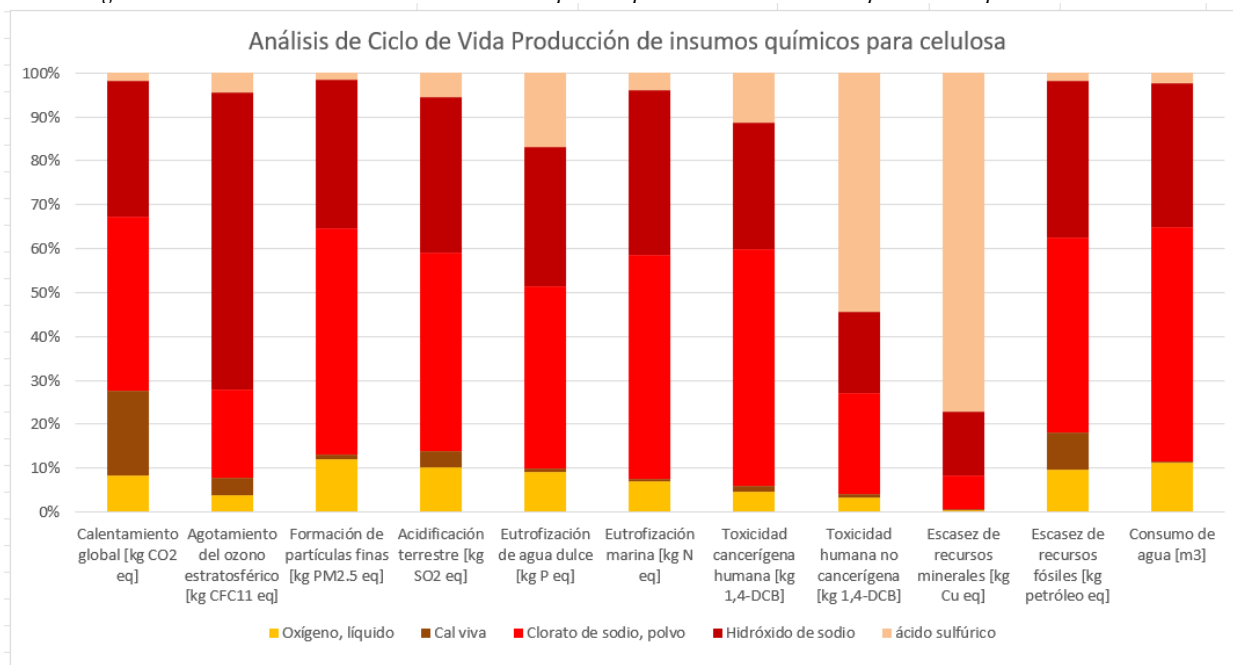
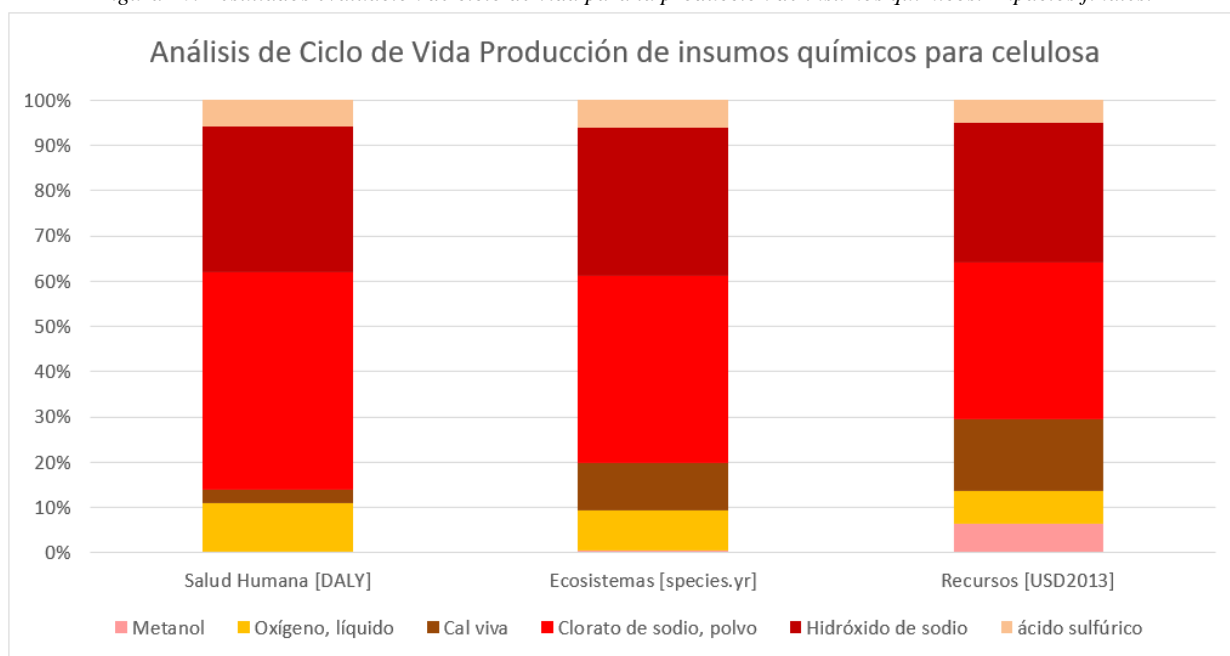


Figura 10. Resultados evaluación de ciclo de vida para la producción de insumos químicos. Impactos finales.



En ambos gráficos se observa un amplio dominio de la producción de clorato de sodio, seguido de la producción de hidróxido de sodio en todas las categorías de impacto, lo cual se debe a la gran cantidad de energía eléctrica que consumen estos procesos. En el caso del clorato de sodio, la electricidad es la responsable entre un 10-90% en las categorías de impacto intermedio, mientras que, para el hidróxido de sodio, la electricidad aporta entre un 15-95% en todas las categorías de impacto ambiental.

En las Figuras 11 y 12 se presentan los resultados normalizados para impactos intermedios y finales.

Figura 11. Resultados evaluación de ciclo de vida para la producción de insumos químicos. Impactos intermedios normalizados.

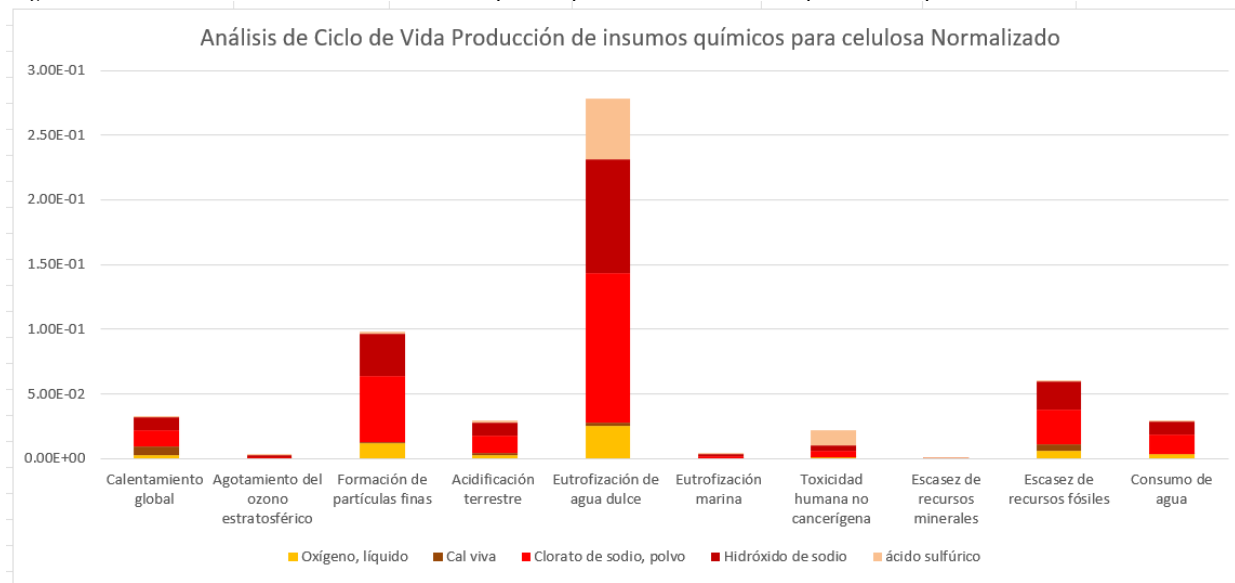
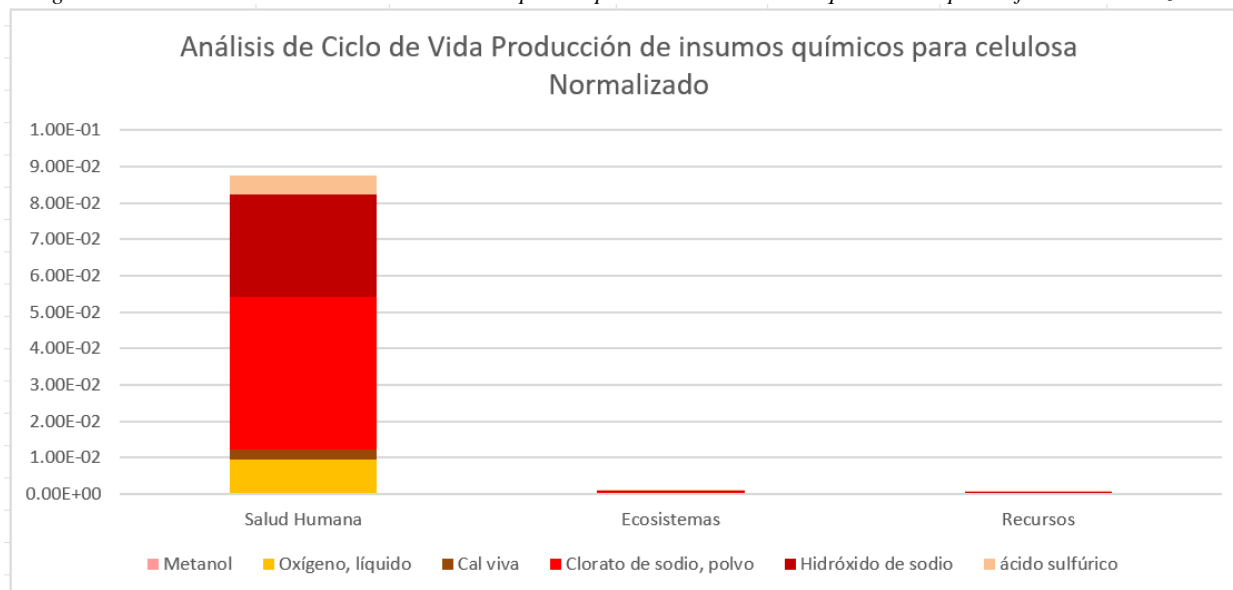


Figura 12. Resultados evaluación de ciclo de vida para la producción de insumos químicos. Impactos finales normalizados.



En la Figura 11 se observa que las categorías de eutroficación de agua dulce, formación de partículas finas y escasez de recursos fósiles son las categorías más afectadas por los procesos de producción de los distintos insumos químicos. Mientras que para las categorías de impactos finales se observa un considerable daño a la salud humana comparado con los daños al ecosistema y recursos. Los procesos de electrólisis y su gran requerimiento de energía eléctrica son responsables de estos resultados para la producción de insumos químicos para la celulosa; por este motivo, resulta interesante plantear una matriz energética renovable como se analizará más adelante. En el Anexo A se pueden observar las tablas de resultado para la producción de insumos químicos para celulosa.

5.5.3. Producción de combustibles

Producción de diésel, fuel oil y gas licuado de petróleo (GLP).

El proceso modelado en Ecoinvent se basa en el funcionamiento de una refinería de petróleo típica en Brasil. Este modelo de refinería se inicia con la entrada del crudo a la refinería de petróleo e incluye el tratamiento de aguas residuales, suministro de agua dulce desde la naturaleza, infraestructura de la refinería, almacenamiento de petróleo crudo y productos en los terrenos de la refinería y suministro de energía, finalizando con la salida de los productos de refinería. En el

anexo A se pueden observar las tablas de resultado para la producción de 1 ton de diésel, fuel oil y GLP.

Producción de Gas Natural Licuado (GNL)

El proceso modelado en Ecoinvent incluye el tratamiento de gas natural para remover la humedad y otras sustancias contaminantes, como el azufre. En Chile, solo se encuentran reservas explotables en la Región de Magallanes, por lo que se reemplazó el suministro eléctrico por el correspondiente al Sistema Eléctrico de Magallanes (SEM) y así considerar condiciones propias de la realidad nacional. En el anexo A se pueden observar las tablas de resultado para la producción de 1 m³ de Gas Natural Licuado.

En las Figuras 13 y 14 se presentan los resultados para los impactos ambientales intermedios e impactos finales, respectivamente, donde se muestra la contribución porcentual de cada insumo energético a cada categoría de impacto, asociado al proceso de producción de celulosa.

Figura 13. Resultados evaluación de ciclo de vida para la producción de combustibles. Impactos intermedios.

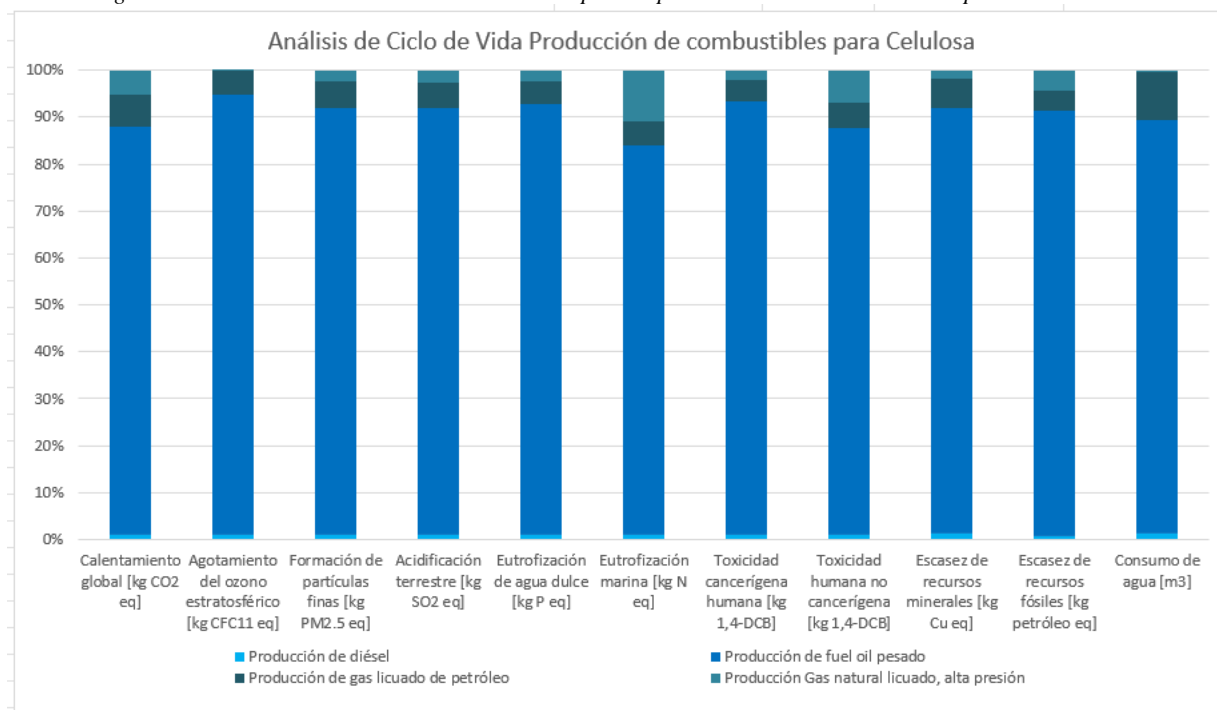
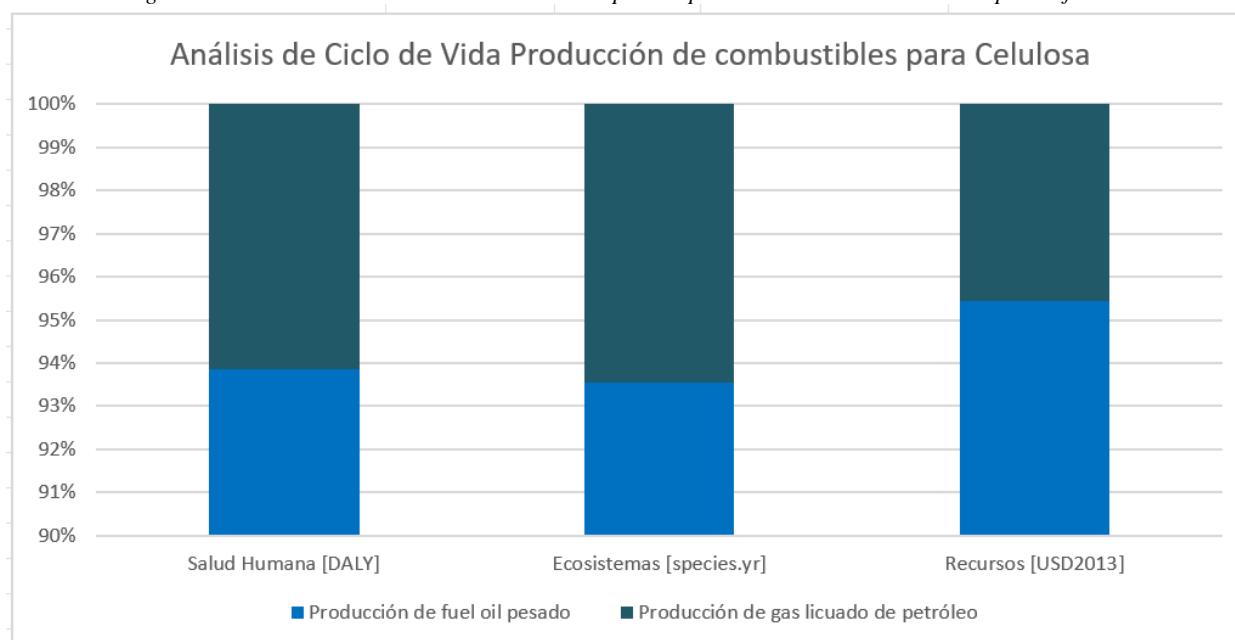


Figura 14. Resultados evaluación de ciclo de vida para la producción de combustibles. Impactos finales.



En ambas figuras se observa una contribución por sobre el 80% para todas las categorías de impacto por parte de la producción de fuel oil. Estos resultados se deben a la gran cantidad de fuel oil que se ocupa en el proceso con respecto a los demás combustibles. Dentro del proceso de fuel oil la producción de petróleo desde el yacimiento hasta su transporte a la planta es la etapa que más contribuye a todas las categorías de impacto, entre un 80 a 100%, excepto para el consumo de agua, donde las operaciones de refinería son responsables del 95% del consumo.

Las Figuras 15 y 16 presentan los resultados normalizados para los impactos ambientales intermedios y finales, respectivamente, se muestra la importancia relativa de las diferentes categorías de impacto, para los insumos energéticos de la producción de celulosa

Figura 15. Resultados evaluación de ciclo de vida para la producción de combustibles. Impactos intermedios normalizados.

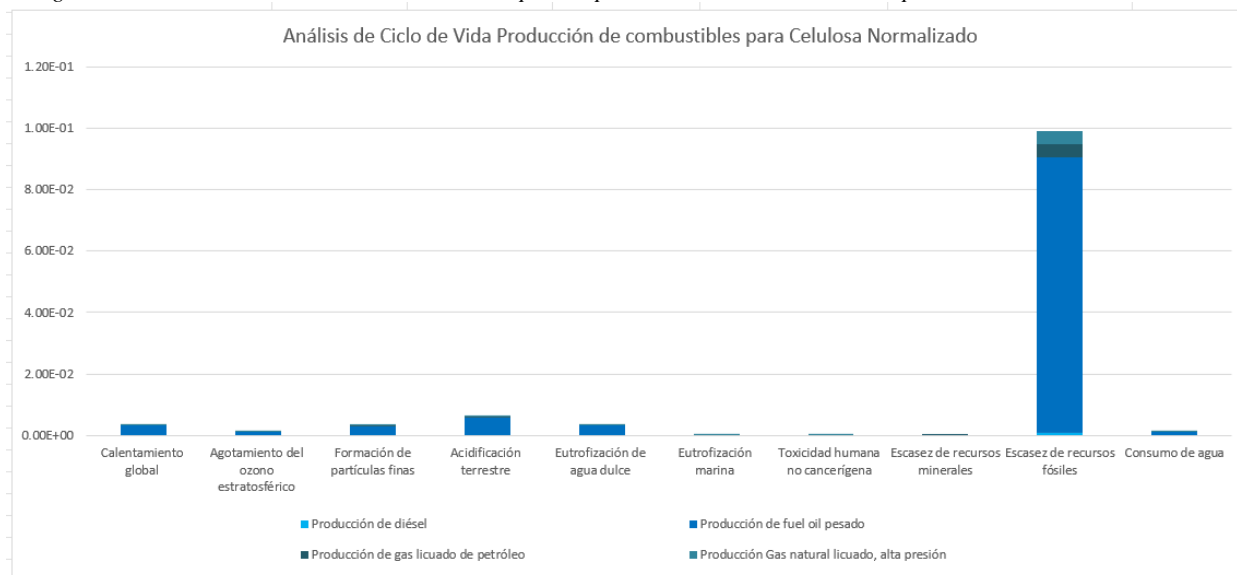
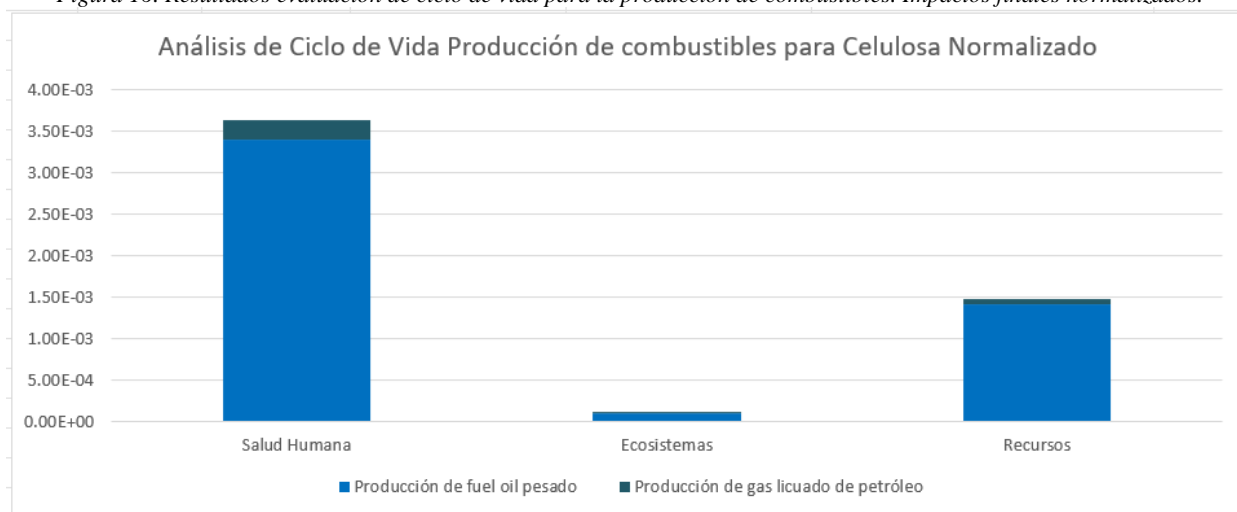


Figura 16. Resultados evaluación de ciclo de vida para la producción de combustibles. Impactos finales normalizados.



Nuevamente el dominio del fuel oil se observa claramente tanto en impactos intermedios como impactos finales. Los resultados normalizados para impactos intermedios cumplen con la lógica de que la escasez de recursos fósiles sea la categoría más alta, seguida por la acidificación terrestre y el calentamiento global. En las tres categorías, la producción del crudo es la etapa que más contribuye. En lo que respecta a los impactos finales se observa que la categoría de daño a la salud es la más afectada, también debido a la etapa de producción del crudo. Para mayor detalle en el anexo A se encuentran las tablas de resultado de la producción de combustibles para celulosa.

5.5.4. Transporte hacia planta

Transporte en camión

Este proceso describe el transporte de 1 tkm (tonelada-kilómetro) por camión, promedio global. El consumo de combustible para el transporte por carretera se basa en datos de actividad primarios de múltiples tipos de vehículos, aunque no se incluye la fabricación del camión. Se utiliza un tipo de camión grande, mayor a 20 toneladas, con un estándar de emisión EURO4, un factor de carga del 100% (LF) y considerando un retorno vacío. En el Anexo A se encuentran las tablas de resultados para el transporte de 1 tkm en el camión especificado.

Transporte en tren

Este proceso describe el transporte de 1 tkm por tren, promedio global. Se utiliza un tren de carga, en base a diésel, que transporta contenedores con un factor de carga del 100%, sobre un terreno llano y se supone que el tren de contenedores nunca retorna vacío. En el Anexo A se encuentran las tablas de resultados para el transporte de 1 tkm en el tren especificado.

Transporte en Barco

Este proceso describe el transporte de 1 tkm por barco, promedio global, utilizando fuel oil pesado como combustible. El consumo de combustible se basa en la capacidad de carga del barco, el factor de carga y la distancia. La capacidad de carga se define en DWT (acrónimo de “dead weight tonnage”), que significa “tonelaje de peso muerto” y es una medida de uso común para describir cuanto peso transporta o puede transportar un barco de manera segura. El barco que se utiliza tiene una capacidad de 10,000 DWT, con factor de carga de 100%, con recorrido medio (entre 5,000 y 10,000 km) y considera un retorno vacío. En el Anexo A se encuentran las tablas de resultados para el transporte de 1 tkm en el tipo de barco especificado.

En las Figuras 17 y 18 se presentan los resultados para el transporte total hacia la planta de celulosa para impactos intermedios y finales, respectivamente, ilustrando la contribución porcentual de

cada medio de transporte a las categorías de impacto asociadas a la producción de celulosa.

Figura 17. Resultados evaluación de ciclo de vida para el transporte hacia la planta de celulosa. Impactos intermedios.

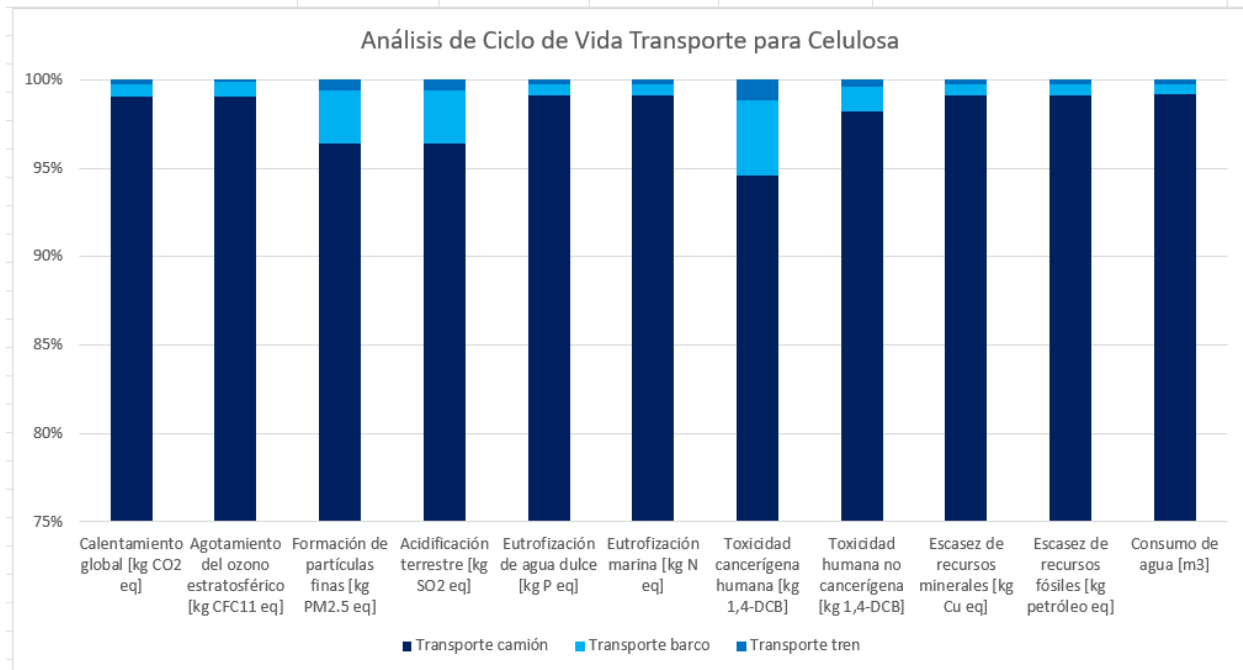
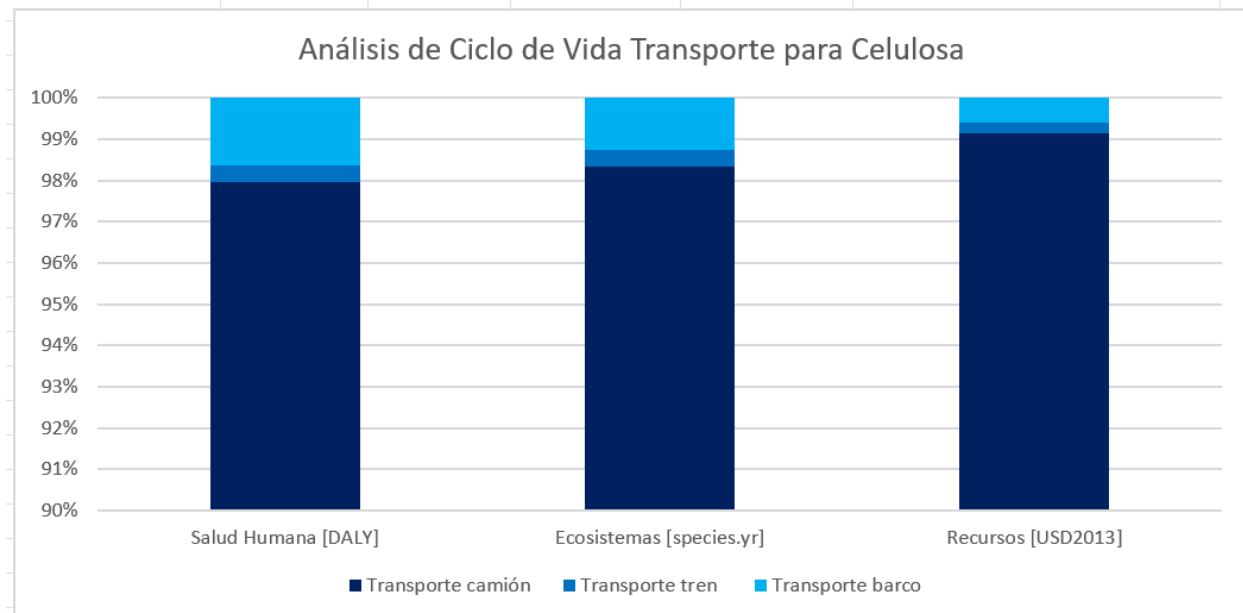


Figura 18. Resultados evaluación de ciclo de vida para el transporte hacia la planta de celulosa. Impactos finales.



En ambas figuras se observa que la contribución mayoritaria es del transporte por camión. Esto se debe a que las toneladas-kilómetro transportadas en camión superan ampliamente las correspondientes a los otros medios de transporte.

En las Figuras 19 y 20 se presentan los resultados normalizados para el transporte utilizado en la producción de celulosa, donde se ilustra la importancia relativa de cada categoría de impacto.

Figura 19. Resultados evaluación de ciclo de vida para el transporte hacia la planta de celulosa. Impactos intermedios normalizados.

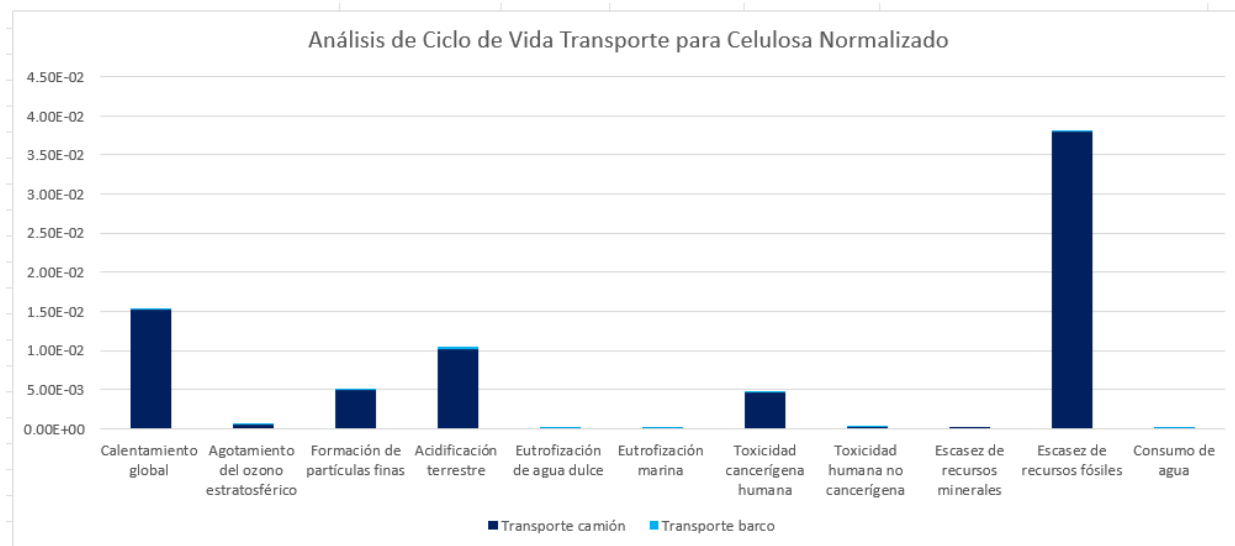
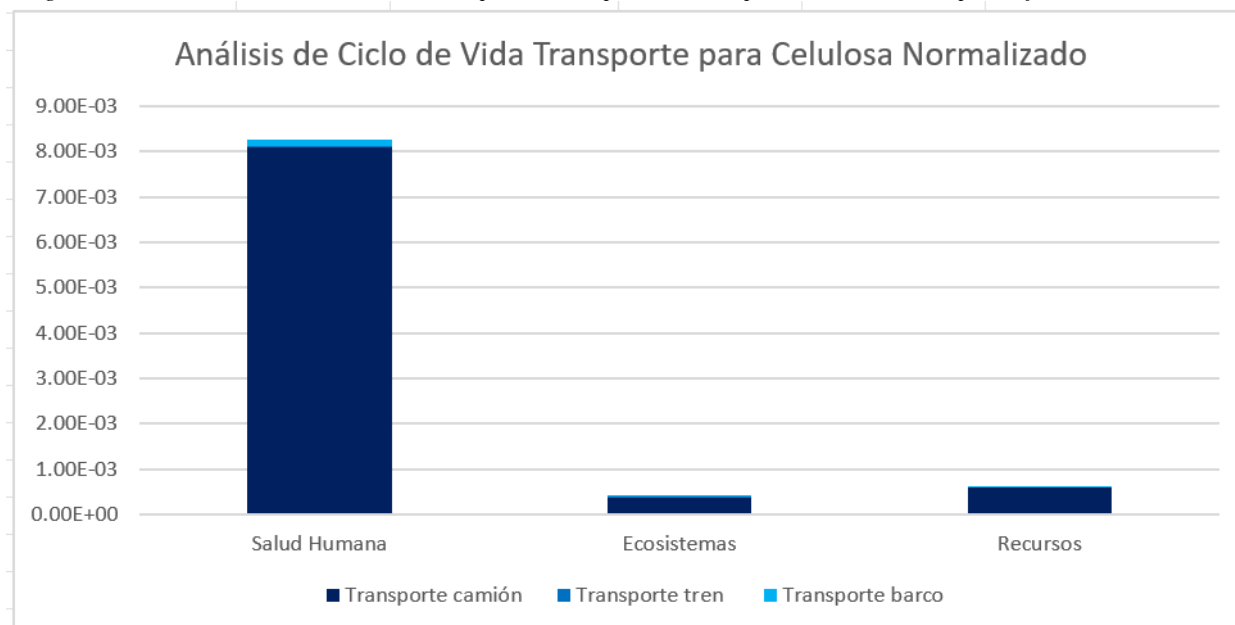
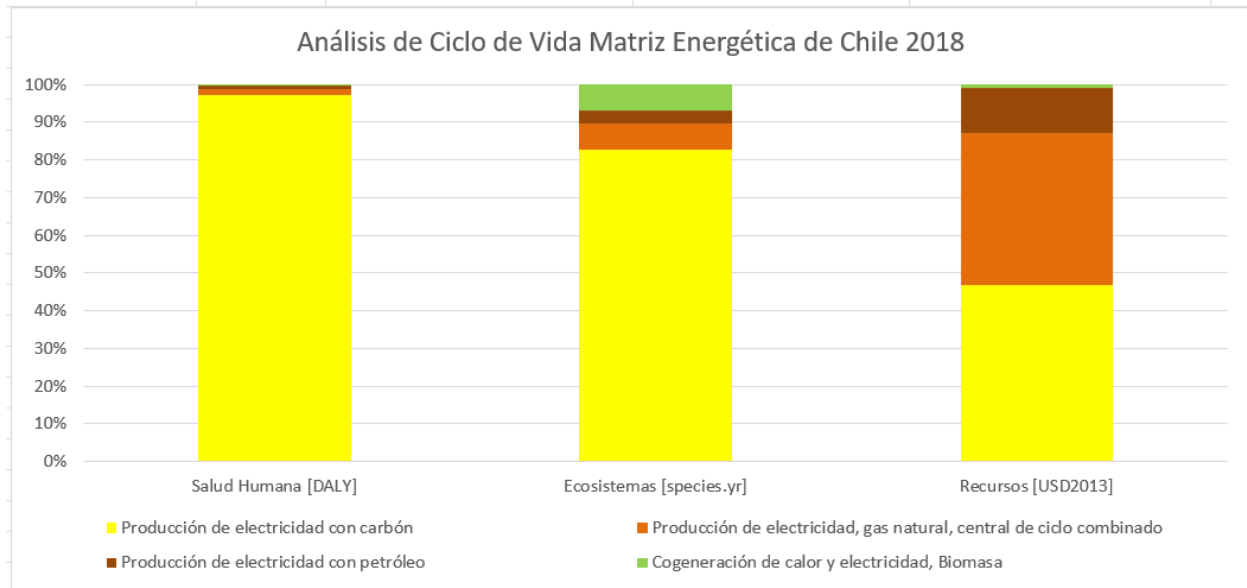


Figura 20. Resultados análisis de ciclo de vida para el transporte hacia la planta de celulosa. Impactos finales normalizados.



Para el caso de los impactos intermedios se observa que las categorías más afectadas son la escasez de recursos fósiles, calentamiento global y acidificación terrestre. Mientras que, para los impactos

Figura 22. Resultados evaluación de ciclo de vida para 1 kWh de electricidad producida por el SEN. Impactos finales.



Evidentemente, el tipo de energía eléctrica que más contribuye a todas las categorías de impacto, tanto para impactos intermedios y finales, es la generación en base a carbón. Los otros dos tipos de energía que contribuyen en menor medida son la generación por gas natural y petróleo. Estos tres tipos de energía son en base a combustibles fósiles por lo que era de esperar que los resultados indicaran a estos como los responsables de la gran mayoría de los impactos ambientales.

En las Figuras 23 y 24 se muestran los resultados normalizados para las categorías de impacto intermedios y finales, correspondientes a la generación de 1 kWh del SEN.

Figura 23. Resultados evaluación de ciclo de vida para 1 kWh de electricidad producida por el SEN. Impactos intermedios normalizados.

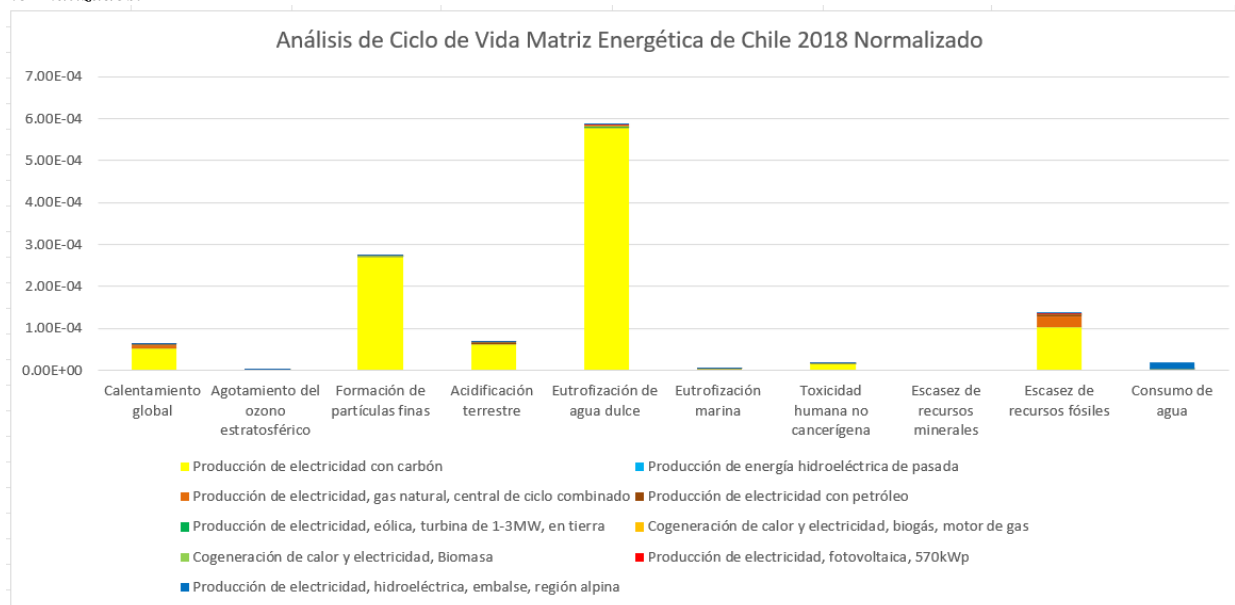
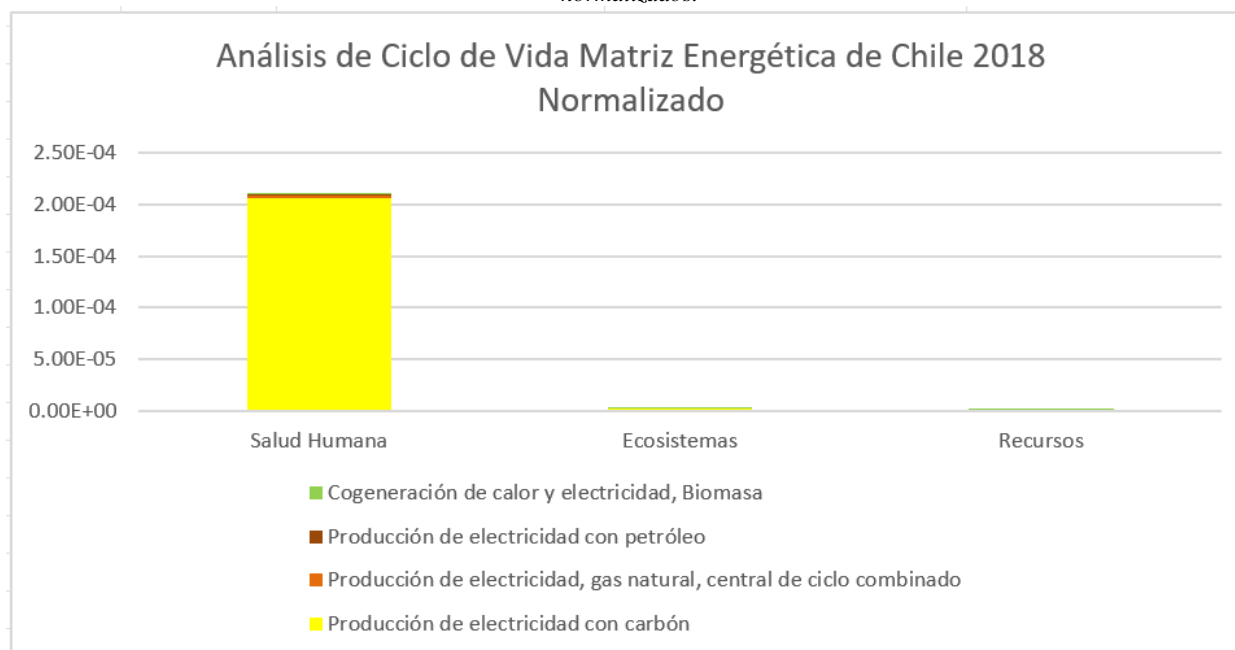


Figura 24. Resultados evaluación de ciclo de vida para 1 kWh de electricidad producida por el SEN. Impactos finales normalizados.



En la Figura 23 se observa que las categorías de impacto más afectadas son la eutrofización de agua dulce, formación de partículas finas y escasez de recursos fósiles. En la Figura 24 se muestra que el daño a la salud es la más afectada por la generación eléctrica en Chile, principalmente por las plantas termoeléctricas en base a carbón mineral. Por esta razón, es importante avanzar en una

eventual descarbonización de la matriz energética chilena, reemplazando esta generación por energías renovables para tener menores impactos al medio ambiente. En el anexo A se encuentran las tablas de resultados para la generación eléctrica de 1 kWh en Chile el 2018.

5.5.6. Producción de Celulosa ECF

En las Tablas 5 y 6 se presentan los resultados de impactos intermedios y final, respectivamente, para la producción de 1 ton de celulosa ECF en Chile. En dichas tablas se incluyen 3 conjuntos de resultados, a saber: impactos sin exportar los excedentes eléctricos al SEN, impactos evitados debido a la exportación de excedentes eléctricos al SEN y, finalmente, los impactos netos resultantes.

Tabla 5. Resultados de ECV para la producción de 1 ton de celulosa ECF. Impactos intermedios.

Categoría de impacto [Unidad]	Impactos sin exportar electricidad	Impactos evitados por exportar electricidad	Impactos netos
Calentamiento global [kg CO2 eq]	$5,33 \cdot 10^2$	$-1,51 \cdot 10^2$	$3,82 \cdot 10^2$
Agotamiento del ozono estratosférico [kg CFC11 eq]	$3,3 \cdot 10^{-4}$	$-4,28 \cdot 10^{-5}$	$2,88 \cdot 10^{-4}$
Formación de partículas finas [kg PM2.5 eq]	$2,92 \cdot 10^0$	$-2,12 \cdot 10^0$	$8,01 \cdot 10^{-1}$
Acidificación terrestre [kg SO2 eq]	$2,32 \cdot 10^0$	$-8,48 \cdot 10^{-1}$	$1,48 \cdot 10^0$
Eutrofización de agua dulce [kg P eq]	$2,15 \cdot 10^{-1}$	$-1,16 \cdot 10^{-1}$	$9,97 \cdot 10^{-2}$
Eutrofización marina [kg N eq]	$2,17 \cdot 10^{-2}$	$-7,24 \cdot 10^{-3}$	$1,45 \cdot 10^{-2}$
Toxicidad cancerígena humana [kg 1,4-DCB]	$4,73 \cdot 10^1$	$-1,00 \cdot 10^1$	$3,72 \cdot 10^1$
Toxicidad humana no cancerígena [kg 1,4-DCB]	$7,42 \cdot 10^2$	$-1,64 \cdot 10^2$	$5,78 \cdot 10^2$
Escasez de recursos minerales [kg Cu eq]	$2,52 \cdot 10^0$	$-4,68 \cdot 10^{-2}$	$2,47 \cdot 10^0$
Escasez de recursos fósiles [kg petróleo eq]	$2,32 \cdot 10^2$	$-4,02 \cdot 10^1$	$1,92 \cdot 10^2$
Consumo de agua [m3]	$8,68 \cdot 10^0$	$-1,60 \cdot 10^0$	$7,09 \cdot 10^0$

Tabla 6. Resultados de ECV para la producción de 1 ton de celulosa ECF. Impactos finales.

Daño de categoría [Unidad]	Impactos sin exportar electricidad	Impactos evitados por exportar electricidad	Impactos netos
Salud Humana [DALY]	$2,67 \cdot 10^{-3}$	$-1,55 \cdot 10^{-3}$	$1,13 \cdot 10^{-3}$
Ecosistemas [species.yr]	$5,22 \cdot 10^{-5}$	$-8,74 \cdot 10^{-7}$	$5,13 \cdot 10^{-5}$
Recursos [USD2013]	$8,77 \cdot 10^1$	$-6,48 \cdot 10^0$	$8,12 \cdot 10^1$

Se puede observar que los impactos evitados debido a la exportación de electricidad al SEN son muy significativos, principalmente en las categorías intermedias de cambio climático, formación de partículas finas, acidificación y eutrofización de agua dulce, que contribuyen en 28-72% de disminución de los impactos que se generarían sin tal exportación al SEN. En cuanto a los impactos

de daño final, el impacto a la salud humana disminuye en 58% gracias a la exportación de electricidad al SEN. Cabe señalar que la electricidad generada por las plantas de celulosa proviene en un 100% de fuentes renovables, ie. biomasa y licor negro (que a su vez está formado por los componentes de la madera que se solubilizaron durante la digestión), lo que contrasta con la matriz carbonizada del SEN.

Comparando los resultados de la Tabla 5 con el estudio de (González-García et al., 2009), se puede observar que la celulosa nacional presenta menores impactos en todas las categorías de impactos intermedios. En particular, la huella de carbono reportada en dicho estudio es 12% más baja que la estimada en la presente memoria, lo que refleja las diferencias en la matriz energética utilizada en ambos estudios. Por su parte, la huella de carbono encontrada por Jour y colaboradores (Jour et al., 2013) es del orden de 200 kg CO₂ eq/ton, lo cual es casi 50% más baja que la estimada aquí, debido a que en dicho trabajo se supone la producción in situ del 100% de los principales agentes químicos. Además, el menor contenido de lignina del eucalipto utilizado como materia prima incide en un menor consumo de reactivos químicos que en el caso del pino.

Desgraciadamente, en literatura no se reportan estudios con categorías de impacto final, lo que no permite comparar los resultados presentados en la Tabla 6.

Las Figuras 25 y 26 ilustran los resultados para impactos intermedios y finales normalizados, correspondientes a la producción de celulosa ECF en Chile, respectivamente. Estas categorías de impacto normalizadas muestran el perfil ambiental de una tonelada de celulosa seca al aire, presentada de manera adimensional, lo que permite comparar la importancia relativa de cada categoría de impacto y de los procesos contribuyentes.

Figura 25. Resultados evaluación de ciclo de vida para 1 ton de celulosa ECF. Impactos intermedios.

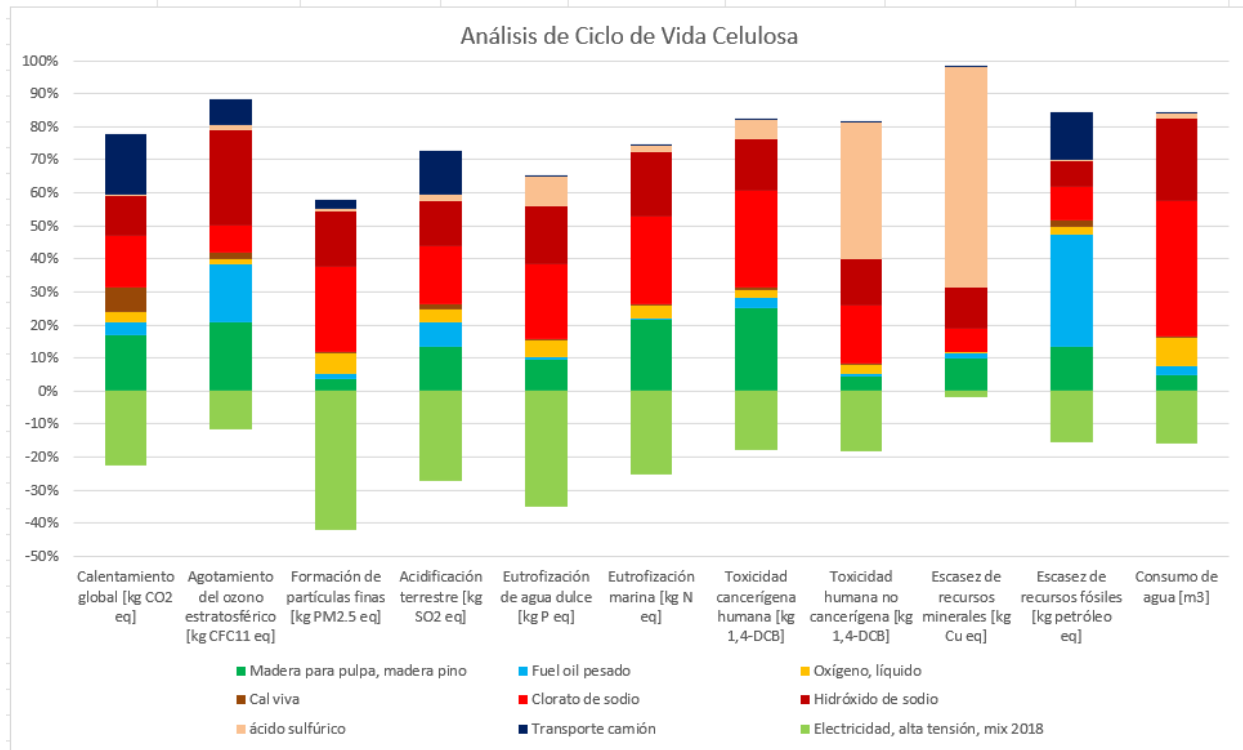
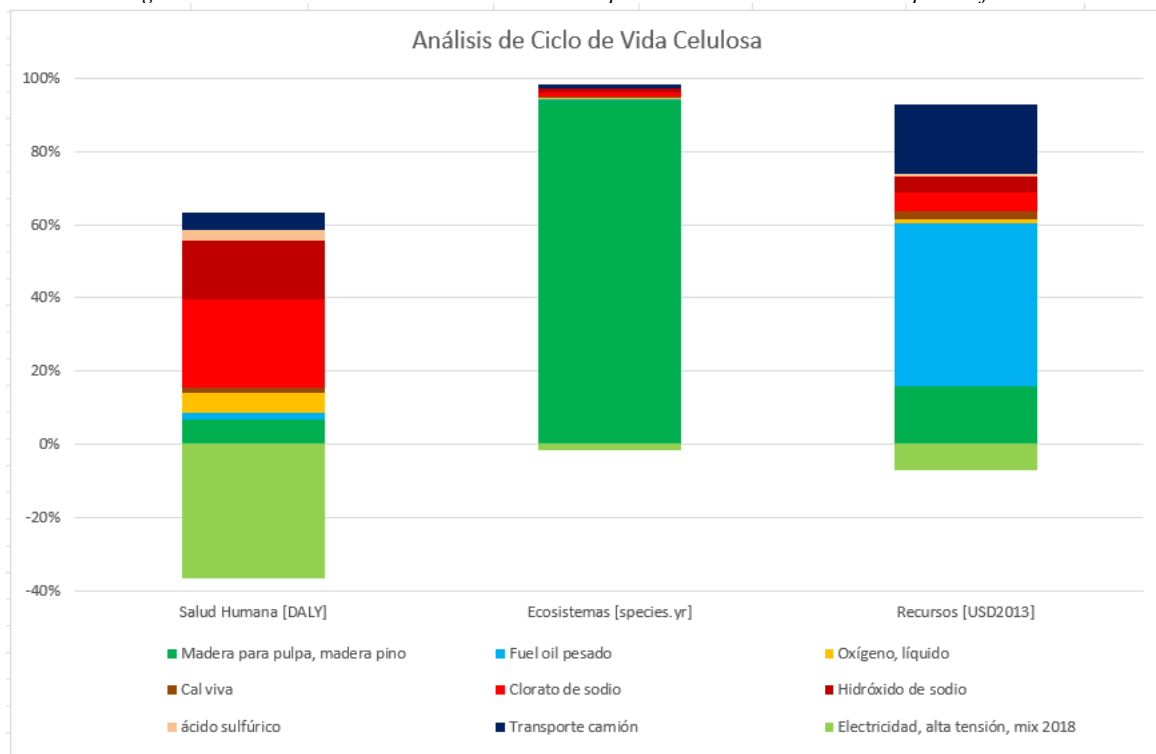


Figura 26. Resultados evaluación de ciclo de vida para 1 ton de celulosa ECF. Impactos finales.



En ambas figuras se puede observar que la electricidad exportada al SEN tiene una contribución positiva significativa en todas las categorías de impactos ambientales. Tal como se señaló anteriormente, esta energía se produce mediante biomasa residual y licor negro en las calderas de poder y de recuperación de la planta, respectivamente, lo que “evita” que el SEN tenga que producir energía eléctrica en base a una matriz carbonizada, lo que se traduce en un impacto positivo. Esto coincide con los resultados presentados por otros autores, mencionados en el Capítulo 3.

También se puede observar la importante contribución a todas las categorías de impacto de los insumos químicos que están basados en procesos electroquímicos, lo cual es coincidente con lo reportado en literatura.

Un aspecto interesante que surge de este trabajo tiene relación con la contribución significativa que la producción de madera tiene en el perfil ambiental de la celulosa, debido principalmente a la etapa de cosecha. A continuación, se presentan las figuras 27 y 28 con los resultados normalizados por etapas para la producción de 1 ton de celulosa ECF en Chile.

Figura 27. Resultados análisis de ciclo de vida para 1 ton de celulosa ECF. Impactos intermedios normalizados.

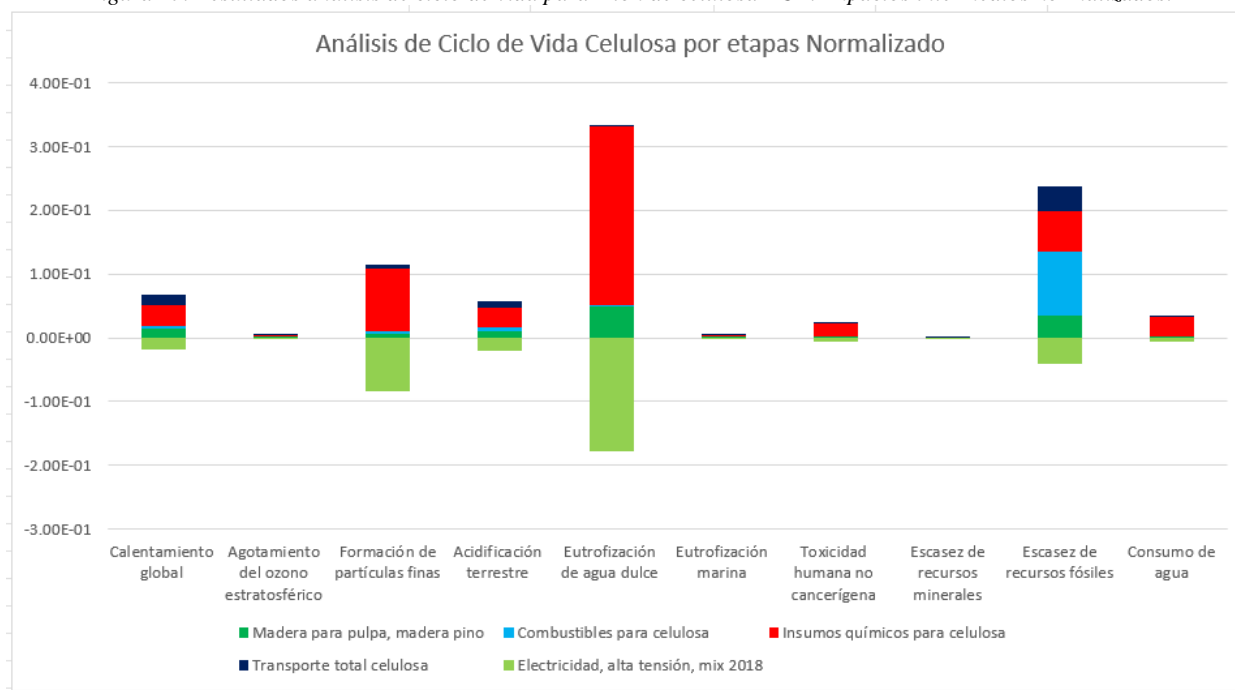
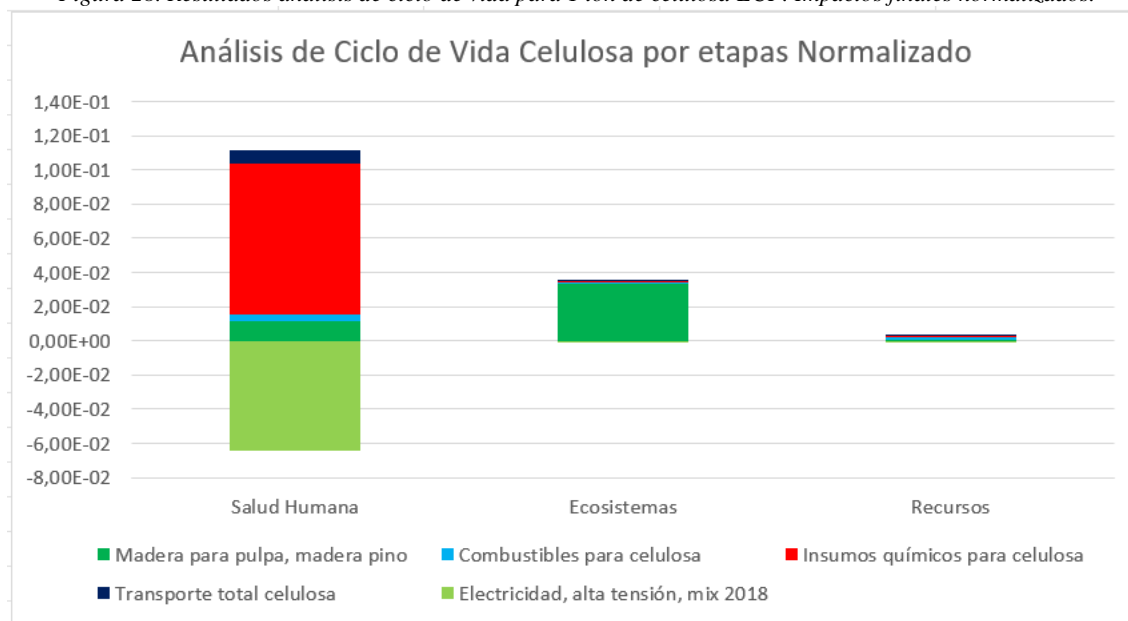


Figura 28. Resultados análisis de ciclo de vida para 1 ton de celulosa ECF. Impactos finales normalizados.



En la Figura 27 se puede observar que la categoría de impacto más afectada por la producción de celulosa es la eutroficación de agua dulce, debido principalmente a la producción de clorato de sodio e hidróxido de sodio. El segundo impacto más importante es la escasez de recursos fósiles, donde el consumo de fuel oil en el horno de cal es responsable de aproximadamente el 40% de dicho impacto.

En la Figura 28 se observa que el daño a la salud humana es muy superior a las demás categorías, esto se debe principalmente a la producción de insumos químicos como el clorato de sodio e hidróxido de sodio los cuales contribuyen en más del 50% a esta categoría. Cabe destacar la gran contribución positiva de la energía eléctrica vendida al SEN.

En base a los resultados obtenidos hasta ahora, es relevante evaluar cual sería el impacto potencial de cambiar la matriz energética del proceso, tanto en la electricidad requerida para generar los insumos químicos como del combustible requerido en el horno de cal. Estos aspectos se revisan en la siguiente sección.

5.5.7. Simulación de escenarios alternativos.

Las Tablas 7 y 8 resumen los resultados de simulación de impactos intermedios y finales, para algunos escenarios de interés, comparado con la línea de base dada por el proceso actual.

Tabla 71. comparación de impactos ambientales intermedios en distintos escenarios. Modelo ReCiPe.

Categoría de impacto [Unidad]	Proceso original	Con factor de planta	Sin Fuel Oil	Electricidad 2030
Calentamiento global [kg CO2 eq]	$3,82*10^2$	$3,96*10^2$	$3,87*10^2$	$3,63*10^2$
Agotamiento del ozono estratosférico [kg CFC11 eq]	$2,88*10^{-4}$	$2,93*10^{-4}$	$2,25*10^{-4}$	$2,83*10^{-4}$
Formación de partículas finas [kg PM2.5 eq]	$8,01*10^{-1}$	$8,32*10^{-1}$	$7,64*10^{-1}$	$5,33*10^{-1}$
Acidificación terrestre [kg SO2 eq]	$1,48*10^0$	$1,55*10^0$	$1,38*10^0$	$1,37*10^0$
Eutrofización de agua dulce [kg P eq]	$9,97*10^{-2}$	$1,09*10^{-1}$	$9,87*10^{-2}$	$8,53*10^{-2}$
Eutrofización marina [kg N eq]	$1,45*10^{-2}$	$1,51*10^{-2}$	$1,48*10^{-2}$	$1,36*10^{-2}$
Toxicidad cancerígena humana [kg 1,4-DCB]	$3,72*10^1$	$4,35*10^1$	$3,63*10^1$	$3,64*10^1$
Toxicidad humana no cancerígena [kg 1,4-DCB]	$5,78*10^2$	$6,47*10^2$	$5,83*10^2$	$5,59*10^2$
Escasez de recursos minerales [kg Cu eq]	$2,47*10^0$	$2,89*10^0$	$2,45*10^0$	$2,48*10^0$
Escasez de recursos fósiles [kg petróleo eq]	$1,92*10^2$	$1,95*10^2$	$1,90*10^2$	$1,87*10^2$
Consumo de agua [m3]	$7,09*10^0$	$7,23*10^0$	$6,80*10^0$	$6,99*10^0$

Tabla 8. comparación de impactos ambientales finales en distintos escenarios. Modelo ReCiPe.

Daño de categoría [Unidad]	Proceso original	Con factor de Planta	Sin Fuel Oil	Electricidad 2030
Salud Humana [DALY]	$1,13*10^{-3}$	$1,20*10^{-3}$	$1,11*10^{-3}$	$9,36*10^{-4}$
Ecosistemas [species.yr]	$5,13*10^{-5}$	$5,14*10^{-5}$	$5,13*10^{-5}$	$5,12*10^{-5}$
Recursos [USD2013]	$8,12*10^1$	$8,22*10^1$	$7,26*10^1$	$8,04*10^1$

En primer lugar, se evalúa el efecto de incorporar los impactos generados por la construcción de la infraestructura productiva. De acuerdo, a los valores que se muestran en las Tablas 7 y 8, la producción de la infraestructura resulta en un incremento inferior al 5% del impacto total en la mayoría de las categorías de impacto, respecto a la línea base. Generalmente, no se incluye esta etapa en las declaraciones ambientales de producto, ni en los informes ambientales a clientes.

En relación con el reemplazo de fuel oil por gas natural licuado en el horno de cal, se observa una leve disminución del impacto en las categorías de calentamiento global, eutrofización marina y toxicidad humana no cancerígena, coincidiendo con los resultados reportados en literatura (Lopes et al., 2002). En todo caso, dichas reducciones son muy pequeñas, dado que el gas natural también es de fuente fósil, cuyo impacto ambiental es importante.

Finalmente, se evaluó el reemplazo de la electricidad SEN por una de fuente 100% renovable, de acuerdo con la proyección que existe para el 2030. Se puede observar que el escenario con una matriz energética renovable tiene un claro impacto positivo en todos los impactos ambientales

intermedios y finales, principalmente en las categorías de calentamiento global, generación de partículas finas y eutroficación, lo que tiene un impacto significativo en la reducción del daño a la salud humana. Efectivamente, el daño potencial a la salud humana se vería disminuido en 17% gracias a la incorporación de una matriz eléctrica 100% renovable.

Sin embargo, el efecto beneficioso se ve mitigado cuantitativamente debido a que la generación eléctrica evitada por la exportación de energía al SEN es una energía que presenta impactos ambientales potenciales muy inferiores a los de la línea base. En efecto, si se considera las emisiones de gases de efecto invernadero sin descontar las emisiones evitadas por la exportación de excedentes energéticos, la reducción del impacto en calentamiento global debido al uso de electricidad 100% renovable sería del orden de 32%.

Estos resultados permiten concluir que es importante avanzar rápidamente hacia una matriz eléctrica descarbonizada, dada la importancia de este insumo energético en todos los procesos productivos y su impacto directo en la salud humana.

6. Conclusiones

La industria forestal ha sido tradicionalmente considerada una fuente importante de contaminación debido a su intensivo uso de energía eléctrica, productos químicos y combustibles. En esta memoria de título se estudió la producción de celulosa mediante la tecnología de blanqueo ECF a partir de madera de pino, bajo condiciones de operación existentes en Chile, siguiendo la metodología de Evaluación de Ciclo de Vida, con un enfoque desde la cuna a la puerta. Basado en el análisis de inventario construido con datos primarios de una planta local, se cuantificaron los impactos intermedios y final de acuerdo con el modelo ReCiPe, identificando aquellas etapas de mayor contribución a los impactos ambientales asociados al perfil ambiental de la producción de 1 ton de celulosa ECF seca al aire.

El perfil ambiental de la celulosa presenta impactos ambientales significativos en las categorías de eutroficación en agua dulce, agotamiento de recursos fósiles, formación de partículas finas y, en menor medida, calentamiento global, acidificación y consumo de agua. Debido a ello, el principal impacto final es sobre la categoría de salud humana, por sobre los impactos asociados a daños en ecosistemas y recursos naturales.

Este estudio demostró que la producción de insumos químicos y de madera son los principales contribuyentes en la mayoría de las categorías de impacto, con 20-90% y 6-43% de contribución al perfil ambiental total, respectivamente. A su vez, la producción de insumos químicos está afectada principalmente por la generación de electricidad utilizada en los procesos electroquímicos asociados.

Por su parte, la exportación al SEN de los excedentes eléctricos generados en la planta de celulosa permite reemplazar la electricidad de la red pública por una con menor impacto ambiental. Ello constituye una significativa mitigación de los impactos directos a través de los impactos externos evitados, lo que en el caso de la huella de carbono equivale a una reducción del 28%.

Más aún, se concluye que el reemplazo de la matriz eléctrica actual del SEN por una 100% de fuentes renovables tiene un impacto positivo en todos los impactos ambientales intermedios y

finales, principalmente en las categorías de calentamiento global, generación de partículas finas y eutroficación, lo que tiene un impacto significativo en la reducción del daño a la salud humana. Sin embargo, el efecto beneficioso se ve mitigado cuantitativamente debido a que la generación eléctrica evitada por la exportación de energía al SEN es una energía que presenta impactos ambientales potenciales muy inferiores a los de la línea base.

Esta memoria de título deja en evidencia, que el perfil ambiental de la producción de celulosa está determinado de manera significativa por procesos externos a la producción de celulosa propiamente tal, que se encuentran en la cadena de suministro. Cabe destacar que no existen trabajos publicados acerca del perfil ambiental de la producción de celulosa con categorías de impacto final, por lo que este trabajo debe ser considerado como pionero en este aspecto.

Recomendaciones

Para continuar el desarrollo de este trabajo se recomienda el uso de datos primarios de industrias chilenas para la producción de los insumos químicos y combustibles, de esta forma se minimiza el uso de la base de datos de Ecoinvent. Por otro lado, si bien el reemplazo de fuel oil por gas natural licuado es ambientalmente favorable, se debe realizar una evaluación técnico-económica, debido a que la reducción de los impactos no es tan significativa. Se podría analizar un nuevo escenario, reemplazando el fuel oil por hidrógeno verde.

Relación con los Objetivos de Desarrollo Sustentable.

Finalmente, este estudio contribuye a la construcción de una base de datos a nivel nacional para este sector productivo, ya que representa una primera aproximación para establecer el perfil ambiental de la celulosa nacional, cuya importancia en el mercado internacional obliga a maximizar los esfuerzo para una gestión ambiental efectiva. En este sentido, esta memoria tiene relación con varios de los Objetivos de Desarrollo Sustentable, principalmente:

ODS 3: Salud y bienestar. La ECV entrega información acerca de los impactos sobre el potencial daño a la salud humana generado por el sistema productivo asociado a la celulosa, en todo su ciclo

de vida.

ODS 7: Energía asequible y no contaminante. Aporta antecedentes acerca de la importancia de la matriz energética en el ciclo de vida de los productos.

ODS 12: Producción y consumo responsable. Entrega herramientas metodológicas para el desarrollo de etiquetado ecológico con vistas a un consumo responsable y producción menos contaminante.

ODS 13: Acción por el clima. La ECV es una metodología fundamental para el cálculo de huellas de carbono.

ODS 14: Vida submarina. La memoria entrega antecedentes acerca de los impactos en acidificación, eutroficación, ecotoxicidad y otros impactos relacionados con los ecosistemas marinos.

ODS 15: Vida de ecosistemas terrestres. La memoria entrega antecedentes acerca de los impactos en acidificación, ecotoxicidad y otros impactos relacionados con los ecosistemas terrestres.

7. Referencias

- Álvarez González, V., Poblete Hernández, P., Soto Aguirre, D., Caselli, J. G., Kahler González, C., Pardo Velásquez, E., Carlos, J., Munita, B., & Rocha, D. B. (2022). *Anuario Forestal Chilean Statistical Yearbook of Forestry 2022*.
- Arvidsson, R., Nguyen, D., & Svanström, M. (2015). Life cycle assessment of cellulose nanofibrils production by mechanical treatment and two different pretreatment processes. *Environmental Science and Technology*, *49*(11), 6881–6890. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b00888>
- Boeykens, S. (2006). De la naturaleza a la mesa. Procesos para la producción de papel y pulpa. *Revista Encrucijadas UBA*, *38*, 36–38. http://www.uba.ar/encrucijadas/agosto_6/nota-tapa.htm#3
- Casey, J. P. (2012). *Pulpa y papel. Química y tecnología química*. Limusa.
- Coordinador Eléctrico Nacional. (2022). *Hoja de Ruta para una Transición Energética Acelerada*. <https://www.coordinador.cl/desarrollo/documentos/estudios-de-planificacion/hoja-de-ruta-para-una-transicion-energetica-acelerada/>
- De Figueirêdo, M. C. B., De Freitas Rosa, M., Lie Ugaya, C. M., De Souza Filho, M. D. S. M., Da Silva Braid, A. C. C., & De Melo, L. F. L. (2012). Life cycle assessment of cellulose nanowhiskers. *Journal of Cleaner Production*, *35*, 130–139. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.033>
- Echeverría, D., Venditti, R., Jameel, H., & Yao, Y. (2021). A general Life Cycle Assessment framework for sustainable bleaching: A case study of peracetic acid bleaching of wood pulp. *Journal of Cleaner Production*, *290*, 125854. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125854>
- González-García, S., Hospido, A., Moreira, M. T., Romero, J., & Feijoo, G. (2009). Environmental impact assessment of total chlorine free pulp from *Eucalyptus globulus* in Spain. *Journal of Cleaner Production*, *17*(11), 1010–1016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.02.017>
- Hostachy, J. C. (2010). Hostachy, J. C. (2010). Use of ozone in chemical and high yield pulping processes-Latest innovations maximizing efficiency and environmental performance. In 64th Appita Annual Conference and Exhibition, Melbourne 18-21 April 2010: Conference Technical Pap. *Conference Technical Papers*.
- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., & van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *International Journal of Life Cycle Assessment*, *22*(2), 138–147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>

- ISO. (2006a). International Organization for Standardization. (2006). Environmental management: life cycle assessment; Principles and Framework.(Vol. 14040). Geneva, Switzerland: ISO. *International Organization for Standardization*, 1–54.
<https://www.unit.org.uy/>
- ISO. (2006b). International Organization for Standardization. (2006). Environmental management: life cycle assessment; requirements and guidelines (Vol. 14044). Geneva, Switzerland: ISO. *International Organization for Standardization*, 60.
<https://www.unit.org.uy/>
- Jawjit, W., Kroeze, C., Soontaranun, W., & Hordijk, L. (2006). An analysis of the environmental pressure exerted by the eucalyptus-based kraft pulp industry in Thailand. *Environment, Development and Sustainability*, 8(2), 289–311. <https://doi.org/10.1007/s10668-005-9019-y>
- Jawjit, W., Kroeze, C., Soontaranun, W., & Hordijk, L. (2007). Options to reduce the environmental impact by eucalyptus-based Kraft pulp industry in Thailand: model description. *Journal of Cleaner Production*, 15(18), 1827–1839.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.10.003>
- Jour, P., Halldén, K., & Wackerberg, E. (2013). Environmental Systems Analysis of Alternative Bleaching Sequences With Focus on Carbon Footprint. *The 46th ABTCP International Pulp and Paper Congress, October, 8-10. 2012, Sao Paulo Brazil*. © 2013 ABTCP ENVIRONMENTAL, 1996, 8–10.
- Libby, C. E. (1969). *Ciencia y tecnología sobre pulpa y papel Y editado por C. Earl Libby*.
<https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat09074a&AN=cbu.oai.folio.org.fs00001060.be6cb4cc.c802.4113.a024.dab42feea638&site=eds-live>
- Lopes, E., Dias, A., Arroja, L., Capela, I., & Pereira, F. (2002). Application of life cycle assessment to the Portuguese pulp and paper industry. *Journal of Cleaner Production*, 11(1), 51–59. [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(02\)00005-7](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(02)00005-7)
- Ma, X., Shen, X., Qi, C., Ye, L., Yang, D., & Hong, J. (2018). Energy and carbon coupled water footprint analysis for Kraft wood pulp paper production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96(December 2017), 253–261. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.054>
- 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*, 99, 239–249.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.085>
- Smook, G. A. (1998). *Manuel du technicien et de la technicienne en pates et papiers / Gary A. Smook*.
<https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat09074a&AN=cbu.oai.folio.org.fs00001060.a30dd99a.1346.4b7b.bfa3.37d419e3c18c&site=eds-live>

8. Anexos

Anexo A: tablas de resultados

Tablas para producción de biomasa

Tabla A.1. Resultados de impactos intermedios por etapas para la producción de biomasa.

Categoría de impacto [Unidad]	Total	Autocargado, Autocargadores	grava triturada	Cosecha, cosechadora forestal	Sierra mecánica, sin convertidor catalítico	Remolcador, Remolcador	Producción de plántulas de árboles, en invernadero climatizado	Producción de plántulas de árboles, en invernadero sin calefacción	Diesel, quemado en máquina de construcción
Calentamiento global [kg CO2 eq]	1.17E+01	2.25E+00	2.77E-01	5.68E+00	8.84E-01	7.23E-02	5.69E-01	5.22E-01	1.43E+00
Agotamiento del ozono estratosférico [kg CFC11 eq]	7.80E-06	1.34E-06	1.71E-07	3.73E-06	1.11E-06	4.31E-08	2.28E-07	3.42E-07	8.45E-07
Formación de partículas finas [kg PM2.5 eq]	1.88E-02	3.67E-03	4.97E-04	7.70E-03	8.17E-04	9.46E-05	9.51E-04	1.10E-03	4.00E-03
Acidificación terrestre [kg SO2 eq]	4.28E-02	9.21E-03	1.11E-03	1.83E-02	2.05E-03	2.25E-04	2.08E-03	1.72E-03	7.94E-03
Eutrofización de agua dulce [kg P eq]	3.21E-03	1.60E-04	3.66E-05	1.23E-03	1.32E-03	5.69E-06	2.00E-04	2.04E-04	4.26E-05
Eutrofización marina [kg N eq]	6.28E-04	1.55E-05	3.28E-06	2.41E-04	3.29E-04	5.66E-07	1.56E-05	1.91E-05	4.53E-06
Toxicidad cancerígena humana [kg 1,4-DCB]	1.46E+00	3.11E-01	2.56E-02	9.18E-01	4.36E-02	1.19E-02	2.18E-02	2.41E-02	1.02E-01
Toxicidad humana no cancerígena [kg 1,4-DCB]	3.92E+00	7.72E-01	1.99E-01	1.76E+00	2.37E-01	2.67E-02	4.07E-01	3.89E-01	1.30E-01
Escasez de recursos minerales [kg Cu eq]	2.60E-02	5.37E-03	5.67E-04	1.53E-02	1.99E-03	1.93E-04	3.91E-04	7.24E-04	1.56E-03
Escasez de recursos fósiles [kg petróleo eq]	3.57E+00	7.29E-01	9.09E-02	1.78E+00	2.34E-01	2.34E-02	1.22E-01	1.39E-01	4.54E-01
Consumo de agua [m3]	4.83E-02	3.43E-03	8.68E-04	1.93E-02	1.78E-02	1.11E-04	1.88E-03	3.80E-03	1.11E-03

Tabla A.2. Resultados de impactos finales por etapas para la producción de biomasa.

Daño de categoría [Unidad]	Total	Madera para pulpa, madera pino	Autocargado, Autocargadores	grava triturada	Cosecha, cosechadora forestal	Sierra mecánica, sin convertidor catalítico	Remolcador, Remolcador
Salud Humana [DALY]	2.85E-05	0.00E+00	5.63E-06	7.03E-07	1.36E-05	1.56E-06	1.72E-07
Ecosistemas [species.yr]	5.09E-06	5.02E-06	1.12E-08	1.50E-09	3.00E-08	1.26E-08	3.19E-10
Recursos [USD2013]	1.46E+00	0.00E+00	3.11E-01	3.58E-02	7.50E-01	9.97E-02	9.95E-03

Producción de plántulas de árboles, en invernadero climatizado	Producción de plántulas de árboles, en invernadero sin calefacción	Diesel, quemado en máquina de construcción
1.29E-06	1.35E-06	4.23E-06
2.53E-09	2.39E-09	8.10E-09
2.22E-02	3.08E-02	2.01E-01

Tablas para clorato de sodio

Tabla A.3. Resultados de impactos intermedios por etapas para la producción de clorato de sodio.

Categoría de impacto [Unidad]	Total	Producción Clorato de sodio, polvo	Cloruro de calcio	Fábrica de productos químicos, orgánicos	Ácido clorhídrico, sin agua, en estado de solución al 30%	Peróxido de hidrógeno, sin agua, en estado de solución al 50%
Calentamiento global [kg CO2 eq]	3.13E+03	0.00E+00	1.27E-01	6.11E+01	1.60E+01	2.95E+00
Agotamiento del ozono estratosférico [kg CFC11 eq]	9.43E-04	0.00E+00	3.84E-08	3.06E-05	1.22E-05	8.65E-07
Formación de partículas finas [kg PM2.5 eq]	3.91E+01	0.00E+00	3.20E-04	1.49E-01	3.89E-02	4.40E-03
Acidificación terrestre [kg SO2 eq]	1.65E+01	0.00E+00	1.03E-03	2.96E-01	7.53E-02	8.43E-03
Eutrofización de agua dulce [kg P eq]	2.27E+00	0.00E+00	5.51E-05	6.06E-02	7.49E-03	7.54E-04
Eutrofización marina [kg N eq]	2.31E-01	0.00E+00	4.11E-06	3.57E-03	7.51E-04	1.93E-04
Toxicidad cancerígena humana [kg 1,4-DCB]	5.02E+02	2.08E+02	1.60E-02	3.48E+01	1.61E+00	4.05E-01
Toxicidad humana no cancerígena [kg 1,4-DCB]	4.79E+03	1.61E+00	2.52E-01	4.40E+02	2.76E+01	3.63E+00
Escasez de recursos minerales [kg Cu eq]	5.15E+00	0.00E+00	9.55E-04	2.49E+00	9.40E-02	7.78E-03
Escasez de recursos fósiles [kg petróleo eq]	7.95E+02	0.00E+00	2.66E-02	1.48E+01	4.36E+00	8.79E-01
Consumo de agua [m3]	1.25E+02	9.13E+01	4.19E-03	7.59E-01	3.63E-01	1.44E-01

Ceniza de sosa, ligera, cristalina, heptahidratada	Cloruro de sodio, polvo	dicromato de sodio	Hidróxido de sodio, sin agua, en estado de solución al 50%	Sulfato de sodio, anhídrido	Electricidad, alta tensión, mix 2018	Residuos sólidos urbanos	Residuos sólidos municipales
1.98E-01	1.55E+02	1.70E+00	3.28E+01	2.62E-02	2.74E+03	5.28E-02	1.18E+02
6.31E-08	6.48E-05	4.01E-07	3.54E-05	1.10E-08	7.75E-04	8.08E-10	2.35E-05
5.08E-04	3.24E-01	2.07E-03	7.09E-02	8.82E-05	3.84E+01	2.93E-06	1.26E-01
1.67E-03	6.37E-01	5.81E-03	1.20E-01	2.31E-04	1.54E+01	3.41E-06	4.07E-02
9.02E-05	8.19E-02	4.25E-04	1.61E-02	1.24E-05	2.09E+00	2.82E-06	7.65E-03
6.70E-06	2.17E-02	2.11E-05	1.72E-03	1.43E-06	1.31E-01	3.36E-05	7.15E-02
2.64E-02	2.79E+01	4.26E+01	2.77E+00	3.54E-03	1.82E+02	5.57E-04	2.38E+00
4.00E-01	3.54E+02	2.05E+00	3.80E+01	8.03E-02	2.97E+03	4.20E-01	9.46E+02
1.58E-03	1.57E+00	3.03E-02	1.04E-01	2.93E-04	8.47E-01	4.60E-07	5.16E-03
4.24E-02	3.80E+01	3.11E-01	8.20E+00	7.70E-03	7.29E+02	9.05E-05	2.24E-01
7.17E-03	2.41E+00	1.34E-02	8.73E-01	8.31E-04	2.89E+01	3.46E-07	9.75E-03

Tabla A.4. Resultados de impactos finales por etapas para la producción de clorato de sodio.

Daño de categoría [Unidad]	Total	Producción Clorato de sodio, polvo	Cloruro de calcio	Fábrica de productos químicos, orgánicos	Ácido clorhídrico, sin agua, en estado de solución al 30%	Peróxido de hidrógeno, sin agua, en estado de solución al 50%
Salud Humana [DALY]	3.05E-02	8.94E-04	4.38E-07	3.68E-04	5.16E-05	7.99E-06
Ecosistemas [species.yr]	1.92E-05	1.23E-06	8.79E-10	5.70E-07	8.72E-08	1.44E-08
Recursos [USD2013]	1.34E+02	0.00E+00	5.61E-03	3.99E+00	1.02E+00	2.66E-01

Ceniza de sosa, ligera, cristalina, heptahidratada	Cloruro de sodio, polvo	dicromato de sodio	Hidróxido de sodio, sin agua, en estado de solución al 50%	Sulfato de sodio, anhídrido	Electricidad, alta tensión, mix 2018	Residuos sólidos urbanos	Residuos sólidos municipales
6.97E-07	5.25E-04	1.45E-04	9.46E-05	1.12E-07	2.80E-02	1.49E-07	8.24E-04
1.48E-09	9.35E-07	8.31E-09	1.72E-07	2.12E-10	1.58E-05	1.67E-10	8.02E-07
9.25E-03	9.77E+00	9.68E-02	1.69E+00	2.17E-03	1.17E+02	3.93E-05	1.68E-01

Tablas para ácido sulfúrico

Tabla A.5. Resultados de impactos intermedios por etapas para la producción de ácido sulfúrico.

Categoría de impacto [Unidad]	Total	fundición de concentrado de cobre	Ánodo, para electrólisis de metales	Concentrado de cobre	Cal, envasada	Fundición de metales no ferrosos	Oxígeno, líquido
Calentamiento global [kg CO2 eq]	9.36E+01	1.48E+00	1.15E-02	7.02E+01	2.41E-01	1.45E-01	4.45E+00
Agotamiento del ozono estratosférico [kg CFC11 eq]	1.46E-04	0.00E+00	8.85E-09	1.39E-04	1.07E-07	5.81E-08	1.58E-06
Formación de partículas finas [kg PM2.5 eq]	7.93E-01	1.39E-01	2.28E-05	5.12E-01	4.44E-04	3.15E-04	9.91E-03
Acidificación terrestre [kg SO2 eq]	1.44E+00	4.78E-01	6.10E-05	8.55E-01	9.05E-04	7.29E-04	1.46E-02
Eutrofización de agua dulce [kg P eq]	6.52E-01	0.00E+00	1.40E-06	6.42E-01	7.75E-05	1.04E-04	1.93E-03
Eutrofización marina [kg N eq]	1.27E-02	0.00E+00	1.16E-07	1.20E-02	2.87E-05	1.07E-05	1.40E-04
Toxicidad cancerígena humana [kg 1,4-DCB]	7.44E+01	6.76E-01	9.37E-04	3.91E+01	2.54E-02	1.43E-01	2.00E-01
Toxicidad humana no cancerígena [kg 1,4-DCB]	8.00E+03	1.50E+02	3.53E-03	5.38E+03	1.04E+00	7.71E-01	3.11E+00
Escasez de recursos minerales [kg Cu eq]	3.66E+01	0.00E+00	1.53E-05	3.66E+01	2.65E-03	4.79E-03	2.39E-03
Escasez de recursos fósiles [kg petróleo eq]	2.33E+01	0.00E+00	1.08E-02	1.77E+01	5.27E-02	3.31E-02	1.09E+00
Consumo de agua [m3]	4.01E+00	8.91E-02	3.09E-05	3.77E+00	3.58E-03	1.71E-03	1.10E-01

Arena de sílice	Calor, urbano o industrial, gas natural	Calor, urbano o industrial, que no sea gas natural	Electricidad, alta tensión, mix 2018	lodos de alto horno	escoria de cobre	Aguas residuales, no contaminadas
4.72E-01	5.80E-01	5.59E+00	8.13E+00	4.61E-01	1.86E+00	2.56E-02
1.60E-07	2.10E-07	1.15E-06	2.30E-06	9.27E-08	9.85E-07	7.73E-09
9.61E-04	1.87E-04	1.22E-02	1.14E-01	4.32E-04	3.67E-03	4.19E-05
2.36E-03	5.60E-04	3.20E-02	4.56E-02	1.09E-03	8.96E-03	6.88E-05
8.31E-05	7.77E-06	1.54E-03	6.22E-03	2.88E-04	1.95E-04	6.73E-06
6.35E-06	1.43E-06	1.08E-04	3.90E-04	6.01E-06	1.74E-05	2.54E-06
2.71E-02	7.89E-03	1.48E-01	5.40E-01	1.78E-01	3.33E+01	1.32E-02
3.32E-01	3.65E-02	4.11E+00	8.83E+00	7.56E+00	2.44E+03	3.40E-02
5.64E-04	2.09E-04	1.04E-03	2.52E-03	2.00E-03	3.77E-03	4.56E-04
1.23E-01	2.16E-01	1.01E+00	2.16E+00	7.63E-02	7.51E-01	5.66E-03
3.65E-03	7.67E-04	7.04E-03	8.59E-02	1.83E-03	1.64E-02	-7.52E-02

Tabla A.6. Resultados de impactos finales por etapas para la producción de ácido sulfúrico.

Daño de categoría [Unidad]	Total	fundición de concentrado de cobre	Ánodo, para electrólisis de metales	Concentrado de cobre	Cal, envasada	Fundición de metales no ferrosos	Oxígeno, líquido
Salud Humana [DALY]	2.66E-03	1.25E-04	2.90E-08	1.75E-03	8.33E-07	9.84E-07	1.19E-05
Ecosistemas [species.yr]	1.98E-06	1.83E-07	5.38E-11	1.68E-06	2.06E-09	1.74E-09	2.06E-08
Recursos [USD2013]	1.37E+01	0.00E+00	4.65E-03	1.26E+01	1.61E-02	9.72E-03	1.96E-01

Arena de sílice	Calor, urbano o industrial, gas natural	Calor, urbano o industrial, que no sea gas natural	Electricidad, alta tensión, mix 2018	lodos de alto horno	escoria de cobre	Aguas residuales, no contaminadas
1.21E-06	6.91E-07	1.43E-05	8.32E-05	3.02E-06	6.70E-04	-6.53E-08
3.25E-09	1.84E-09	2.74E-08	4.70E-08	2.41E-09	1.68E-08	-8.98E-10
4.06E-02	7.71E-02	1.39E-01	3.49E-01	2.65E-02	3.15E-01	1.81E-03

Tablas para hidróxido de sodio

Tabla A.7. Resultados de impactos intermedios por etapas para la producción de hidróxido de sodio.

Categoría de impacto [Unidad]	Total	Hidróxido de sodio, sin agua, en estado de solución al 50%, electrólisis de cloro-álcali, celda de membrana	Barita	Cloruro de calcio	Tetracloruro de carbono	Fábrica de productos químicos, orgánicos	Ácido clorhídrico, sin agua, en estado de solución al 30%
Calentamiento global [kg CO2 eq]	9.44E+02	3.38E+00	1.49E-01	5.76E+00	7.80E-03	2.70E+01	1.02E+01
Agotamiento del ozono estratosférico [kg CFC11 eq]	1.22E-03	8.91E-04	8.91E-08	1.75E-06	1.45E-08	1.36E-05	7.79E-06
Formación de partículas finas [kg PM2.5 eq]	9.80E+00	0.00E+00	4.20E-04	1.46E-02	1.51E-05	6.61E-02	2.48E-02
Acidificación terrestre [kg SO2 eq]	4.91E+00	0.00E+00	1.10E-03	4.68E-02	4.31E-05	1.31E-01	4.79E-02
Eutrofización de agua dulce [kg P eq]	6.62E-01	0.00E+00	2.57E-05	2.51E-03	2.27E-07	2.68E-02	4.76E-03
Eutrofización marina [kg N eq]	6.51E-02	0.00E+00	1.94E-06	1.87E-04	2.58E-08	1.58E-03	4.78E-04
Toxicidad cancerígena humana [kg 1,4-DCB]	1.02E+02	2.54E-01	1.98E-02	7.31E-01	3.99E-04	1.54E+01	1.02E+00
Toxicidad humana no cancerígena [kg 1,4-DCB]	1.47E+03	2.92E+00	1.64E-01	1.15E+01	1.67E-03	1.95E+02	1.75E+01
Escasez de recursos minerales [kg Cu eq]	3.69E+00	0.00E+00	8.69E-04	4.35E-02	2.90E-06	1.10E+00	5.98E-02
Escasez de recursos fósiles [kg petróleo eq]	2.44E+02	0.00E+00	4.45E-02	1.21E+00	2.12E-03	6.54E+00	2.77E+00
Consumo de agua [m3]	2.91E+01	1.73E+01	4.48E-02	1.91E-01	2.49E-04	3.36E-01	2.31E-01

Ceniza de soda, ligera, cristalina, heptahidratada	Cloruro de sodio, polvo	Hidróxido de sodio, sin agua, en estado de solución al 50%	Sulfito	Ácido sulfúrico	Electricidad, alta tensión, mix 2018	Lodos, electrólisis de NaCl	Residuos de papel gráfico
2.30E+00	2.12E+02	2.44E+01	7.11E-02	7.54E-01	6.55E+02	2.26E+00	5.98E-01
7.33E-07	8.87E-05	2.63E-05	5.26E-08	3.93E-07	1.85E-04	3.50E-07	3.85E-08
5.91E-03	4.43E-01	5.27E-02	4.25E-04	8.35E-03	9.18E+00	1.82E-03	6.11E-05
1.94E-02	8.73E-01	8.89E-02	1.22E-03	2.70E-02	3.67E+00	4.49E-03	9.76E-05
1.05E-03	1.12E-01	1.20E-02	3.27E-05	7.74E-04	5.01E-01	6.25E-04	2.78E-06
7.79E-05	2.98E-02	1.28E-03	2.94E-06	3.08E-05	3.14E-02	2.46E-05	2.52E-04
3.07E-01	3.82E+01	2.06E+00	7.20E-03	1.63E-01	4.35E+01	3.36E-01	1.86E-03
4.65E+00	4.84E+02	2.83E+01	1.38E-01	9.68E+00	7.11E+02	3.24E+00	3.09E-01
1.83E-02	2.15E+00	7.76E-02	4.25E-04	3.30E-02	2.03E-01	8.92E-03	5.96E-06
4.93E-01	5.20E+01	6.10E+00	2.13E-02	4.53E-01	1.74E+02	3.14E-01	1.20E-03
8.34E-02	3.30E+00	6.50E-01	1.20E-03	6.96E-02	6.92E+00	8.33E-03	6.12E-06

Tabla A.8. Resultados de impactos finales por etapas para la producción de hidróxido de sodio.

Daño de categoría [Unidad]	Total	Hidróxido de sodio, sin agua, en estado de solución al 50%, electrólisis de cloro-álcali, celda de membrana	Barita	Cloruro de calcio	Tetracloruro de carbono	Fábrica de productos químicos, orgánicos	Ácido clorhídrico, sin agua, en estado de solución al 30%
Salud Humana [DALY]	7.77E-03	4.35E-05	6.06E-07	2.00E-05	1.90E-08	1.63E-04	3.28E-05
Ecosistemas [species.yr]	5.82E-06	2.43E-07	1.61E-09	4.00E-08	3.91E-11	2.52E-07	5.54E-08
Recursos [USD2013]	4.58E+01	0.00E+00	1.81E-02	2.56E-01	7.51E-04	1.77E+00	6.47E-01

Ceniza de soda, ligera, cristalina, heptahidratada	Cloruro de sodio, polvo	Hidróxido de sodio, sin agua, en estado de solución al 50%	Sulfito	Ácido sulfúrico	Electricidad, alta tensión, mix 2018	Lodos, electrólisis de NaCl	Residuos de papel gráfico
8.10E-06	7.19E-04	7.04E-05	3.91E-07	8.84E-06	6.69E-03	5.12E-06	6.71E-07
1.72E-08	1.28E-06	1.28E-07	5.71E-10	1.13E-08	3.78E-06	9.63E-09	1.74E-09
1.08E-01	1.34E+01	1.25E+00	5.26E-03	1.61E-01	2.81E+01	1.04E-01	5.09E-04

Tablas para cal viva

Tabla A.9. Resultados de impactos intermedios por etapas para la producción de cal viva.

Categoría de impacto [Unidad]	Total	Cinta transportadora	máquina industrial, pesada, sin especificar	Cal viva, en trozos	Calefacción, central o a pequeña escala, que no sea gas natural	Electricidad, alta tensión, mix 2018
Calentamiento global [kg CO2 eq]	1.18E+03	9.34E-02	2.21E-01	1.16E+03	1.57E-01	1.44E+01
Agotamiento del ozono estratosférico [kg CFC11 eq]	1.35E-04	2.78E-08	8.19E-08	1.31E-04	6.29E-08	4.08E-06
Formación de partículas finas [kg PM2.5 eq]	5.73E-01	1.50E-04	4.35E-04	3.70E-01	2.20E-04	2.02E-01
Acidificación terrestre [kg SO2 eq]	1.03E+00	2.61E-04	8.02E-04	9.50E-01	6.87E-04	8.08E-02
Eutrofización de agua dulce [kg P eq]	3.39E-02	4.23E-05	1.64E-04	2.26E-02	5.93E-05	1.10E-02
Eutrofización marina [kg N eq]	2.45E-03	7.20E-06	1.79E-05	1.73E-03	4.53E-06	6.91E-04
Toxicidad cancerígena humana [kg 1,4-DCB]	8.40E+00	3.16E-01	7.22E-01	6.40E+00	6.61E-03	9.57E-01
Toxicidad humana no cancerígena [kg 1,4-DCB]	9.20E+01	1.62E-01	9.76E-01	7.51E+01	1.02E-01	1.56E+01
Escasez de recursos minerales [kg Cu eq]	1.20E-01	2.17E-03	8.33E-03	1.05E-01	5.67E-05	4.46E-03
Escasez de recursos fósiles [kg petróleo eq]	1.13E+02	2.11E-02	5.05E-02	1.09E+02	3.03E-02	3.84E+00
Consumo de agua [m3]	7.38E-01	1.59E-03	3.75E-03	5.80E-01	8.16E-04	1.52E-01

Tabla A.10. Resultados de impactos finales por etapas para la producción de cal viva.

Daño de categoría [Unidad]	Total	Cinta transportadora	máquina industrial, pesada, sin especificar	Cal viva, en trozos	Calefacción, central o a pequeña escala, que no sea gas natural	Electricidad, alta tensión, mix 2018
Salud Humana [DALY]	1.50E-03	1.27E-06	3.10E-06	1.35E-03	3.30E-07	1.47E-04
Ecosistemas [species.yr]	3.71E-06	4.57E-10	1.32E-09	3.62E-06	8.77E-10	8.33E-08
Recursos [USD2013]	4.71E+01	5.60E-03	1.39E-02	4.65E+01	4.95E-03	6.18E-01

Tablas para oxígeno líquido

Tabla A.11. Resultados de impactos intermedios por etapas para la producción de oxígeno líquido.

Categoría de impacto [Unidad]	Total	Oxígeno, líquido, separación de aire, criogénica	Instalación de separación de aire	Electricidad, alta tensión, mix 2018
Calentamiento global [kg CO2 eq]	7.08E+02	0.00E+00	9.37E-01	7.07E+02
Agotamiento del ozono estratosférico [kg CFC11 eq]	2.01E-04	0.00E+00	4.31E-07	2.00E-04
Formación de partículas finas [kg PM2.5 eq]	9.91E+00	0.00E+00	2.18E-03	9.91E+00
Acidificación terrestre [kg SO2 eq]	3.97E+00	0.00E+00	4.06E-03	3.96E+00
Eutrofización de agua dulce [kg P eq]	5.42E-01	0.00E+00	7.13E-04	5.41E-01
Eutrofización marina [kg N eq]	3.39E-02	0.00E+00	4.61E-05	3.39E-02
Toxicidad cancerígena humana [kg 1,4-DCB]	4.76E+01	0.00E+00	6.03E-01	4.70E+01
Toxicidad humana no cancerígena [kg 1,4-DCB]	7.71E+02	0.00E+00	3.91E+00	7.67E+02
Escasez de recursos minerales [kg Cu eq]	2.46E-01	0.00E+00	2.76E-02	2.19E-01
Escasez de recursos fósiles [kg petróleo eq]	1.88E+02	0.00E+00	2.28E-01	1.88E+02
Consumo de agua [m3]	2.84E+01	2.09E+01	1.09E-02	7.47E+00

Tabla A.12. Resultados de impactos finales por etapas para la producción de oxígeno líquido.

Daño de categoría [Unidad]	Total	Oxígeno, líquido, separación de aire, criogénica	Instalación de separación de aire	Electricidad, alta tensión, mix 2018
Salud Humana [DALY]	7.28E-03	4.64E-05	5.15E-06	7.23E-03
Ecosistemas [species.yr]	4.37E-06	2.82E-07	5.74E-09	4.09E-06
Recursos [USD2013]	3.04E+01	0.00E+00	5.30E-02	3.03E+01

Tablas para peróxido de hidrógeno

Tabla A.13. Resultados de impactos intermedios por etapas para la producción de peróxido de hidrógeno.

Categoría de impacto [Unidad]	Total	Peróxido de hidrógeno, sin agua, en estado de solución al 50%	óxido de aluminio, no metalúrgico	Antraquinona	Benceno	Fábrica de productos químicos, orgánicos	Químico, inorgánico	Hidrógeno, líquido	Nitrógeno, líquido	Oxígeno, líquido
Calentamiento global [kg CO2 eq]	1.34E+03	0.00E+00	1.59E+01	1.98E+01	4.20E+00	6.11E+01	1.32E+00	1.63E+02	2.24E+01	3.24E+01
Agotamiento del ozono estratosférico [kg CFC11 eq]	3.54E-04	0.00E+00	5.66E-06	5.92E-06	3.82E-07	3.06E-05	5.08E-06	4.50E-05	7.98E-06	1.15E-05
Formación de partículas finas [kg PM2.5 eq]	5.14E+00	0.00E+00	3.33E-02	4.14E-02	7.44E-03	1.49E-01	2.67E-03	1.55E-01	4.99E-02	7.21E-02
Acidificación terrestre [kg SO2 eq]	4.26E+00	0.00E+00	8.92E-02	1.04E-01	1.31E-02	2.96E-01	6.91E-03	3.30E-01	7.39E-02	1.07E-01
Eutrofización de agua dulce [kg P eq]	4.15E-01	4.12E-03	6.29E-03	6.89E-03	1.21E-03	6.06E-02	4.79E-04	2.06E-02	9.47E-03	1.40E-02
Eutrofización marina [kg N eq]	1.00E-01	1.36E-02	5.82E-04	4.70E-04	8.38E-05	3.57E-03	7.33E-05	2.28E-03	7.00E-04	1.02E-03
Toxicidad cancerígena humana [kg 1,4-DCB]	2.05E+02	2.20E-02	1.06E+01	1.22E+02	1.47E-01	3.48E+01	1.44E-01	4.62E+00	1.02E+00	1.45E+00
Toxicidad humana no cancerígena [kg 1,4-DCB]	1.88E+03	1.00E-01	3.60E+01	2.55E+01	1.77E+00	4.40E+02	2.05E+00	5.20E+01	1.57E+01	2.26E+01
Escasez de recursos minerales [kg Cu eq]	3.82E+00	0.00E+00	7.36E-01	1.48E-01	1.13E-03	2.49E+00	4.42E-02	1.35E-01	1.23E-02	1.74E-02
Escasez de recursos fósiles [kg petróleo eq]	4.13E+02	0.00E+00	3.53E+00	6.03E+00	2.88E+00	1.48E+01	3.15E-01	1.09E+02	5.53E+00	7.97E+00
Consumo de agua [m3]	7.55E+01	6.62E+01	9.54E-02	3.67E-01	5.36E-02	7.59E-01	2.81E-02	2.87E+00	5.50E-01	7.98E-01

Hidróxido de sodio, sin agua, en estado de solución al 50%	Disolvente orgánico	Calor, distrito o industrial, gas natural	Calor, urbano o industrial, que no sea gas natural	vapor, en la industria química	Electricidad, alta tensión, mix 2018	Residuos sólidos urbanos	Residuos sólidos municipales	Residuo de la torre de enfriamiento	Residuos de aluminio
8.41E-01	1.15E+00	8.25E+01	2.87E+01	5.31E+02	2.79E+02	1.42E-01	9.73E+01	1.03E-03	1.18E-01
9.05E-07	1.67E-06	3.02E-05	5.88E-06	1.05E-04	7.90E-05	9.54E-09	1.95E-05	3.53E-10	4.80E-08
1.81E-03	2.49E-03	2.73E-02	6.26E-02	5.18E-01	3.91E+00	1.35E-05	1.04E-01	2.64E-06	2.43E-04
3.06E-03	6.89E-03	8.20E-02	1.64E-01	1.39E+00	1.56E+00	2.78E-05	3.37E-02	7.34E-06	4.95E-04
4.13E-04	2.20E-04	1.11E-03	7.92E-03	6.19E-02	2.13E-01	4.06E-06	6.34E-03	8.38E-08	3.43E-05
4.41E-05	1.63E-05	2.01E-04	5.53E-04	4.42E-03	1.34E-02	1.31E-04	5.92E-02	1.10E-08	2.85E-06
7.08E-02	1.03E-01	1.12E+00	7.58E-01	8.67E+00	1.85E+01	2.60E-03	1.97E+00	4.86E-03	8.80E-03
9.74E-01	1.06E+00	5.09E+00	2.11E+01	1.63E+02	3.03E+02	1.51E+00	7.83E+02	4.24E-01	6.65E-01
2.67E-03	4.78E-03	2.94E-02	5.35E-03	1.09E-01	8.63E-02	8.28E-06	4.27E-03	1.61E-06	1.84E-04
2.10E-01	1.75E+00	3.06E+01	5.19E+00	1.51E+02	7.42E+01	2.08E-03	1.85E-01	2.96E-04	3.69E-02
2.24E-02	1.76E-02	1.07E-01	3.62E-02	6.49E-01	2.95E+00	6.12E-05	8.07E-03	1.20E-05	1.24E-03

Tabla A.14. Resultados de impactos finales por etapas para la producción de peróxido de hidrógeno.

Daño de categoría [Unidad]	Total	Peróxido de hidrógeno, sin agua, en estado de solución al 50%	óxido de aluminio, no metalúrgico	Antraquinona	Benceno	Fábrica de productos químicos, orgánicos	Químico, inorgánico	Hidrógeno, líquido	Nitrógeno, líquido	Oxígeno, líquido
Salud Humana [DALY]	5.75E-03	1.47E-04	7.91E-05	4.55E-04	9.59E-06	3.68E-04	3.91E-06	2.82E-04	6.02E-05	8.70E-05
Ecosistemas [species.yr]	6.96E-06	9.21E-07	1.07E-07	1.04E-07	1.84E-08	5.70E-07	7.09E-09	6.38E-07	1.04E-07	1.50E-07
Recursos [USD2013]	1.28E+02	0.00E+00	9.72E-01	1.79E+00	9.81E-01	3.99E+00	9.26E-02	4.16E+01	1.00E+00	1.43E+00

Hidróxido de sodio, sin agua, en estado de solución al 50%	Disolvente orgánico	Calor, urbano o industrial, gas natural	Calor, urbano o industrial, que no sea gas natural	vapor, en la industria química	Electricidad, alta tensión, mix 2018	Residuos sólidos urbanos	Residuos sólidos municipales	Residuo de la torre de enfriamiento	Residuos de aluminio
2.42E-06	3.25E-06	9.87E-05	7.34E-05	8.86E-04	2.85E-03	4.94E-07	3.41E-04	1.16E-07	4.45E-07
4.39E-09	6.85E-09	2.63E-07	1.41E-07	1.98E-06	1.61E-06	4.75E-10	3.32E-07	3.71E-11	6.65E-10
4.32E-02	7.64E-01	1.09E+01	7.15E-01	4.99E+01	1.20E+01	9.00E-04	6.97E-02	1.23E-04	1.15E-02

Tablas para metanol

Tabla A.15. Resultados de impactos intermedios por etapas para la producción de metanol.

Categoría de impacto [Unidad]	Total	Producción Metanol	óxido de aluminio, no metalúrgico	Óxido de cobre	Fábrica de metanol	Molibdeno
Calentamiento global [kg CO2 eq]	6.41E+02	3.53E+01	3.82E-01	6.60E-01	1.24E+00	1.71E-01
Agotamiento del ozono estratosférico [kg CFC11 eq]	3.37E-04	0.00E+00	1.36E-07	8.71E-07	6.40E-07	2.70E-07
Formación de partículas finas [kg PM2.5 eq]	9.64E-01	2.05E-02	7.41E-04	3.60E-03	4.18E-03	1.06E-03
Acidificación terrestre [kg SO2 eq]	1.57E+00	6.78E-02	1.99E-03	8.90E-03	8.46E-03	1.89E-03
Eutrofización de agua dulce [kg P eq]	6.00E-02	1.00E-02	1.47E-04	3.21E-03	1.21E-03	1.38E-03
Eutrofización marina [kg N eq]	5.52E-03	0.00E+00	1.27E-05	1.02E-04	8.12E-05	2.50E-05
Toxicidad cancerígena humana [kg 1,4-DCB]	2.18E+01	1.37E-02	2.67E-01	2.99E-01	2.32E+00	7.49E-02
Toxicidad humana no cancerígena [kg 1,4-DCB]	1.75E+02	6.33E-02	8.56E-01	3.23E+01	1.20E+01	1.14E+01
Escasez de recursos minerales [kg Cu eq]	8.03E-01	0.00E+00	1.89E-02	1.21E-01	8.53E-02	1.05E-01
Escasez de recursos fósiles [kg petróleo eq]	7.41E+02	0.00E+00	9.04E-02	1.85E-01	3.14E-01	4.02E-02
Consumo de agua [m3]	4.11E+00	2.49E+00	2.22E-03	2.04E-02	1.91E-02	5.26E-03

Gas natural, alta presión	níquel, clase 1	agua, desionizada	Zinc	Calor, urbano o industrial, gas natural	Electricidad, alta tensión, mix 2018
2.71E+02	3.72E-01	2.72E-01	8.35E-02	2.95E+02	3.69E+01
2.25E-04	3.33E-07	2.54E-07	5.29E-08	9.91E-05	1.04E-05
3.23E-01	9.12E-03	6.63E-04	1.95E-04	8.37E-02	5.17E-01
9.91E-01	3.07E-02	1.57E-03	5.30E-04	2.51E-01	2.07E-01
1.16E-02	2.97E-04	1.05E-04	1.02E-04	3.80E-03	2.82E-02
2.87E-03	4.13E-05	1.16E-05	5.97E-06	6.02E-04	1.77E-03
1.26E+01	6.02E-02	3.83E-02	3.64E-02	3.69E+00	2.45E+00
5.61E+01	3.49E+00	4.86E-01	2.89E+00	1.51E+01	4.00E+01
2.49E-01	1.09E-01	2.28E-03	7.77E-03	9.22E-02	1.14E-02
6.19E+02	1.10E-01	7.39E-02	2.23E-02	1.11E+02	9.82E+00
2.34E-01	3.51E-02	5.94E-01	2.57E-03	3.22E-01	3.90E-01

Tabla A.16. Resultados de impactos finales por etapas para la producción de metanol.

Daño de categoría [Unidad]	Total	Producción Metanol	óxido de aluminio, no metalúrgico	Óxido de cobre	Fábrica de metanol	Molibdeno
Salud Humana [DALY]	1.32E-03	5.14E-05	1.91E-06	1.13E-05	1.42E-05	3.68E-06
Ecosistemas [species.yr]	2.44E-06	1.78E-07	2.45E-09	1.40E-08	1.37E-08	3.58E-09
Recursos [USD2013]	2.63E+02	0.00E+00	2.68E-02	8.08E-02	1.03E-01	3.27E-02

Gas natural, alta presión	níquel, clase 1	agua, desionizada	Zinc	Calor, urbano o industrial, gas natural	Electricidad, alta tensión, mix 2018
5.10E-04	7.14E-06	2.22E-06	9.85E-07	3.42E-04	3.77E-04
1.07E-06	9.27E-09	9.43E-09	6.83E-10	9.26E-07	2.13E-07
2.21E+02	5.74E-02	2.03E-02	7.21E-03	3.97E+01	1.58E+00

Tablas para diésel

Tabla A.17. Resultados de impactos intermedios por etapas para la producción de diésel.

Categoría de impacto [Unidad]	Total	Producción de diésel, operación de refinería de petróleo	óxido de aluminio, no metalúrgico	Cobalto	Ácido clorhídrico, sin agua, en estado de solución al 30%	Caolín	Óxido de lantano	Cal, hidratada, envasada	Tríóxido de molibdeno	níquel, clase 1
Calentamiento global [kg CO2 eq]	4.40E+02	1.83E+02	1.34E-01	7.63E-02	8.84E-02	3.58E-03	6.76E-02	3.91E-01	1.38E-02	3.14E-02
Agotamiento del ozono estratosférico [kg CFC11 eq]	8.92E-04	7.76E-05	4.78E-08	7.38E-08	6.78E-08	1.50E-09	5.26E-08	5.43E-08	2.65E-08	2.81E-08
Formación de partículas finas [kg PM2.5 eq]	1.19E+00	2.36E-01	2.81E-04	2.56E-04	2.15E-04	6.82E-06	1.30E-04	1.70E-04	1.25E-04	7.71E-04
Acidificación terrestre [kg SO2 eq]	3.53E+00	7.03E-01	7.33E-04	7.42E-04	4.17E-04	1.38E-05	3.22E-04	4.23E-04	2.67E-04	2.60E-03
Eutrofización de agua dulce [kg P eq]	2.95E-02	2.05E-04	5.31E-05	4.54E-05	4.15E-05	1.45E-06	2.58E-05	1.26E-05	1.40E-04	2.51E-05
Eutrofización marina [kg N eq]	3.47E-03	1.76E-04	4.92E-06	1.21E-05	4.16E-06	1.10E-07	8.39E-04	3.84E-06	2.46E-06	3.49E-06
Toxicidad cancerígena humana [kg 1,4-DCB]	2.31E+01	5.18E-01	8.93E-02	1.71E-02	8.90E-03	1.72E-04	6.76E-03	4.55E-03	7.52E-03	5.09E-03
Toxicidad humana no cancerígena [kg 1,4-DCB]	1.55E+02	8.54E+00	3.04E-01	1.11E+00	1.53E-01	2.99E-03	2.27E-01	4.84E-02	1.14E+00	2.95E-01
Escasez de recursos minerales [kg Cu eq]	7.78E-01	0.00E+00	6.21E-03	2.73E-02	5.21E-04	4.70E-06	3.52E-02	8.82E-05	1.08E-02	9.23E-03
Escasez de recursos fósiles [kg petróleo eq]	1.15E+03	0.00E+00	2.98E-02	2.64E-02	2.42E-02	9.86E-04	1.65E-02	4.18E-02	3.24E-03	9.27E-03
Consumo de agua [m3]	6.84E+00	6.65E+00	8.06E-04	1.59E-02	2.01E-03	5.96E-05	9.35E-04	4.06E-04	5.14E-04	2.97E-03

Petróleo	Refinería de petróleo	Platino	Cal viva, molida, envasada	Producto de sílica	Hidróxido de sodio, sin agua, en estado de solución al 50%	Zeolita, polvo	Residuos peligrosos, para incineración	residuos peligrosos, para depósito subterráneo	Lodos de refinería	Residuos de yeso
2.52E+02	9.14E-02	1.77E+00	1.10E-01	5.60E-02	6.33E-02	2.45E-01	7.40E-01	4.06E-02	1.14E+00	3.24E-03
8.10E-04	2.88E-08	3.38E-06	1.39E-08	5.01E-08	6.81E-08	1.34E-07	2.40E-07	1.10E-08	3.44E-07	1.92E-09
9.24E-01	2.03E-04	2.62E-02	4.18E-05	9.14E-05	1.37E-04	4.45E-04	3.48E-04	6.58E-05	6.28E-04	4.16E-04
2.73E+00	3.59E-04	9.11E-02	1.03E-04	1.88E-04	2.30E-04	9.86E-04	7.64E-04	1.16E-04	1.80E-03	1.43E-03
2.62E-02	5.99E-05	2.23E-03	3.28E-06	1.39E-05	3.11E-05	9.74E-05	2.08E-04	1.39E-05	8.36E-05	4.03E-07
2.30E-03	3.69E-06	8.18E-05	8.92E-07	1.36E-06	3.32E-06	1.11E-05	1.23E-05	1.31E-06	9.80E-06	3.92E-08
2.20E+01	4.36E-02	2.77E-01	1.01E-03	2.31E-03	5.33E-03	8.77E-02	8.59E-02	1.63E-02	2.14E-02	3.84E-04
1.04E+02	3.76E-01	3.78E+01	1.08E-02	3.92E-02	7.33E-02	4.10E-01	3.03E-01	2.83E-02	4.05E-01	1.73E-02
4.57E+01	3.71E-03	2.20E-01	1.74E-05	9.83E-05	2.01E-04	5.57E-02	4.95E-04	1.26E-03	4.92E-04	6.21E-06
1.15E+03	1.96E-02	5.86E-01	1.10E-02	1.86E-02	1.58E-02	6.42E-02	7.92E-02	9.51E-03	3.00E-01	1.62E-03
1.37E-01	6.46E-04	9.97E-03	7.11E-05	1.97E-03	1.68E-03	3.76E-03	2.62E-03	2.07E-04	9.58E-04	6.08E-05

Tabla A.18. Resultados de impactos finales por etapas para la producción de diésel.

Daño de categoría [Unidad]	Total	Producción de diésel, operación de refinería de petróleo	óxido de aluminio, no metalúrgico	Cobalto	Ácido clorhídrico, sin agua, en estado de solución al 30%	Caolín	Óxido de lantano	Cal, hidratada, envasada	Tríóxido de molibdeno	níquel, clase 1
Salud Humana [DALY]	1.27E-03	3.22E-04	6.68E-07	5.76E-07	2.86E-07	8.97E-09	2.20E-07	4.97E-07	3.77E-07	6.03E-07
Ecosistemas [species.yr]	2.34E-06	7.26E-07	9.05E-10	7.77E-10	4.83E-10	1.78E-11	5.17E-10	1.32E-09	3.64E-10	7.83E-10
Recursos [USD2013]	5.17E+02	0.00E+00	8.21E-03	1.50E-02	5.63E-03	2.37E-04	1.25E-02	1.75E-02	3.19E-03	4.85E-03

Petróleo	Refinería de petróleo	Platino	Cal viva, molida, envasada	Producto de sílica	Hidróxido de sodio, sin agua, en estado de solución al 50%	Zeolita, polvo	Residuos peligrosos, para incineración	residuos peligrosos, para depósito subterráneo	Lodos de refinería	Residuos de yeso
9.12E-04	4.44E-07	2.77E-05	1.34E-07	1.30E-07	1.82E-07	9.01E-07	1.26E-06	1.40E-07	1.62E-06	2.70E-07
1.57E-06	6.92E-10	3.08E-08	3.60E-10	2.77E-10	3.31E-10	1.28E-09	2.57E-09	2.54E-10	3.82E-09	3.20E-10
5.17E+02	4.71E-03	1.61E-01	4.59E-03	5.79E-03	3.25E-03	1.84E-02	2.97E-02	2.75E-03	1.33E-01	6.75E-04

Tablas para fuel oil

Tabla A.19. Resultados de impactos intermedios por etapas para la producción de fuel oil.

Categoría de impacto [Unidad]	Total	Producción de fuel oil pesado, operación de refinería de petróleo	óxido de aluminio, no metalúrgico	Cobalto	Ácido clorhídrico, sin agua, en estado de solución al 30%	Caolín	Óxido de lantano	Cal, hidratada, envasada	Tríóxido de molibdeno	níquel, clase 1
Calentamiento global [kg CO2 eq]	3.02E+02	7.36E+01	1.49E-02	8.48E-03	5.32E-02	3.98E-04	7.51E-03	1.23E-01	1.53E-03	3.49E-03
Agotamiento del ozono estratosférico [kg CFC11 eq]	7.60E-04	3.01E-05	5.31E-09	8.20E-09	4.08E-08	1.67E-10	5.85E-09	1.70E-08	2.95E-09	3.13E-09
Formación de partículas finas [kg PM2.5 eq]	9.34E-01	9.75E-02	3.12E-05	2.84E-05	1.30E-04	7.58E-07	1.45E-05	5.33E-05	1.39E-05	8.56E-05
Acidificación terrestre [kg SO2 eq]	2.76E+00	2.91E-01	8.37E-05	8.24E-05	2.51E-04	1.54E-06	3.58E-05	1.33E-04	2.97E-05	2.88E-04
Eutrofización de agua dulce [kg P eq]	2.44E-02	1.49E-04	5.90E-06	5.04E-06	2.49E-05	1.61E-07	2.87E-06	3.94E-06	1.56E-05	2.79E-06
Eutrofización marina [kg N eq]	2.33E-03	1.28E-04	5.47E-07	1.35E-06	2.50E-06	1.23E-08	9.33E-05	1.20E-06	2.73E-07	3.87E-07
Toxicidad cancerígena humana [kg 1,4-DCB]	2.01E+01	1.96E-01	9.92E-03	1.91E-03	5.35E-03	1.91E-05	7.51E-04	1.43E-03	8.36E-04	5.66E-04
Toxicidad humana no cancerígena [kg 1,4-DCB]	1.02E+02	3.32E+00	3.38E-02	1.23E-01	9.18E-02	3.33E-04	2.53E-02	1.52E-02	1.26E-01	3.28E-02
Escasez de recursos minerales [kg Cu eq]	4.51E-01	0.00E+00	6.90E-04	3.03E-03	3.13E-04	5.23E-07	3.91E-03	2.77E-05	1.20E-03	1.03E-03
Escasez de recursos fósiles [kg petróleo eq]	1.03E+03	0.00E+00	3.31E-03	2.94E-03	1.45E-02	1.10E-04	1.83E-03	1.31E-02	3.60E-04	1.03E-03
Consumo de agua [m3]	3.60E+00	3.46E+00	8.95E-05	1.76E-03	1.21E-03	6.62E-06	1.04E-04	1.27E-04	5.71E-05	3.30E-04

Petróleo	Refinería de petróleo	Platino	Cal viva, molida, envasada	Producto de sílica	Hidróxido de sodio, sin agua, en estado de solución al 50%	Zeolita, polvo	Residuos peligrosos, para incineración	residuos peligrosos, para depósito subterráneo	Lodos de refinería	Residuos de yeso
2.26E+02	8.23E-02	1.96E-01	3.44E-02	6.22E-03	3.80E-02	2.72E-02	6.66E-01	4.51E-03	8.29E-01	1.02E-03
7.29E-04	2.59E-08	3.75E-07	4.36E-09	5.57E-09	4.10E-08	1.49E-08	2.16E-07	1.22E-09	2.51E-07	6.03E-10
8.32E-01	1.83E-04	2.91E-03	1.31E-05	1.02E-05	8.21E-05	4.95E-05	3.13E-04	7.31E-06	4.57E-04	1.31E-04
2.45E+00	3.23E-04	1.01E-02	3.23E-05	2.09E-05	1.39E-04	1.10E-04	6.88E-04	1.29E-05	1.31E-03	4.47E-04
2.36E-02	5.39E-05	2.48E-04	1.03E-06	1.55E-06	1.87E-05	1.08E-05	1.88E-04	1.55E-06	6.09E-05	1.26E-07
2.07E-03	3.32E-06	9.09E-06	2.80E-07	1.51E-07	1.99E-06	1.23E-06	1.11E-05	1.46E-07	7.13E-06	1.23E-08
1.98E+01	3.92E-02	3.08E-02	3.17E-04	2.56E-04	3.20E-03	9.74E-03	7.73E-02	1.81E-03	1.56E-02	1.21E-04
9.35E+01	3.38E-01	4.21E+00	3.39E-03	4.35E-03	4.41E-02	4.56E-02	2.72E-01	3.15E-03	2.95E-01	5.42E-03
4.11E-01	3.34E-03	2.44E-02	5.47E-06	1.09E-05	1.21E-04	6.18E-04	4.46E-04	1.40E-04	3.58E-04	1.95E-06
1.03E+03	1.77E-02	6.51E-02	3.44E-03	2.07E-03	9.50E-03	7.13E-03	7.13E-02	1.06E-03	2.18E-01	5.06E-04
1.23E-01	5.81E-04	1.11E-03	2.23E-05	2.19E-04	1.01E-03	4.18E-04	2.36E-03	2.30E-05	6.97E-04	1.91E-05

Tabla A.20. Resultados de impactos finales por etapas para la producción de fuel oil.

Daño de categoría [Unidad]	Total	Producción de fuel oil pesado, operación de refinería de petróleo	óxido de aluminio, no metalúrgico	Cobalto	Ácido clorhídrico, sin agua, en estado de solución al 30%	Caolín	Óxido de lantano	Cal, hidratada, envasada	Tríóxido de molibdeno	níquel, clase 1
Salud Humana [DALY]	9.59E-04	1.31E-04	7.43E-08	6.40E-08	1.72E-07	9.97E-10	2.45E-08	1.56E-07	4.19E-08	6.70E-08
Ecosistemas [species.yr]	1.72E-06	2.99E-07	1.01E-10	8.63E-11	2.90E-10	1.97E-12	5.75E-11	4.15E-10	4.05E-11	8.70E-11
Recursos [USD2013]	4.65E+02	0.00E+00	9.12E-04	1.67E-03	3.39E-03	2.64E-05	1.39E-03	5.48E-03	3.55E-04	5.39E-04

Petróleo	Refinería de petróleo	Platino	Cal viva, molida, envasada	Producto de sílicona	Hidróxido de sodio, sin agua, en estado de solución al 50%	Zeolita, polvo	Residuos peligrosos, para incineración	residuos peligrosos, para depósito subterráneo	Lodos de refinería	Residuos de yeso
8.21E-04	4.00E-07	3.08E-06	4.21E-08	1.45E-08	1.10E-07	1.00E-07	1.14E-06	1.56E-08	1.18E-06	8.45E-08
1.41E-06	6.22E-10	3.43E-09	1.13E-10	3.08E-11	1.99E-10	1.42E-10	2.32E-09	2.82E-11	2.78E-09	1.00E-10
4.65E+02	4.24E-03	1.79E-02	1.44E-03	6.44E-04	1.95E-03	2.05E-03	2.67E-02	3.05E-04	9.69E-02	2.12E-04

Tablas para GLP

Tabla A.21. Resultados de impactos intermedios por etapas para la producción de GLP.

Categoría de impacto [Unidad]	Total	Producción de gas licuado de petróleo (LPG), operación de refinería de petróleo	óxido de aluminio, no metalúrgico	Cobalto	Ácido clorhídrico, sin agua, en estado de solución al 30%	Caolín	Óxido de lantano	Cal, hidratada, envasada	Tríóxido de molibdeno	níquel, clase 1
Calentamiento global [kg CO2 eq]	6.11E+02	3.28E+02	1.17E-01	6.67E-02	1.47E-01	3.13E-03	5.90E-02	8.19E-01	1.20E-02	2.74E-02
Agotamiento del ozono estratosférico [kg CFC11 eq]	1.04E-03	1.40E-04	4.17E-08	6.44E-08	1.13E-07	1.31E-09	4.59E-08	1.14E-07	2.32E-08	2.46E-08
Formación de partículas finas [kg PM2.5 eq]	1.45E+00	4.08E-01	2.45E-04	2.23E-04	3.58E-04	5.95E-06	1.14E-04	3.56E-04	1.10E-04	6.73E-04
Acidificación terrestre [kg SO2 eq]	4.29E+00	1.19E+00	6.58E-04	6.47E-04	6.92E-04	1.21E-05	2.81E-04	8.85E-04	2.33E-04	2.27E-03
Eutrofización de agua dulce [kg P eq]	3.19E-02	2.27E-04	4.64E-05	3.96E-05	6.88E-05	1.27E-06	2.25E-05	2.63E-05	1.22E-04	2.19E-05
Eutrofización marina [kg N eq]	3.61E-03	1.94E-04	4.29E-06	1.06E-05	6.90E-06	9.63E-08	7.33E-04	8.05E-06	2.15E-06	3.04E-06
Toxicidad cancerígena humana [kg 1,4-DCB]	2.58E+01	9.17E-01	7.80E-02	1.50E-02	1.48E-02	1.50E-04	5.90E-03	9.52E-03	6.57E-03	4.44E-03
Toxicidad humana no cancerígena [kg 1,4-DCB]	1.67E+02	1.44E+01	2.65E-01	9.69E-01	2.33E-01	2.61E-03	1.98E-01	1.01E-01	9.93E-01	2.57E-01
Escasez de recursos minerales [kg Cu eq]	7.86E-01	0.00E+00	5.43E-03	2.38E-02	8.64E-04	4.11E-06	3.08E-02	1.85E-04	9.42E-03	8.06E-03
Escasez de recursos fósiles [kg petróleo eq]	1.26E+03	0.00E+00	2.60E-02	2.31E-02	4.01E-02	8.60E-04	1.44E-02	8.75E-02	2.83E-03	8.09E-03
Consumo de agua [m3]	1.09E+01	1.07E+01	7.03E-04	1.39E-02	3.33E-03	5.21E-05	8.16E-04	8.50E-04	4.48E-04	2.59E-03

Petróleo	Refinería de petróleo	Platino	Cal viva, molida, envasada	Producto de sílicona	Hidróxido de sodio, sin agua, en estado de solución al 50%	Zeolita, polvo	Residuos peligrosos, para incineración	residuos peligrosos, para depósito subterráneo	Lodos de refinería	Residuos de yeso
2.77E+02	1.01E-01	1.54E+00	2.30E-01	4.89E-02	1.05E-01	2.14E-01	8.15E-01	3.55E-02	1.26E+00	6.79E-03
8.93E-04	3.17E-08	2.95E-06	2.91E-08	4.38E-08	1.13E-07	1.17E-07	2.65E-07	9.59E-09	3.80E-07	4.03E-09
1.02E+00	2.24E-04	2.29E-02	8.77E-05	7.98E-05	2.27E-04	3.89E-04	3.84E-04	5.75E-05	6.94E-04	8.72E-04
3.00E+00	3.96E-04	7.95E-02	2.16E-04	1.64E-04	3.82E-04	8.61E-04	8.42E-04	1.01E-04	1.99E-03	2.99E-03
2.89E-02	6.61E-05	1.95E-03	6.87E-06	1.22E-05	5.16E-05	8.51E-05	2.30E-04	1.22E-05	9.24E-05	8.44E-07
2.53E-03	4.06E-06	7.14E-05	1.87E-06	1.19E-06	5.51E-06	9.67E-06	1.36E-05	1.15E-06	1.08E-05	8.21E-08
2.42E+01	4.81E-02	2.42E-01	2.11E-03	2.02E-03	8.85E-03	7.66E-02	9.46E-02	1.42E-02	2.36E-02	8.05E-04
1.14E+02	4.14E-01	3.30E+01	2.27E-02	3.42E-02	1.22E-01	3.58E-01	3.34E-01	2.48E-02	4.48E-01	3.62E-02
5.03E-01	4.09E-03	1.92E-01	3.65E-05	8.59E-05	3.34E-04	4.86E-03	5.46E-04	1.10E-03	5.43E-04	1.30E-05
1.26E+03	2.16E-02	5.12E-01	2.30E-02	1.62E-02	2.62E-02	5.60E-02	8.73E-02	8.31E-03	3.31E-01	3.38E-03
1.51E-01	7.12E-04	8.70E-03	1.49E-04	1.72E-03	2.79E-03	3.28E-03	2.89E-03	1.81E-04	1.06E-03	1.27E-04

Tabla A.22. Resultados de impactos finales por etapas para la producción de GLP.

Daño de categoría [Unidad]	Total	Producción de gas licuado de petróleo (LPG), operación de refinería de petróleo	óxido de aluminio, no metalúrgico	Cobalto	Ácido clorhídrico, sin agua, en estado de solución al 30%	Caolín	Óxido de lantano	Cal, hidratada, envasada	Tríóxido de molibdeno	níquel, clase 1
Salud Humana [DALY]	1.61E-03	5.67E-04	5.84E-07	5.03E-07	4.74E-07	7.83E-09	1.92E-07	1.04E-06	3.29E-07	5.27E-07
Ecosistemas [species.yr]	3.06E-06	1.28E-06	7.90E-10	6.78E-10	8.01E-10	1.55E-11	4.52E-10	2.77E-09	3.18E-10	6.83E-10
Recursos [USD2013]	5.70E+02	0.00E+00	7.17E-03	1.31E-02	9.35E-03	2.07E-04	1.09E-02	3.66E-02	2.79E-03	4.24E-03

Petróleo	Refinería de petróleo	Platino	Cal viva, molida, envasada	Producto de sílicona	Hidróxido de sodio, sin agua, en estado de solución al 50%	Zeolita, polvo	Residuos peligrosos, para incineración	residuos peligrosos, para depósito subterráneo	Lodos de refinería	Residuos de yeso
1.01E-03	4.90E-07	2.42E-05	2.81E-07	1.14E-07	3.03E-07	7.87E-07	1.39E-06	1.22E-07	1.79E-06	5.65E-07
1.73E-06	7.62E-10	2.69E-08	7.55E-10	2.42E-10	5.49E-10	1.11E-09	2.84E-09	2.22E-10	4.22E-09	6.71E-10
5.69E+02	5.19E-03	1.41E-01	9.61E-03	5.06E-03	5.39E-03	1.61E-02	3.27E-02	2.40E-03	1.47E-01	1.41E-03

Tablas para GNL

Tabla A.23. Resultados de impactos intermedios por etapas para la producción de GNL.

Categoría de impacto [Unidad]	Total	Producción Gas natural, alta presión	Secado, gas natural	Etilenglicol	Metanol	Gas natural, sin procesar, extracción	Infraestructura de campo de gas natural en tierra	Pozo terrestre, petróleo/gas
Calentamiento global [kg CO2 eq]	3.18E-01	7.72E-02	2.10E-02	6.88E-07	3.66E-07	1.65E-01	1.34E-03	3.08E-03
Agotamiento del ozono estratosférico [kg CFC11 eq]	1.87E-08	0.00E+00	5.22E-09	1.41E-13	1.93E-13	4.05E-09	3.85E-10	2.25E-09
Formación de partículas finas [kg PM2.5 eq]	4.41E-04	1.24E-04	2.41E-05	9.45E-10	3.42E-10	2.19E-05	2.34E-06	7.93E-06
Acidificación terrestre [kg SO2 eq]	1.40E-03	4.27E-04	4.21E-05	1.90E-09	9.39E-10	3.34E-05	3.84E-06	1.46E-05
Eutrofización de agua dulce [kg P eq]	1.13E-05	0.00E+00	4.90E-06	1.91E-10	3.77E-11	4.91E-06	5.56E-07	5.25E-07
Eutrofización marina [kg N eq]	5.46E-06	0.00E+00	4.02E-07	1.34E-11	3.47E-12	4.74E-06	5.70E-08	5.05E-08
Toxicidad cancerígena humana [kg 1,4-DCB]	8.22E-03	2.03E-05	3.79E-03	4.07E-08	1.39E-08	5.96E-04	1.73E-03	1.22E-03
Toxicidad humana no cancerígena [kg 1,4-DCB]	1.43E-01	1.03E-04	8.33E-03	5.16E-07	1.09E-07	1.27E-01	1.14E-03	2.41E-03
Escasez de recursos minerales [kg Cu eq]	1.60E-04	0.00E+00	7.20E-05	1.76E-09	4.92E-10	5.91E-06	3.38E-05	3.00E-05
Escasez de recursos fósiles [kg petróleo eq]	8.86E-01	4.53E-01	6.22E-03	3.62E-07	3.97E-07	4.12E-01	2.95E-04	8.83E-04
Consumo de agua [m3]	2.14E-04	0.00E+00	8.42E-05	8.92E-09	2.22E-09	7.57E-05	1.25E-05	2.77E-05

Endulzante, gas natural	Diesel, quemado en grupo electrógeno	Gas amargo, quemado en turbina de gas	Gas dulce, quemado en turbina de gas	Electricidad, alta tensión, mix Magallanes	Residuo medio de incineración	residuos peligrosos, para depósito subterráneo	Residuos sólidos municipales	Líquido anticongelante gastado
2.64E-02	1.81E-03	2.29E-03	1.06E-02	4.18E-03	6.32E-10	1.08E-05	2.52E-04	4.69E-08
2.65E-09	1.83E-09	9.45E-11	4.37E-10	1.71E-09	8.04E-17	2.91E-12	9.32E-11	1.15E-14
1.74E-04	7.81E-06	4.82E-05	3.46E-06	3.50E-06	3.52E-13	1.75E-08	4.24E-08	2.20E-11
5.99E-04	1.37E-05	1.66E-04	1.13E-05	1.10E-05	9.83E-13	3.07E-08	6.26E-08	6.33E-11
3.03E-07	2.32E-08	3.51E-09	1.63E-08	3.69E-08	3.99E-12	3.70E-09	1.30E-08	7.35E-13
4.70E-08	2.28E-09	1.72E-10	7.97E-10	8.48E-09	9.35E-15	3.48E-10	1.52E-07	6.72E-14
7.78E-04	1.98E-05	2.32E-06	1.07E-05	3.75E-05	8.94E-09	4.33E-06	9.10E-06	6.95E-10
1.14E-03	1.26E-04	3.02E-05	1.40E-04	2.56E-04	2.28E-08	7.52E-06	2.48E-03	3.23E-09
1.56E-05	5.71E-07	1.44E-07	6.64E-07	8.26E-07	1.60E-12	3.34E-07	4.38E-08	1.65E-11
5.99E-03	5.73E-04	7.88E-04	3.64E-03	1.45E-03	6.54E-11	2.52E-06	3.13E-06	1.07E-08
6.88E-06	6.40E-07	3.74E-08	1.73E-07	6.55E-06	3.15E-12	5.49E-08	2.18E-07	2.99E-11

Mezcla de disolventes usados	Residuos de pintura en emulsión	Aceite mineral usado	Gas natural residual, agro	Gas natural residual, dulce	Residuos textiles, sucios	Residuos de madera sin tratar	Vertido de agua procedente de la extracción de petróleo/gas natural, en tierra
1.17E-07	9.16E-08	1.67E-05	9.70E-04	4.39E-03	1.04E-08	1.54E-07	0.00E+00
3.14E-14	5.54E-15	7.56E-14	0.00E+00	0.00E+00	1.61E-13	1.40E-13	0.00E+00
1.94E-11	1.31E-11	5.25E-10	2.06E-05	2.73E-06	6.11E-12	6.70E-11	0.00E+00
4.27E-11	3.08E-11	8.61E-10	7.07E-05	7.79E-06	1.94E-11	1.42E-10	0.00E+00
1.66E-11	2.53E-12	1.08E-09	0.00E+00	0.00E+00	1.36E-13	2.84E-10	0.00E+00
2.25E-12	4.89E-13	2.90E-12	0.00E+00	0.00E+00	3.20E-12	2.71E-10	0.00E+00
1.04E-09	1.44E-09	1.70E-07	5.69E-09	2.57E-08	1.08E-10	5.31E-09	4.12E-09
7.77E-09	1.60E-08	1.60E-06	2.29E-06	1.03E-05	5.96E-09	2.29E-07	3.26E-05
2.95E-11	3.60E-11	1.09E-09	0.00E+00	0.00E+00	8.44E-12	6.09E-11	0.00E+00
3.59E-09	2.95E-09	3.70E-08	3.31E-04	1.50E-03	3.98E-10	7.06E-09	0.00E+00
1.61E-10	1.02E-09	5.37E-09	0.00E+00	0.00E+00	2.13E-11	2.58E-11	-3.72E-07

Tabla A.24. Resultados de impactos finales por etapas para la producción de GNL.

Daño de categoría [Unidad]	Total	Producción Gas natural, alta presión	Secado, gas natural	Etilenglicol	Metanol	Gas natural, sin procesar, extracción	Infraestructura de campo de gas natural en tierra	Pozo terrestre, petróleo/gas
Salud Humana [DALY]	6.33E-07	1.49E-07	4.93E-08	1.50E-12	6.30E-13	1.98E-07	8.72E-09	1.25E-08
Ecosistemas [species.yr]	1.28E-09	3.25E-10	8.22E-11	3.04E-15	1.42E-15	4.82E-10	7.08E-12	1.70E-11
Recursos [USD2013]	3.17E-01	1.62E-01	1.83E-03	1.31E-07	1.40E-07	1.47E-01	7.18E-05	3.47E-04

Endulzante, gas natural	Diesel, quemado en grupo electrógeno diesel-eléctrico	Gas amargo, quemado en turbina de gas	Gas dulce, quemado en turbina de gas	Electricidad, alta tensión, mix Magallanes	Residuo medio de incineración	residuos peligrosos, para depósito subterráneo	Residuos sólidos municipales	Líquido anticongelante gastado
1.37E-07	6.72E-09	3.24E-08	1.21E-08	6.29E-09	3.57E-14	3.72E-11	8.58E-10	6.04E-14
2.22E-10	1.20E-11	4.25E-11	3.61E-11	1.52E-11	5.98E-18	6.74E-14	8.54E-13	1.52E-16
2.13E-03	2.58E-04	2.82E-04	1.31E-03	5.55E-04	2.14E-11	7.29E-07	1.22E-06	4.76E-09

Mezcla de disolventes usados	Residuos de pintura en emulsión	Aceite mineral usado	Gas natural residual, agro	Gas natural residual, dulce	Residuos textiles, sucios	Residuos de madera sin tratar	Vertido de agua procedente de la extracción de petróleo/gas natural, en tierra
1.26E-13	1.02E-13	1.68E-11	1.38E-08	5.81E-09	1.53E-14	2.55E-13	6.64E-12
3.59E-16	2.79E-16	4.81E-14	1.83E-11	1.67E-11	3.95E-17	5.45E-16	-4.36E-15
1.34E-09	1.12E-09	1.26E-08	1.19E-04	5.37E-04	1.40E-10	2.94E-09	0.00E+00

Tablas para transporte en camión

Tabla A.25. Resultados de impactos intermedios por etapas para 1 tkm por camión.

Categoría de impacto [Unidad]	Total	Transporte, camión >20t, EURO4, 100%LF, retorno vacío	Diésel, mezcla de consumo
Calentamiento global [kg CO2 eq]	8.39E-02	7.41E-02	9.83E-03
Agotamiento del ozono estratosférico [kg CFC11 eq]	1.94E-08	1.75E-08	1.91E-09
Formación de partículas finas [kg PM2.5 eq]	8.68E-05	7.22E-05	1.46E-05
Acidificación terrestre [kg SO2 eq]	2.86E-04	2.37E-04	4.89E-05
Eutrofización de agua dulce [kg P eq]	4.46E-08	0.00E+00	4.46E-08
Eutrofización marina [kg N eq]	1.10E-07	0.00E+00	1.10E-07
Toxicidad cancerígena humana [kg 1,4-DCB]	3.27E-05	2.87E-05	4.08E-06
Toxicidad humana no cancerígena [kg 1,4-DCB]	3.35E-03	2.81E-03	5.44E-04
Escasez de recursos minerales [kg Cu eq]	2.70E-06	0.00E+00	2.70E-06
Escasez de recursos fósiles [kg petróleo eq]	2.57E-02	0.00E+00	2.57E-02
Consumo de agua [m3]	7.51E-06	0.00E+00	7.51E-06

Tabla A.26. Resultados de impactos finales por etapas para 1 tkm por camión.

Daño de categoría [Unidad]	Total	Transporte, camión >20t, EURO4, 100%LF, retorno vacío	Diésel, mezcla de consumo
Salud Humana [DALY]	1.34E-07	1.16E-07	1.84E-08
Ecosistemas [species.yr]	3.85E-10	3.44E-10	4.12E-11
Recursos [USD2013]	1.16E-02	0.00E+00	1.16E-02

Tablas para transporte en tren

Tabla A.27. Resultados de impactos intermedios por etapas para 1 tkm por tren.

Categoría de impacto [Unidad]	Total	Transporte, tren de mercancías, diesel, contenedor, 100%LF, terreno llano	Diésel, mezcla de consumo
Calentamiento global [kg CO2 eq]	8.05E-03	7.12E-03	9.33E-04
Agotamiento del ozono estratosférico [kg CFC11 eq]	9.17E-10	7.36E-10	1.81E-10
Formación de partículas finas [kg PM2.5 eq]	1.82E-05	1.68E-05	1.38E-06
Acidificación terrestre [kg SO2 eq]	5.94E-05	5.48E-05	4.64E-06
Eutrofización de agua dulce [kg P eq]	4.24E-09	0.00E+00	4.24E-09
Eutrofización marina [kg N eq]	1.05E-08	0.00E+00	1.05E-08
Toxicidad cancerígena humana [kg 1,4-DCB]	1.41E-05	1.37E-05	3.87E-07
Toxicidad humana no cancerígena [kg 1,4-DCB]	4.68E-04	4.16E-04	5.16E-05
Escasez de recursos minerales [kg Cu eq]	2.56E-07	0.00E+00	2.56E-07
Escasez de recursos fósiles [kg petróleo eq]	2.44E-03	0.00E+00	2.44E-03
Consumo de agua [m3]	7.13E-07	0.00E+00	7.13E-07

Tabla A.28. Resultados de impactos finales por etapas para 1 tkm por tren.

Daño de categoría [Unidad]	Total	Transporte, tren de mercancías, diesel, contenedor, 100%LF, terreno llano	Diésel, mezcla de consumo
Salud Humana [DALY]	1.92E-08	1.75E-08	1.75E-09
Ecosistemas [species.yr]	5.51E-11	5.12E-11	3.91E-12
Recursos [USD2013]	1.10E-03	0.00E+00	1.10E-03

Tablas para transporte en barco

Tabla A.29. Resultados de impactos intermedios por etapas para 1 tkm por barco.

Categoría de impacto [Unidad]	Total	Transporte, barco marítimo, 10000 DWT, 100% LF, medio, retorno vacío	Fuel oil pesado, mezcla de consumo
Calentamiento global [kg CO2 eq]	2.85E-02	2.55E-02	2.96E-03
Agotamiento del ozono estratosférico [kg CFC11 eq]	7.59E-09	7.02E-09	5.76E-10
Formación de partículas finas [kg PM2.5 eq]	1.33E-04	1.28E-04	4.38E-06
Acidificación terrestre [kg SO2 eq]	4.40E-04	4.26E-04	1.47E-05
Eutrofización de agua dulce [kg P eq]	1.34E-08	0.00E+00	1.34E-08
Eutrofización marina [kg N eq]	3.43E-08	0.00E+00	3.43E-08
Toxicidad cancerígena humana [kg 1,4-DCB]	7.29E-05	7.17E-05	1.24E-06
Toxicidad humana no cancerígena [kg 1,4-DCB]	2.34E-03	2.17E-03	1.63E-04
Escasez de recursos minerales [kg Cu eq]	8.03E-07	0.00E+00	8.03E-07
Escasez de recursos fósiles [kg petróleo eq]	7.64E-03	0.00E+00	7.64E-03
Consumo de agua [m3]	2.11E-06	0.00E+00	2.11E-06

Tabla A.30. Resultados de impactos finales por etapas para 1 tkm por barco.

Daño de categoría [Unidad]	Total	Transporte, barco marítimo, 10000 DWT, 100% LF, medio, retorno vacío	Fuel oil pesado, mezcla de consumo
Salud Humana [DALY]	1.11E-07	1.05E-07	5.56E-09
Ecosistemas [species.yr]	2.44E-10	2.31E-10	1.24E-11
Recursos [USD2013]	3.45E-03	0.00E+00	3.45E-03

Tablas para electricidad SEN

Tabla A.31. Resultados de impactos intermedios por etapas para la producción de electricidad SEN.

Categoría de impacto [Unidad]	Total	Producción de electricidad geotérmica	Producción de electricidad con carbón	Producción de energía hidroeléctrica de pasada	Producción de electricidad, gas natural, central de ciclo combinado
Calentamiento global [kg CO2 eq]	4.98E-01	2.05E-04	4.08E-01	6.72E-04	6.32E-02
Agotamiento del ozono estratosférico [kg CFC11 eq]	1.41E-07	6.92E-11	8.78E-08	1.95E-10	1.66E-08
Formación de partículas finas [kg PM2.5 eq]	6.99E-03	3.96E-07	6.90E-03	1.41E-06	1.34E-05
Acidificación terrestre [kg SO2 eq]	2.79E-03	6.96E-07	2.57E-03	2.00E-06	3.94E-05
Eutrofización de agua dulce [kg P eq]	3.81E-04	9.13E-08	3.76E-04	1.54E-07	4.79E-07
Eutrofización marina [kg N eq]	2.39E-05	7.40E-09	2.30E-05	1.82E-08	1.51E-07
Toxicidad cancerígena humana [kg 1,4-DCB]	3.31E-02	6.86E-05	2.91E-02	5.94E-04	4.36E-04
Toxicidad humana no cancerígena [kg 1,4-DCB]	5.41E-01	2.13E-04	5.11E-01	4.95E-04	3.25E-03
Escasez de recursos minerales [kg Cu eq]	1.54E-04	1.29E-06	6.06E-05	8.33E-06	1.10E-05
Escasez de recursos fósiles [kg petróleo eq]	1.33E-01	4.91E-05	1.02E-01	1.35E-04	2.37E-02
Consumo de agua [m3]	5.26E-03	1.70E-06	6.99E-04	7.36E-06	1.09E-04

Producción de electricidad con petróleo	Producción de electricidad, eólica, turbina de 1-3MW, en tierra	Cogeneración de calor y electricidad, biogás, motor de gas	Cogeneración de calor y electricidad, Biomasa	Producción de electricidad, fotovoltaica, 570kWp	Producción de electricidad, hidroeléctrica, embalse, región alpina
1.97E-02	6.71E-04	8.98E-04	1.60E-03	2.76E-03	9.17E-04
1.40E-08	2.92E-10	8.52E-09	1.22E-08	1.16E-09	4.46E-10
4.19E-05	1.26E-06	1.65E-06	2.09E-05	5.50E-06	1.38E-06
1.33E-04	2.30E-06	5.56E-06	3.11E-05	1.07E-05	2.27E-06
2.12E-07	3.11E-07	2.40E-06	3.79E-07	1.42E-06	1.87E-07
2.32E-08	5.33E-08	3.99E-07	4.40E-08	1.88E-07	1.95E-08
2.18E-04	1.01E-03	1.99E-04	3.60E-04	6.73E-04	4.46E-04
1.53E-03	1.65E-03	5.67E-03	9.87E-03	6.71E-03	6.66E-04
4.18E-06	1.58E-05	3.31E-06	5.32E-06	3.42E-05	1.01E-05
5.69E-03	1.82E-04	1.33E-04	4.01E-04	7.05E-04	1.53E-04
2.42E-05	8.30E-06	2.22E-04	4.89E-06	8.68E-05	4.10E-03

Tabla A.32. Resultados de impactos finales por etapas para la producción de electricidad SEN.

Daño de categoría [Unidad]	Total	Producción de electricidad geotérmica	Producción de electricidad con carbón	Producción de energía hidroeléctrica de pasada	Producción de electricidad, gas natural, central de ciclo combinado
Salud Humana [DALY]	5.10E-06	7.18E-10	4.94E-06	3.61E-09	6.97E-08
Ecosistemas [species.yr]	2.88E-09	9.75E-13	2.30E-09	3.34E-12	1.95E-10
Recursos [USD2013]	2.14E-02	9.81E-06	9.82E-03	4.23E-05	8.47E-03

Producción de electricidad con petróleo	Producción de electricidad, eólica, turbina de 1-3MW, en tierra	Cogeneración de calor y electricidad, biogás, motor de gas	Cogeneración de calor y electricidad, Biomasa	Producción de electricidad, fotovoltaica, 570KWp	Producción de electricidad, hidroeléctrica, embalse, región alpina
4.57E-08	5.16E-09	4.29E-09	1.82E-08	9.91E-09	4.57E-09
9.39E-11	4.03E-12	4.46E-11	1.92E-10	2.28E-11	2.15E-11
2.55E-03	5.61E-05	3.95E-05	1.58E-04	1.73E-04	4.74E-05

Tablas para celulosa ECF

Tabla A.33. Resultados de impactos intermedios por etapas para la producción de celulosa ECF.

Categoría de impacto [Unidad]	Total	Madera para pulpa, madera pino	Diésel	Fuel oil pesado	Gas Natural Licuado	Gas Licuado de Petróleo	Peróxido de hidrógeno	Metanol
Calentamiento global [kg CO2 eq]	3.82E+02	1.14E+02	3.08E-01	2.57E+01	1.54E+00	2.03E+00	1.74E+00	1.99E+00
Agotamiento del ozono estratosférico [kg CFC11 eq]	2.88E-04	7.65E-05	6.24E-07	6.47E-05	9.04E-08	3.44E-06	4.61E-07	1.04E-06
Formación de partículas finas [kg PM2.5 eq]	8.01E-01	1.85E-01	8.34E-04	7.96E-02	2.13E-03	4.83E-03	6.68E-03	2.99E-03
Acidificación terrestre [kg SO2 eq]	1.48E+00	4.19E-01	2.47E-03	2.35E-01	6.76E-03	1.42E-02	5.54E-03	4.87E-03
Eutrofización de agua dulce [kg P eq]	9.97E-02	3.14E-02	2.06E-05	2.08E-03	5.45E-05	1.06E-04	5.40E-04	1.86E-04
Eutrofización marina [kg N eq]	1.45E-02	6.15E-03	2.43E-06	1.99E-04	2.63E-05	1.20E-05	1.30E-04	1.71E-05
Toxicidad cancerígena humana [kg 1,4-DCB]	3.72E+01	1.43E+01	1.62E-02	1.72E+00	3.96E-02	8.55E-02	2.68E-01	6.77E-02
Toxicidad humana no cancerígena [kg 1,4-DCB]	5.78E+02	3.84E+01	1.09E-01	8.72E+00	6.92E-01	5.53E-01	2.44E+00	5.42E-01
Escasez de recursos minerales [kg Cu eq]	2.47E+00	2.55E-01	5.45E-04	3.84E-02	7.71E-04	2.61E-03	4.97E-03	2.49E-03
Escasez de recursos fósiles [kg petróleo eq]	1.92E+02	3.50E+01	8.03E-01	8.79E+01	4.27E+00	4.20E+00	5.37E-01	2.30E+00
Consumo de agua [m3]	7.09E+00	4.74E-01	4.79E-03	3.07E-01	1.03E-03	3.63E-02	9.82E-02	1.27E-02

Oxígeno, líquido	Cal viva	Clorato de sodio	Hidróxido de sodio	ácido sulfúrico	Transporte tren	Transporte barco	Transporte camión	Electricidad, alta tensión, mix 2018
2.17E+01	5.09E+01	1.03E+02	8.17E+01	4.36E+00	3.41E-01	8.36E-01	1.22E+02	-1.51E+02
6.16E-06	5.86E-06	3.12E-05	1.05E-04	6.80E-06	3.89E-08	2.23E-07	2.81E-05	-4.28E-05
3.04E-01	2.48E-02	1.29E+00	8.47E-01	3.69E-02	7.72E-04	3.89E-03	1.26E-01	-2.12E+00
1.22E-01	4.47E-02	5.47E-01	4.25E-01	6.71E-02	2.52E-03	1.29E-02	4.14E-01	-8.48E-01
1.66E-02	1.47E-03	7.51E-02	5.72E-02	3.04E-02	1.79E-07	3.93E-07	6.47E-05	-1.16E-01
1.04E-03	1.06E-04	7.64E-03	5.63E-03	5.93E-04	4.44E-07	1.01E-06	1.60E-04	-7.24E-03
1.46E+00	3.64E-01	1.66E+01	8.83E+00	3.46E+00	5.98E-04	2.14E-03	4.75E-02	-1.00E+01
2.37E+01	3.98E+00	1.58E+02	1.27E+02	3.73E+02	1.98E-02	6.85E-02	4.86E+00	-1.64E+02
7.56E-03	5.21E-03	1.70E-01	3.19E-01	1.70E+00	1.08E-05	2.35E-05	3.91E-03	-4.68E-02
5.78E+00	4.90E+00	2.63E+01	2.11E+01	1.08E+00	1.03E-01	2.24E-01	3.73E+01	-4.02E+01
8.71E-01	3.20E-02	4.13E+00	2.52E+00	1.87E-01	3.02E-05	6.19E-05	1.09E-02	-1.60E+00

Tabla A.34. Resultados de impactos finales por etapas para la producción de celulosa ECF.

Daño de categoría [Unidad]	Total	Madera para pulpa, madera pino	Diésel	Fuel oil pesado	Gas Natural Licuado	Gas Licuado de Petróleo	Peróxido de hidrógeno	Metanol
Salud Humana [DALY]	1.13E-03	2.80E-04	8.89E-07	8.17E-05	3.05E-06	5.33E-06	7.47E-06	4.10E-06
Ecosistemas [species.yr]	5.13E-05	4.99E-05	1.64E-09	1.47E-07	6.16E-09	1.02E-08	9.05E-09	7.57E-09
Recursos [USD2013]	8.12E+01	1.43E+01	3.62E-01	3.96E+01	1.53E+00	1.89E+00	1.64E-01	8.15E-01

Oxígeno, líquido	Cal viva	Clorato de sodio	Hidróxido de sodio	ácido sulfúrico	Transporte tren	Transporte barco	Transporte camión	Electricidad, alta tensión, mix 2018
2.24E-04	6.50E-05	1.01E-03	6.72E-04	1.24E-04	8.15E-07	3.26E-06	1.94E-04	-1.55E-03
1.34E-07	1.61E-07	6.37E-07	5.04E-07	9.24E-08	2.34E-09	7.15E-09	5.58E-07	-8.74E-07
9.32E-01	2.04E+00	4.44E+00	3.96E+00	6.40E-01	4.66E-02	1.01E-01	1.68E+01	-6.48E+00

Tablas para celulosa con factor de planta

Tabla A.35. Resultados de impactos intermedios por etapas para la producción de celulosa ECF con factor de planta.

Categoría de impacto [Unidad]	Total	Madera para pulpa, madera pino	Diésel	Fuel oil pesado	Gas Natural Licuado	Gas Licuado de Petróleo	Peróxido de hidrógeno	Metanol	Oxígeno, líquido
Calentamiento global [kg CO2 eq]	3.96E+02	1.14E+02	3.08E-01	2.57E+01	1.54E+00	2.03E+00	1.74E+00	1.99E+00	2.17E+01
Agotamiento del ozono estratosférico [kg CFC11 eq]	2.93E-04	7.65E-05	6.24E-07	6.47E-05	9.04E-08	3.44E-06	4.61E-07	1.04E-06	6.16E-06
Formación de partículas finas [kg PM2.5 eq]	8.32E-01	1.85E-01	8.34E-04	7.96E-02	2.13E-03	4.83E-03	6.68E-03	2.99E-03	3.04E-01
Acidificación terrestre [kg SO2 eq]	1.55E+00	4.19E-01	2.47E-03	2.35E-01	6.76E-03	1.42E-02	5.54E-03	4.87E-03	1.22E-01
Eutrofización de agua dulce [kg P eq]	1.09E-01	3.14E-02	2.06E-05	2.08E-03	5.45E-05	1.06E-04	5.40E-04	1.86E-04	1.66E-02
Eutrofización marina [kg N eq]	1.51E-02	6.15E-03	2.43E-06	1.99E-04	2.63E-05	1.20E-05	1.30E-04	1.71E-05	1.04E-03
Toxicidad cancerígena humana [kg 1,4-DCB]	4.35E+01	1.43E+01	1.62E-02	1.72E+00	3.96E-02	8.55E-02	2.68E-01	6.77E-02	1.46E+00
Toxicidad humana no cancerígena [kg 1,4-DCB]	6.47E+02	3.84E+01	1.09E-01	8.72E+00	6.92E-01	5.53E-01	2.44E+00	5.42E-01	2.37E+01
Escasez de recursos minerales [kg Cu eq]	2.89E+00	2.55E-01	5.45E-04	3.84E-02	7.71E-04	2.61E-03	4.97E-03	2.49E-03	7.56E-03
Escasez de recursos fósiles [kg petróleo eq]	1.95E+02	3.50E+01	8.03E-01	8.79E+01	4.27E+00	4.20E+00	5.37E-01	2.30E+00	5.78E+00
Consumo de agua [m3]	7.23E+00	4.74E-01	4.79E-03	3.07E-01	1.03E-03	3.63E-02	9.82E-02	1.27E-02	8.71E-01

Oxígeno, líquido	Cal viva	Clorato de sodio	Hidróxido de sodio	ácido sulfúrico	Transporte tren	Transporte barco	Transporte camión	Fábrica de celulosa	Electricidad, alta tensión, mix 2018
2.17E+01	5.09E+01	1.03E+02	8.17E+01	4.36E+00	3.41E-01	8.36E-01	1.22E+02	1.42E+01	-1.51E+02
6.16E-06	5.86E-06	3.12E-05	1.05E-04	6.80E-06	3.89E-08	2.23E-07	2.81E-05	5.71E-06	-4.28E-05
3.04E-01	2.48E-02	1.29E+00	8.47E-01	3.69E-02	7.72E-04	3.89E-03	1.26E-01	3.13E-02	-2.12E+00
1.22E-01	4.47E-02	5.47E-01	4.25E-01	6.71E-02	2.52E-03	1.29E-02	4.14E-01	7.63E-02	-8.48E-01
1.66E-02	1.47E-03	7.51E-02	5.72E-02	3.04E-02	1.79E-07	3.93E-07	6.47E-05	9.34E-03	-1.16E-01
1.04E-03	1.06E-04	7.64E-03	5.63E-03	5.93E-04	4.44E-07	1.01E-06	1.60E-04	6.04E-04	-7.24E-03
1.46E+00	3.64E-01	1.66E+01	8.83E+00	3.46E+00	5.98E-04	2.14E-03	4.75E-02	6.32E+00	-1.00E+01
2.37E+01	3.98E+00	1.58E+02	1.27E+02	3.73E+02	1.98E-02	6.85E-02	4.86E+00	6.92E+01	-1.64E+02
7.56E-03	5.21E-03	1.70E-01	3.19E-01	1.70E+00	1.08E-05	2.35E-05	3.91E-03	4.21E-01	-4.68E-02
5.78E+00	4.90E+00	2.63E+01	2.11E+01	1.08E+00	1.03E-01	2.24E-01	3.73E+01	3.33E+00	-4.02E+01
8.71E-01	3.20E-02	4.13E+00	2.52E+00	1.87E-01	3.02E-05	6.19E-05	1.09E-02	1.44E-01	-1.60E+00

Tabla A.36. Resultados de impactos finales por etapas para la producción de celulosa ECF con factor de planta.

Daño de categoría [Unidad]	Total	Madera para pulpa, madera pino	Diésel	Fuel oil pesado	Gas Natural Licuado	Gas Licuado de Petróleo	Peróxido de hidrógeno	Metanol	Oxígeno, líquido
Salud Humana [DALY]	1.20E-03	2.80E-04	8.89E-07	8.17E-05	3.05E-06	5.33E-06	7.47E-06	4.10E-06	2.24E-04
Ecosistemas [species.yr]	5.14E-05	4.99E-05	1.64E-09	1.47E-07	6.16E-09	1.02E-08	9.05E-09	7.57E-09	1.34E-07
Recursos [USD2013]	8.22E+01	1.43E+01	3.62E-01	3.96E+01	1.53E+00	1.89E+00	1.64E-01	8.15E-01	9.32E-01

Cal viva	Clorato de sodio	Hidróxido de sodio	ácido sulfúrico	Transporte tren	Transporte barco	Transporte camión	Fábrica de celulosa	Electricidad, alta tensión, mix 2018
6.50E-05	1.01E-03	6.72E-04	1.24E-04	8.15E-07	3.26E-06	1.94E-04	6.98E-05	-1.55E-03
1.61E-07	6.37E-07	5.04E-07	9.24E-08	2.34E-09	7.15E-09	5.58E-07	1.12E-07	-8.74E-07
2.04E+00	4.44E+00	3.96E+00	6.40E-01	4.66E-02	1.01E-01	1.68E+01	9.89E-01	-6.48E+00

Tablas para celulosa sin fuel oil

Tabla A.37. Resultados de impactos intermedios por etapas para la producción de celulosa ECF sin fuel oil.

Categoría de impacto [Unidad]	Total	Madera para pulpa, madera pino	Diésel	Gas Natural Licuado	Gas Licuado de Petróleo	Peróxido de hidrógeno	Metanol	Oxígeno, líquido
Calentamiento global [kg CO2 eq]	3.87E+02	1.14E+02	3.08E-01	3.27E+01	2.03E+00	1.74E+00	1.99E+00	2.17E+01
Agotamiento del ozono estratosférico [kg CFC11 eq]	2.25E-04	7.65E-05	6.24E-07	1.92E-06	3.44E-06	4.61E-07	1.04E-06	6.16E-06
Formación de partículas finas [kg PM2.5 eq]	7.64E-01	1.85E-01	8.34E-04	4.53E-02	4.83E-03	6.68E-03	2.99E-03	3.04E-01
Acidificación terrestre [kg SO2 eq]	1.38E+00	4.19E-01	2.47E-03	1.44E-01	1.42E-02	5.54E-03	4.87E-03	1.22E-01
Eutrofización de agua dulce [kg P eq]	9.87E-02	3.14E-02	2.06E-05	1.16E-03	1.06E-04	5.40E-04	1.86E-04	1.66E-02
Eutrofización marina [kg N eq]	1.48E-02	6.15E-03	2.43E-06	5.60E-04	1.20E-05	1.30E-04	1.71E-05	1.04E-03
Toxicidad cancerígena humana [kg 1,4-DCB]	3.63E+01	1.43E+01	1.62E-02	8.44E-01	8.55E-02	2.68E-01	6.77E-02	1.46E+00
Toxicidad humana no cancerígena [kg 1,4-DCB]	5.83E+02	3.84E+01	1.09E-01	1.47E+01	5.53E-01	2.44E+00	5.42E-01	2.37E+01
Escasez de recursos minerales [kg Cu eq]	2.45E+00	2.55E-01	5.45E-04	1.64E-02	2.61E-03	4.97E-03	2.49E-03	7.56E-03
Escasez de recursos fósiles [kg petróleo eq]	1.90E+02	3.50E+01	8.03E-01	9.10E+01	4.20E+00	5.37E-01	2.30E+00	5.78E+00
Consumo de agua [m3]	6.80E+00	4.74E-01	4.79E-03	2.20E-02	3.63E-02	9.82E-02	1.27E-02	8.71E-01

Oxígeno, líquido	Cal viva	Clorato de sodio	Hidróxido de sodio	ácido sulfúrico	Transporte tren	Transporte barco	Transporte camión	Electricidad, alta tensión, mix 2018
2.17E+01	5.09E+01	1.03E+02	8.17E+01	4.36E+00	3.41E-01	8.36E-01	1.22E+02	-1.51E+02
6.16E-06	5.86E-06	3.12E-05	1.05E-04	6.80E-06	3.89E-08	2.23E-07	2.81E-05	-4.28E-05
3.04E-01	2.48E-02	1.29E+00	8.47E-01	3.69E-02	7.72E-04	3.89E-03	1.26E-01	-2.12E+00
1.22E-01	4.47E-02	5.47E-01	4.25E-01	6.71E-02	2.52E-03	1.29E-02	4.14E-01	-8.48E-01
1.66E-02	1.47E-03	7.51E-02	5.72E-02	3.04E-02	1.79E-07	3.93E-07	6.47E-05	-1.16E-01
1.04E-03	1.06E-04	7.64E-03	5.63E-03	5.93E-04	4.44E-07	1.01E-06	1.60E-04	-7.24E-03
1.46E+00	3.64E-01	1.66E+01	8.83E+00	3.46E+00	5.98E-04	2.14E-03	4.75E-02	-1.00E+01
2.37E+01	3.98E+00	1.58E+02	1.27E+02	3.73E+02	1.98E-02	6.85E-02	4.86E+00	-1.64E+02
7.56E-03	5.21E-03	1.70E-01	3.19E-01	1.70E+00	1.08E-05	2.35E-05	3.91E-03	-4.68E-02
5.78E+00	4.90E+00	2.63E+01	2.11E+01	1.08E+00	1.03E-01	2.24E-01	3.73E+01	-4.02E+01
8.71E-01	3.20E-02	4.13E+00	2.52E+00	1.87E-01	3.02E-05	6.19E-05	1.09E-02	-1.60E+00

Tabla A.38. Resultados de impactos finales por etapas para la producción de celulosa ECF sin fuel oil.

Categoría de impacto [Unidad]	Total	Madera para pulpa, madera pino	Diésel	Gas Natural Licuado	Gas Licuado de Petróleo	Peróxido de hidrógeno	Metanol	Oxígeno, líquido
Salud Humana [DALY]	1.11E-03	2.80E-04	8.89E-07	6.50E-05	5.33E-06	7.47E-06	4.10E-06	2.24E-04
Ecosistemas [species.yr]	5.13E-05	4.99E-05	1.64E-09	1.31E-07	1.02E-08	9.05E-09	7.57E-09	1.34E-07
Recursos [USD2013]	7.26E+01	1.43E+01	3.62E-01	3.25E+01	1.89E+00	1.64E-01	8.15E-01	9.32E-01

Cal viva	Clorato de sodio	Hidróxido de sodio	ácido sulfúrico	Transporte tren	Transporte barco	Transporte camión	Electricidad, alta tensión, mix 2018
6.50E-05	1.01E-03	6.72E-04	1.24E-04	8.15E-07	3.26E-06	1.94E-04	-1.55E-03
1.61E-07	6.37E-07	5.04E-07	9.24E-08	2.34E-09	7.15E-09	5.58E-07	-8.74E-07
2.04E+00	4.44E+00	3.96E+00	6.40E-01	4.66E-02	1.01E-01	1.68E+01	-6.48E+00

Tablas para celulosa con electricidad 2030

Tabla A.39. Resultados de impactos intermedios por etapas para la producción de celulosa ECF con electricidad 2030.

Categoría de impacto [Unidad]	Total	Madera para pulpa, madera pino	Diésel	Fuel oil pesado	Gas Natural Licuado	Gas Licuado de Petróleo	Peróxido de hidrógeno	Metanol
Calentamiento global [kg CO2 eq]	3.63E+02	1.14E+02	3.08E-01	2.57E+01	1.54E+00	2.03E+00	1.40E+00	1.88E+00
Agotamiento del ozono estratosférico [kg CFC11 eq]	2.83E-04	7.65E-05	6.24E-07	6.47E-05	9.04E-08	3.44E-06	3.71E-07	1.02E-06
Formación de partículas finas [kg PM2.5 eq]	5.33E-01	1.85E-01	8.34E-04	7.96E-02	2.13E-03	4.83E-03	1.64E-03	1.40E-03
Acidificación terrestre [kg SO2 eq]	1.37E+00	4.19E-01	2.47E-03	2.35E-01	6.76E-03	1.42E-02	3.59E-03	4.25E-03
Eutrofización de agua dulce [kg P eq]	8.53E-02	3.14E-02	2.06E-05	2.08E-03	5.45E-05	1.06E-04	2.70E-04	1.01E-04
Eutrofización marina [kg N eq]	1.36E-02	6.15E-03	2.43E-06	1.99E-04	2.63E-05	1.20E-05	1.14E-04	1.20E-05
Toxicidad cancerígena humana [kg 1,4-DCB]	3.64E+01	1.43E+01	1.62E-02	1.72E+00	3.96E-02	8.55E-02	2.52E-01	6.29E-02
Toxicidad humana no cancerígena [kg 1,4-DCB]	5.59E+02	3.84E+01	1.09E-01	8.72E+00	6.92E-01	5.53E-01	2.09E+00	4.31E-01
Escasez de recursos minerales [kg Cu eq]	2.48E+00	2.55E-01	5.45E-04	3.84E-02	7.71E-04	2.61E-03	5.14E-03	2.54E-03
Escasez de recursos fósiles [kg petróleo eq]	1.87E+02	3.50E+01	8.03E-01	8.79E+01	4.27E+00	4.20E+00	4.45E-01	2.27E+00
Consumo de agua [m3]	6.99E+00	4.74E-01	4.79E-03	3.07E-01	1.03E-03	3.63E-02	9.63E-02	1.22E-02

Oxígeno, líquido	Cal viva	Clorato de sodio	Hidróxido de sodio	ácido sulfúrico	Transporte tren	Transporte barco	Transporte camión	Electricidad, alta tensión, mix 2030
1.18E+00	5.03E+01	1.76E+01	2.80E+01	4.00E+00	3.41E-01	8.36E-01	1.22E+02	-8.04E+00
8.11E-07	5.70E-06	8.89E-06	9.12E-05	6.71E-06	3.89E-08	2.23E-07	2.81E-05	-5.56E-06
2.62E-03	1.61E-02	3.44E-02	6.02E-02	3.17E-02	7.72E-04	3.89E-03	1.26E-01	-1.78E-02
4.88E-03	4.13E-02	5.91E-02	1.20E-01	6.51E-02	2.52E-03	1.29E-02	4.14E-01	-3.31E-02
4.74E-04	1.00E-03	7.68E-03	1.51E-02	3.01E-02	1.79E-07	3.93E-07	6.47E-05	-3.15E-03
6.44E-05	7.82E-05	3.56E-03	3.08E-03	5.76E-04	4.44E-07	1.01E-06	1.60E-04	-4.39E-04
5.54E-01	3.38E-01	1.28E+01	6.46E+00	3.45E+00	5.98E-04	2.14E-03	4.75E-02	-3.73E+00
2.51E+00	3.37E+00	7.00E+01	7.18E+01	3.72E+02	1.98E-02	6.85E-02	4.86E+00	-1.67E+01
1.75E-02	5.49E-03	2.12E-01	3.45E-01	1.70E+00	1.08E-05	2.35E-05	3.91E-03	-1.16E-01
3.23E-01	4.74E+00	3.53E+00	6.88E+00	9.89E-01	1.03E-01	2.24E-01	3.73E+01	-2.20E+00
7.60E-01	2.88E-02	3.67E+00	2.23E+00	1.85E-01	3.02E-05	6.19E-05	1.09E-02	-8.28E-01

Tabla A.40. Resultados de impactos finales por etapas para la producción de celulosa ECF con electricidad 2030.

Categoría de impacto [Unidad]	Total	Madera para pulpa, madera pino	Diésel	Fuel oil pesado	Gas Natural Licuado	Gas Licuado de Petróleo	Peróxido de hidrógeno	Metanol
Salud Humana [DALY]	9.36E-04	2.80E-04	8.89E-07	8.17E-05	3.05E-06	5.33E-06	3.85E-06	2.95E-06
Ecosistemas [species.yr]	5.12E-05	4.99E-05	1.64E-09	1.47E-07	6.16E-09	1.02E-08	7.19E-09	6.99E-09
Recursos [USD2013]	8.04E+01	1.43E+01	3.62E-01	3.96E+01	1.53E+00	1.89E+00	1.50E-01	8.11E-01

Oxígeno, líquido	Cal viva	Clorato de sodio	Hidróxido de sodio	ácido sulfúrico	Transporte tren	Transporte barco	Transporte camión	Electricidad, alta tensión, mix 2030
6.65E-06	5.88E-05	1.04E-04	1.06E-04	1.20E-04	8.15E-07	3.26E-06	1.94E-04	-3.53E-05
2.29E-08	1.57E-07	1.72E-07	2.13E-07	9.05E-08	2.34E-09	7.15E-09	5.58E-07	-9.82E-08
9.37E-02	2.02E+00	9.45E-01	1.77E+00	6.25E-01	4.66E-02	1.01E-01	1.68E+01	-6.42E-01

Anexo B: literatura

Tipos de proceso productivo para celulosa

Existen diferentes tipos de procesos de producción de celulosa, estos se clasifican en químicos, semiquímicos y no químicos. (Boeykens, 2006)

Uno de los procesos no químicos es el TMP, es un proceso termo mecánico, que utiliza vapor para la separación de los componentes en la madera. Es empleado para la producción de papel de periódico. Otro proceso no químico es el Masonite, utiliza calor y presión, el producto es para aplicaciones específicas. Además, se producen ácidos orgánicos y azúcares, los cuales pueden ser utilizados como valiosos subproductos.

Algunos ejemplos de procesos semiquímicos son: el NSSC (Neutro Semiquímico Sulfito), utiliza Na_2SO_3 y NaHCO_3 y tiene una eficiencia del 75% aproximadamente; el CTMP (proceso químico-térmico-mecánico) utiliza sulfito sódico (Na_2SO_3), carbonato de sodio (Na_2CO_3), hidróxido de sodio (NaOH) y sulfuro de sodio (Na_2S), tiene una eficiencia aproximada del 95% y un consumo de agua reducido en comparación a los otros procesos descritos, pero requiere de mayor energía para la producción de pulpa.

En los procesos químicos se utilizan sulfuros y sulfitos. El proceso más utilizado por la industria de la celulosa es el proceso Kraft. Sus principales ventajas en comparación con otros procesos son la generación de energía y una regeneración de químicos utilizados eficiente, logrando una mayor eficiencia en la globalidad del proceso, justificando su selección habitual.

Resultados cuantitativos reportados en la literatura

- (Echeverría et al., 2021)

Tabla B.1. Resultados del estudio de D. Echeverría.

Categoría de impacto	Unidad	TCF (ePAA)	TCF (tPAA - 100% exceso)	TCF (tPAA - 50% exceso)	ECF (ClO2)
Potencial Calentamiento Global (PCG)	kg CO2 eq.	-1.795	-1.791	-1.820	-1.750
Formación de Ozono Fotoquímico (FOF)	kg C2H4 eq.	1,46	1,53	1,47	1,17
Acidificación del Aire (AA)	mole H+ eq.	1,22	1,44	1,3	0,87
Agotamiento de Recursos Fósiles (ARF)	kg Sb eq.	0,02	0,021	0,02	0,027
Agotamiento de Elementos Abióticos (AEA)	kg Sb eq.	0,0023	0,0023	0,0022	0,0018
Eutroficación de Agua dulce (EA)	kg P eq.	-0,096	-0,087	-0,094	-0,073
Eutroficación Marina (EM)	kg N eq.	0,22	0,38	0,34	0,022
Salud Humana (SH)	CTUh	0,00015	0,00015	0,00015	0,00011
Ecotoxicidad de Agua dulce (ETA)	CTUe	2.219	2.274	2.206	1.648

- (González-García et al., 2009)

Figura B.1. Datos de inventario del estudio de S. González-García.

INPUTS from TECHNOSPHERE				INPUTS from ENVIRONMENT			
Materials	Value	Materials	Value	Water	32.70 m ³		
Biomass		Wire ^a	2.60 kg	OUTPUTS			
Green Eucalyptus logs	2.70 m ³	Fossil fuels	53.00 kg	To TECHNOSPHERE		To ENVIRONMENT	
Wood waste	0.50 kg	Propane	0.40 kg	Materials	Value	Emissions to air^d	Value
Chemicals (100% purity)		Energy	Value	Bleached pulp (10% moisture)	1 ton AD	CO ₂	212.70 kg
O ₂	27.00 kg	Electricity	575 kWh ^b	Energy		NO _x	1.02 kg
H ₂ O ₂	23.00 kg	Steam	5.50 ton ^c	Electricity to grid	32.32 kWh ^f	SO ₂	0.58 kg
NaOH	14.60 kg	Transport		Waste to treatment		Particulates	0.43 kg
H ₂ SO ₄	10.70 kg	20–28 ton trucks	57.44 t km	Ashes (to landfill)	14.68 kg	TRS	0.013 kg
Na ₂ SO ₄	7.30 kg	Trans. freight ship	20.68 t km	Dregs (to landfill)	12.85 kg	Emissions to water^e	
CaO	4.40 kg			Debris (to landfill)	1.18 kg	AOX	0.004 kg
EDTA	3.00 kg			Scrap (to landfill)	1.34 kg	COD	5.84 kg
H ₂	1.90 kg			Municipal solid waste (to landfill)	0.85 kg	BOD ₅	1.44 kg
MgSO ₄	0.30 kg			Paper and cardboard (to recycling)	39.87 g	N	0.28 kg
Anthraquinone	0.22 kg			Glass (to recycling)	3.74 g	P	0.070 kg
						TSS	1.14 kg
						Water effluent	32.70 m ³

Tabla B.2. Resultados etapa de caracterización del estudio de S. González-García.

Categoría de impacto	Unidad	Valor
Agotamiento de Elementos Abióticos (AEA)	kg Sb eq. x 10 ⁶	7,65
Potencial Calentamiento Global (PCG)	kg CO2 eq.	431,3
Agotamiento de la Capa de Ozono (ACO)	kg CFC-11 eq. x 10 ⁵	3,46
Toxicidad Humana (TH)	kg 1,4-DB eq.	39,19
Ecotoxicidad de Agua dulce (ETA)	kg 1,4-DB eq.	32,47
Ecotoxicidad Marina (EM)	kg 1,4-DB eq. x 10 ⁻⁴	7,73
Ecotoxicidad Terrestre (ET)	kg 1,4-DB eq.	0,943
Formación de Ozono Fotoquímico (FOF)	kg C2H2 eq.	0,139
Acidificación (A)	kg SO2 eq.	2,83
Eutroficación (E)	kg PO4-3 eq.	0,698

- (Ma et al., 2018)

Figura B.2. Datos de inventario para el estudio de X. Ma.

Category	Unit	Tissue paper	Light coated paper	Household paper	Specialty paper	Art paper	Pulp via CEH	Pulp via ECF
Output								
Energy	Electricity	t	0.91	1.33	1.23	1.21	1.48	1.00
	Steam	kW h	1454.4	490.0	1489.6	609.7	500.4	378.7
		t	-	2.39	2.55	2.91	2.27	1.65
Raw materials	Freshwater	t	5.64	7.08	7.48	13.40	8.37	36.80
	Soda	kg	0.64	-	-	-	-	-
	Chemicals	t	4.6×10^{-4}	0.03	0.004	0.24	0.17	0.02
	Resin	kg	4.73	-	-	-	-	-
	Liquid CO ₂	kg	2.73	-	-	-	-	-
	Urea	kg	0.09	-	-	-	-	1.30
	O ₂	kg	3.73	-	-	-	10.00	-
	Coating	t	-	0.47	-	-	-	-
	Sizing agent	t	-	-	0.06	-	2.96	-
	Lime	t	-	-	-	-	0.40	0.09
	Karoline	t	-	-	-	-	0.12	-
	Starch	t	-	-	-	-	0.06	-
	NaOH	t	-	-	-	-	0.004	0.54
	Waste paper pulp	t	-	-	-	-	0.11	-
	Wood chip	t	-	-	-	-	-	2.06
	Sodium chlorate	kg	-	-	-	-	-	4.71
Emissions to water	Wastewater	t	3.45	6.91	7.30	13.07	8.16	35.93
	COD	t	3.4×10^{-4}	3.71	0.27	0.04	0.003	0.001
	BOD	t	1.0×10^{-4}	1.47	0.11	0.01	0.001	4.1×10^{-4}
	SS	t	-	5.55	0.41	0.05	0.004	0.002
	TN	kg	18×10^{-4}	214.25	15.64	2.03	0.17	0.06
	TP	g	0.18	-	-	-	-	-
	AOX	g	0.18	-	-	-	-	-
Solid waste	Sludge	t	0.12	-	-	-	-	0.10
	MSW	kg	-	0.28	0.26	0.14	0.32	0.11

- (Jour et al., 2013)

Figura B.3. Cargas de insumos químicos para el estudio de P. Jour.

Chemicals	Chemical charges (kg/t pulp)			
	ECF ozone ⁽¹⁾	ECF average	ECF state of the art	ECF light state of the art
	aZeDP	D _{hot} (EPO)DD	D _{hot} (EPO)DD	D _{hot} (EPO)DP
Chlorine dioxide	8	14.8	9.9	7.6
Chlorine dioxide as aCl	21	39	26	20
Hydrogen peroxide	5	2	2	6
Oxygen	0	3	3	3
Sodium hydroxide	12	12	12	14
Sulphuric acid	18	6	6	6
Ozone	5	0	0	0

Tabla B.3. Resultados de exceso de electricidad y huella de carbono para el estudio de P. Jour.

Escenario	Exceso de electricidad (MJ/ton pulpa)	Huella de carbono (kg CO ₂ eq/ton pulpa)
Sin exportar exceso de electricidad	-	226
100% de electricidad exportada	1.627	181
Isla Química	1.270	191
Blanqueo con Ozono	1.241	192
Blanqueo con Ozono e isla química	884	202

Figura B.4. Resultados para la huella de carbono por etapa para el estudio de P. Jour.

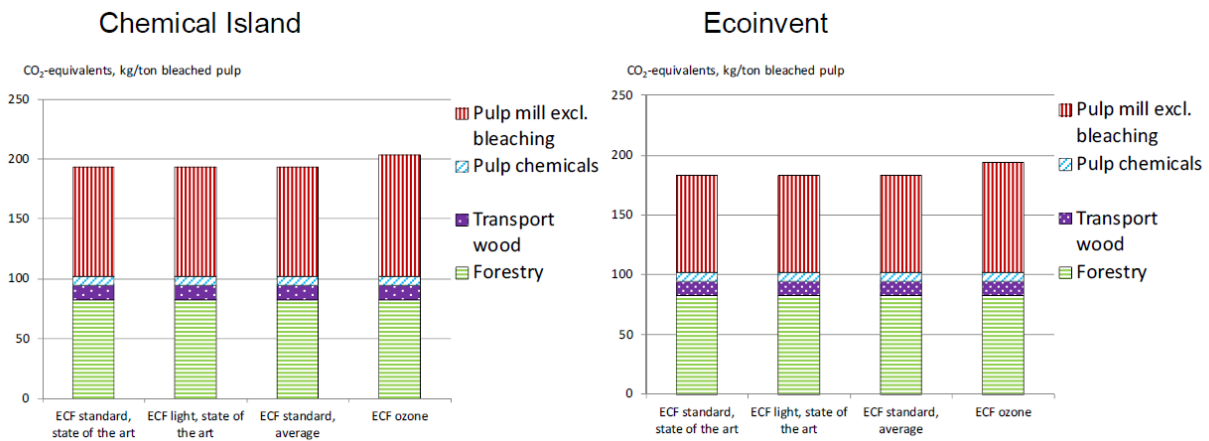


Figura B.5. Resultados huella de carbono para pulpa sin blanquear y blanqueo para el estudio de P. Jour.

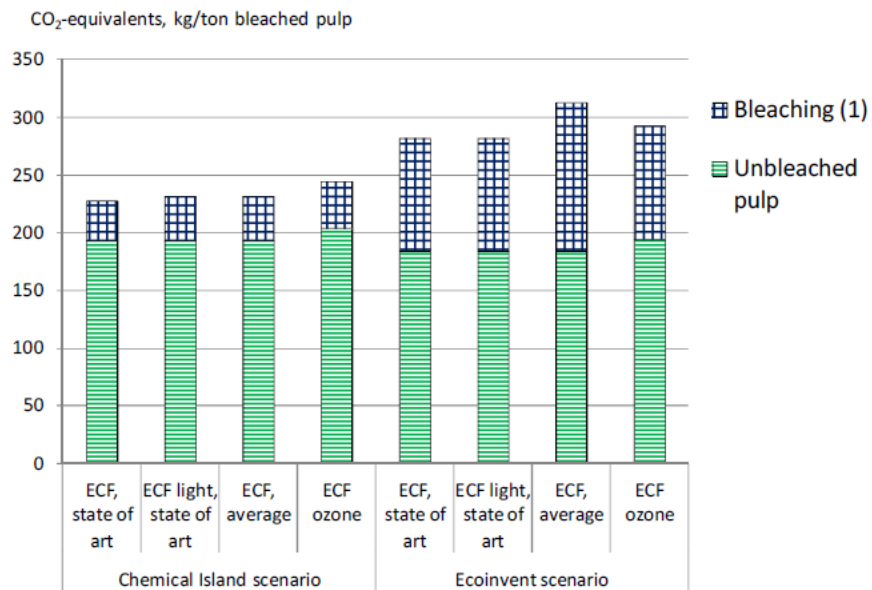
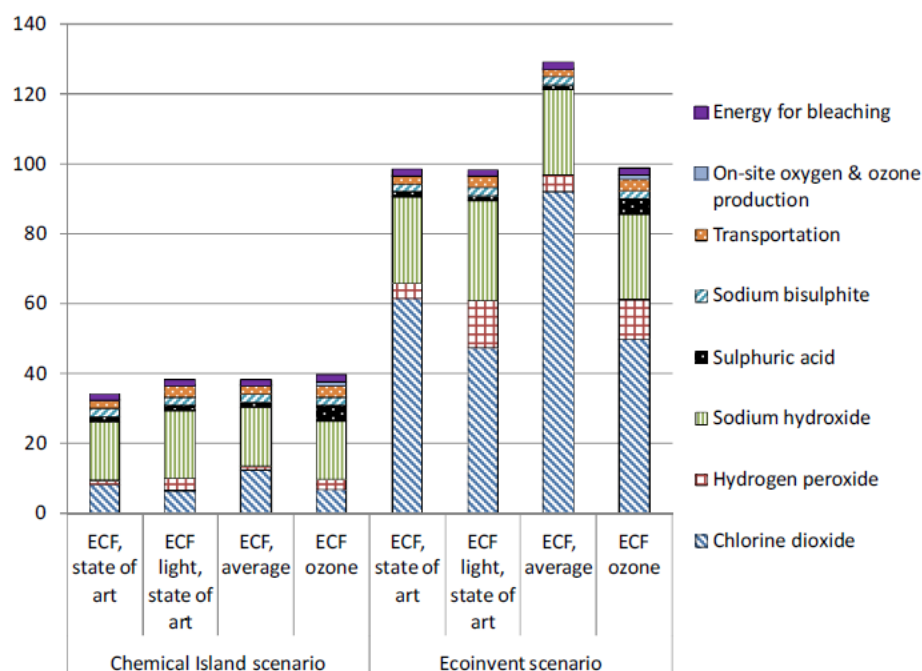


Figura B.6. Contribución a la huella de carbono para etapas de blanqueo para el estudio de P. Jour.



Anexo C: Descripción general de la metodología de Evaluación de Ciclo de Vida, de acuerdo con la norma NCh-ISO 14040.

La Evaluación de Ciclo de Vida considera los aspectos ambientales y los posibles impactos ambientales, por ejemplo, el uso de los recursos naturales y las consecuencias ambientales de las emisiones, a todo lo largo del ciclo de vida del producto, desde la adquisición de la materia prima hasta la producción, uso, tratamiento al final de la vida útil, reciclado y disposición final (desde la cuna a la tumba).

La ECV puede ayudar a identificar oportunidades para mejorar los aspectos ambientales de los productos en las distintas etapas de su ciclo de vida, también puede ayudar a tomar decisiones en organizaciones industriales o no industriales (planificación estratégica, fijar prioridades, cambios en diseños, etc.), además, seleccionar indicadores adecuados de desempeño ambiental e incluso a comercializar, por ejemplo, implementando un sistema de etiquetado ecológico.

La NCh-ISO 14040-44 sobre Evaluación de Ciclo de Vida define la existencia de cuatro etapas:

Etapas de definición del objetivo y alcance

Esta etapa es importante porque determina la razón por la cual una ECV se lleva a cabo, describe el sistema y las categorías de datos a ser estudiados

Objetivo del estudio

Los objetivos de un estudio de ECV deben establecer sin ambigüedad la aplicación prevista, las razones para efectuar el estudio y a quienes serán comunicados los resultados del estudio.

Alcance del estudio

El desarrollo del alcance de un estudio ECV debe asegurar que la amplitud, profundidad y detalle del estudio concuerden con el objetivo del estudio. Se debe considerar y describir lo siguiente:

- **Función del sistema:** se deben describir las funciones del sistema estudiado. Esto es importante en aquellos casos donde el producto puede cumplir varias funciones.
- **Unidad funcional:** define la cuantificación de las funciones identificadas, tiene como propósito principal proveer una referencia para normalizar los datos de entrada y salida. Esta referencia es necesaria para asegurar la comparabilidad de los resultados de la ECV. La unidad funcional puede ser de tipo físico o de tipo funcional. Normalmente cuando se requiere un tipo de comparación, es necesario utilizar el tipo funcional.
- **Flujo de referencia:** se debe definir la cantidad de producto de cada sistema para satisfacer la función prevista. Es utilizado como base de cálculo y así definir las entradas y salidas del sistema.
- **Límites del sistema:** se identifica el conjunto de procesos unitarios o subsistemas que permiten producir el producto en estudio. Se deberían tener en consideración varias etapas del ciclo de vida, procesos unitarios y flujos, esto incluye, la obtención de materias primas, entradas y salidas en la secuencia principal del proceso, distribución y transporte de

suministros, producción y uso de combustibles, electricidad y calor, etc. La definición de los límites dependerá del objetivo y alcance del estudio, de la calidad de los datos encontrados, entre otros factores. También se debe especificar qué procesos y etapas del sistema se van a incluir y los criterios para tal decisión.

- **Criterios de corte:** define los criterios cuantitativos para decidir que entradas o salidas deben ser incluidas. Generalmente, se establece en base a la cantidad de materiales (por ejemplo, todas las entradas/salidas que acumulativamente contribuyen a más de un % de la masa de entrada al sistema), o significancia ambiental (por ejemplo, todas las entradas/salidas que contribuyan a más de un % en la carga ambiental)
- **Reglas de asignación de carga:** cuando los sistemas desarrollan más de una función o fabrican más de un producto, se deben distribuir cuantitativamente los aspectos ambientales y/o sociales entre los productos y coproductos. Esta distribución de carga puede ser mediante un criterio físico o económico. Esta asignación es necesaria cuando no es posible establecer una relación directa entre el producto y las cargas, en situaciones como procesos con salidas múltiples, procesos con entradas múltiples o procesos con reciclaje de lazo abierto.
- **Categorías de impacto seleccionadas y metodología de evaluación asociada:** se deben establecer las categorías de impacto ambientales y/o sociales específicos e indicadores que serán utilizados en la evaluación de impacto del ciclo de vida.

Etapas de análisis de inventario del ciclo de vida

El análisis de inventario consiste en recopilar y ordenar los datos ambientales y sociales, que permitirán identificar los potenciales impactos del proceso. Comprende la recopilación de los datos y realización de los cálculos para cuantificar las entradas (materias primas, insumos, energía, etc.) y salidas (emisiones, productos, coproductos, etc.) del sistema modelado, así como los aspectos sociales y socioeconómicos importantes. En el caso de que los sistemas desarrollen más de una función o fabriquen más de un producto, se debe distribuir los aspectos ambientales y sociales con la asignación de carga correspondiente.

Los datos para cada proceso unitario en la ECV se pueden clasificar en las siguientes categorías:

- Entradas de energía, materias primas, entradas auxiliares y otras entradas físicas
- Productos, coproductos y residuos
- Emisiones al aire, agua y suelo
- Otros aspectos ambientales

Los flujos de materia y energía resultantes deben ser transformados en flujos elementales que representan intervención directa del proceso sobre los distintos compartimientos ambientales. Estos flujos elementales incluyen:

- Utilización de recursos naturales
- Emisiones al aire
- Descargas al agua
- Vertidos al suelo

Etapas de evaluación del impacto del ciclo de vida

El propósito de esta tercera fase es evaluar los resultados del análisis de inventario de ciclo de vida del sistema producto para comprender mejor su implicancia ambiental. Para explicar los resultados utiliza categorías de impacto e indicadores de categoría. Estos indicadores pretenden reflejar las emisiones agregadas o el uso del recurso para cada categoría de impacto, representan los impactos ambientales potenciales.

Las categorías de impacto consideradas en una evaluación de impacto ambiental del ciclo de vida incluyen: cambio climático, agotamiento de la capa de ozono, Eutroficación, acidificación, toxicidad humana (cancerígena y no-cancerígena), inorgánicos respiratorios, radiación ionizante, ecotoxicidad, formación de oxidantes fotoquímicos, uso de la tierra y agotamiento de recursos. Además, las emisiones y los recursos se asignan a cada una de estas categorías de impacto y luego se convierten en indicadores utilizando modelos de evaluación de impacto.

En esta fase se realizan habitualmente las siguientes acciones:

- Selección de categorías de impacto: se escogen las categorías de impacto a estudiar y sus respectivos indicadores. También se deben seleccionar los modelos de caracterización que se utilizarán para cuantificar los impactos ambientales. Existen dos tipos de categorías, de impacto intermedio y de impacto final (salud humana, medio ambiente y recursos naturales)
- Clasificación: se asignan los flujos elementales de la etapa anterior a las categorías de impacto escogidas. Existen aspectos ambientales que pueden aportar directamente a más de una categoría.
- Caracterización del impacto: los aspectos ambientales del inventario se agregan a cada categoría de impacto según su contribución y se calcula el indicador de la categoría. Para realizar este cálculo se tienen los factores de caracterización, estos expresan la contribución potencial de cada aspecto a su respectivo impacto, permitiendo transformar las unidades originales del flujo elemental a la unidad del indicador de la categoría.

Etapa de interpretación del ciclo de vida

Esta etapa final consiste en que los resultados del análisis de inventario del ciclo de vida y de la evaluación de impactos del ciclo de vida se resumen y discuten como una base para conclusiones, recomendaciones y toma de decisiones de acuerdo con el objetivo y alcance del estudio.

Se pretende que la interpretación entregue una presentación rápidamente comprensible, completa y consistente de los resultados de un ECV. Por ejemplo, de acuerdo con las etapas en el ciclo de vida, las diferentes operaciones unitarias en el sistema producto, transporte, entre otras, puede ser de la forma de tablas, gráficos de barra u otra representación adecuada para los resultados.

La determinación de los temas significativos puede ser simple o compleja, no existe una norma que indique cuales temas son o no relevantes para el caso de estudio. Algunos temas significativos pueden ser:

- Categorías de datos de inventario, tales como energía, emisiones, desechos, entre otros.
- Categorías de impacto, tales como uso de recurso, calentamiento global, entre otros.
- Contribuciones esenciales de las etapas del ciclo de vida, tales como procesos unitarios o grupos de procesos, como el transporte y la producción de energía.

De esta forma se termina la metodología del estudio de ciclo de vida de un determinado proceso o producto.

Anexo D: Cálculos para escenario de reemplazo de fuel oil por gas natural

El escenario 2 implica reemplazar el fuel oil utilizado en el horno de cal por gas natural.

Datos:

- Cantidad fuel oil = 0,0852 ton/ton pulpa
- Densidad fuel oil = 900 kg/m³
- Poder calorífico fuel oil = 1,2 L de Fuel oil = 11.567 kcal
- Poder calorífico gas natural = 1,24 m³ de gas natural = 11.567 kcal

Cálculo:

$$\frac{0,0852 \frac{\text{ton Fuel oil}}{\text{ton pulpa}} \times \frac{1.000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}}}{900 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,0947 \frac{\text{m}^3 \text{ Fuel oil}}{\text{ton pulpa}}$$

$$0,0947 \frac{\text{m}^3 \text{ Fuel oil}}{\text{ton pulpa}} \times \frac{1.000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} = 94,7 \frac{\text{L Fuel oil}}{\text{ton pulpa}}$$

$$94,7 \frac{\text{L Fuel oil}}{\text{ton pulpa}} \times \frac{11.567 \text{ kcal}}{1,2 \text{ L Fuel oil}} = 912.829,08 \text{ kcal}$$

$$912.829,08 \text{ kcal} \times \frac{1,24 \text{ m}^3 \text{ Gas natural}}{11.567 \text{ kcal}} = 97,86 \text{ m}^3 \text{ Gas natural}$$

Así se calculó la cantidad necesaria de gas natural para reemplazar al fuel oil. Estos datos se reemplazaron en la simulación para la celulosa ECF.