

# Proyecto Fin de Máster

## Ingeniería Ambiental

### Análisis de los métodos de asignación en sistemas de reciclaje. Aplicación a estudios ACV

Autora: Ana María Luque Calvo

Tutor: Encarni Muñoz Marín

Fátima Arroyo Torralvo

Luis Francisco Vilches

**Dpto. de Ingeniería Química e Ingeniería  
Ambiental**

**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**

Sevilla, 2023





Proyecto Fin de Máster  
Ingeniería Ambiental

# **Análisis de los métodos de asignación en sistemas de reciclaje. Aplicación a estudios ACV**

Autora:

Ana María Luque Calvo

Tutor:

Encarni Muñoz Marín

Fátima Arroyo Torralvo

Luis Francisco Vilches Arenas

Profesor titular

Dpto. de Ingeniería Química e Ingeniería Ambiental

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023



Proyecto Fin de Carrera: Análisis de los métodos de asignación en sistemas de reciclaje. Aplicación a estudios ACV

Autor: Ana María Luque Calvo

Tutor: Fátima Arroyo Torralvo

Luis Francisco Vilches Arenas

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2023

El Secretario del Tribunal



*A mi familia*

*A mis amigos*

*A mis maestros*





# Agradecimientos

---

*A mis padres y hermanos por ser mi principal apoyo  
A mi tutora de empresa Encarni Muñoz por su paciencia y cariño a la hora guiarme  
Mis tutores Fátima Arroyo y Luis Vilches por su ayuda durante estos años de máster  
Sevilla, 2023*



A día hoy es conocida la importancia de reducir las emisiones en el ciclo de vida de un producto/ organización, no solo por el cuidado del medio ambiente, sino también por la legislación europea acerca de las emisiones y por la visión pública de la empresa, ya que la sociedad cada día es más consciente del cambio climático y como reducir el impacto ambiental y busca que los productos que utiliza sean de calidad, pero también que sean de bajo impacto ambiental.

Muchas empresas recurren al análisis de ciclo de vida para estudiar diferentes impactos ambientales que se pueden generar en cada una de las etapas del ciclo de vida de un producto determinado. Sin embargo, a la hora de realizar un análisis de ciclo de vida hay que tomar numerosas decisiones, como elegir la metodología de asignación de emisiones más correcta, qué metodología utilizar para evaluar los impactos, qué software utilizar, qué indicadores ambientales elegir... Como se puede ver son numerosas decisiones sin apenas haber comenzado a realizar los cálculos, pero el elegir una opción u otra es decisivo para el resultado obtenido.

Y esta situación es la que ha dado lugar al objetivo de este proyecto en donde se ha documentado los diferentes métodos de asignación para el reciclaje en normas y documentos de orientación del ciclo de vida de los productos, y se han evaluado tres métodos el Consecuencial, APOS y Cut-off. Se ha buscado comprender, comparar y evaluar los distintos métodos de asignación y así posicionarse sobre qué método sería mejor opción para el cartón ondulado reciclado en distintas situaciones, ya sea la toma de decisiones internas, comunicaciones externas.

Para el estudio se ha utilizado la herramienta de SimaPro con la base de datos de Ecoinvent aplicando la metodología para evaluar impactos de la Huella Ambiental 3.1, y se han utilizado las categorías ambientales del cambio climático cuyas unidades de medida son kg de CO<sub>2</sub>eq y uso del agua que se mide por m<sup>3</sup>eq de privación de agua.

Una vez hecho el estudio se concluye que no se puede decir que un método sea mejor que otro, debido a que todos los métodos estudiados de forma general son difíciles de entender y poco transparentes. Además, tienen opciones de valor, es decir, al procederse de distinta forma se obtienen resultados distintos y en consecuencia distintas conclusiones. Todo va a depender de cuál sea el fin del estudio del análisis de ciclo de vida del producto y los criterios a tener en cuenta, ya que, si se busca que se incentive el reciclaje o utilizar material reciclado, tanto la metodología APOS como Cut-off serían buena opción, aunque en el primero hay que tener en cuenta que se dividen las cargas entre quien produce el residuo y quien lo utiliza como materia prima, dando lugar a que las emisiones del material reciclado sean ligeramente superiores.

Por otro lado, si se busca saber cuál sería la mejor opción a nivel ambiental, es decir, tiene menos contribución a las categorías de impacto evaluadas, cambio climático y uso de agua, para este caso estudiado sería la metodología Cut-Off pues es donde se han tenido valores más bajos para las categorías ambientales estudiadas. Sin embargo, si el objetivo es estudiar cómo mejorar el proceso, ver donde se producen más emisiones, la metodología Consecuencial puede resultar mucho más interesante, aunque la recopilación de información es mucho más extensa al tener muchas más etapas.

la principal conclusión obtenida es que ninguna opción es mejor o peor, todo depende del objetivo del estudio; no obstante, es importante tener en cuenta que en cualquier metodología que se emplee, por el simple hecho de hacer una toma de decisiones distinta a la realizada en el proyecto, el resultado puede cambiar ya que tienen opciones de valor.

# Abstract

---

Nowadays, the importance of reducing emissions in the life cycle of a product / organization is well known, not only for the care of the environment, but also for the European legislation on emissions and for the public vision of the company, since society is increasingly aware of climate change and how to reduce environmental impact and seeks that the products it uses are of quality, but also that they are of low environmental impact-

Many companies use life cycle analysis to study different environmental impacts that can be generated at each stage of the life cycle of a given product. However, when carrying out a life cycle analysis, many decisions have to be made, such as choosing the most appropriate methodology for allocating emissions, which methodology to use to evaluate the impacts, which software to use, which environmental indicators to choose... As can be seen, there are many decisions to be made before the calculations have even begun, but the choice of one option or another is decisive for the result obtained.

And it is this situation that has given rise to the objective of this project where the different allocation methods for recycling have been documented in standards and product life cycle guidance documents, and three methods have been evaluated: Consequential, APOS and Cut-off. It has sought to understand, compare and evaluate the different allocation methods and thus position itself as to which method would be the best option for recycled corrugated board in different situations, be it internal decision making, external communications.

For the study, the SimaPro tool was used with the Ecoinvent database, applying the methodology to evaluate the impacts of the Environmental Footprint 3.0, and the environmental categories of climate change were used, whose units of measurement are kg of CO<sub>2</sub>eq and water use, which is measured by m<sup>3</sup>eq of water deprivation.

Once the study is done, it is concluded that it cannot be said that one method is better than another, because all the methods studied in general are difficult to understand and not very transparent. In addition, they have value options, i.e., by proceeding in different ways, different results are obtained and consequently different conclusions.

Everything will depend on the purpose of the product life cycle analysis study and the criteria to be taken into account, since, if the aim is to encourage recycling or the use of recycled material, both the APOS and Cut-Off methodologies would be good options, although in the former it should be taken into account that the burden is divided between those who produce the waste and those who use it as raw material, resulting in slightly higher emissions from recycled material.

On the other hand, if we want to know which option would be the best at the environmental level, i.e., has the least contribution to the impact categories evaluated, climate change and water use, for this case studied it would be the Cut-Off methodology, since it is the one with the lowest values for the environmental categories studied. However, if the objective is to study how to improve the process, to see where more emissions are produced, the Sequential methodology can be much more interesting, although the collection of information is much more extensive as it has many more stages.

the main conclusion obtained is that no option is better or worse, it all depends on the objective of the study; however, it is important to bear in mind that in any methodology used, by the simple fact of making a different decision making than the one made in the project, the result may change since they have value options.

<b>Agradecimientos</b>	<b>19</b>
<b>Resumen</b>	<b>21</b>
<b>Abstract</b>	<b>22</b>
<b>Índice</b>	<b>23</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>24</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>25</b>
<b>Índice de Gráficos</b>	<b>27</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>28</b>
1.1 <i>Concepto de ACV.</i>	28
1.2 <i>Evolución histórica.</i>	30
1.3 <i>Aplicaciones del ACV.</i>	31
1.1.1 En la industria.	32
1.1.2 En la administración pública.	32
1.4 <i>Etapas en la realización de un ACV.</i>	32
1.4.1 Definición del objetivo y alcance.	33
1.4.2 Inventario.	33
1.4.3 Evaluación de impacto del ciclo de vida.	34
1.4.4 Bases de datos.	41
1.4.5 Herramienta software.	44
<b>2 Objetivos y alcance</b>	<b>52</b>
<b>3 Metodología para asignar emisiones</b>	<b>53</b>
3.1 <i>Cut off</i>	58
3.2 <i>Allocation at the point of substitution</i>	59
3.3 <i>Circular Footprint Formula ó Fórmula de Huella circular</i>	61
<b>4 Casos de estudio</b>	<b>63</b>
4.1 <i>Cambio Climático.</i>	66
4.1.1. Método Consecuencial	67
4.1.2. Método APOS	72
4.1.3. Método Cut-off	75
4.2 <i>Uso del Agua.</i>	83
4.2.1. Método Consecuencial.	84
4.2.2. Método APOS.	88
4.2.3. Método Cut-Off.	90
<b>5 Conclusiones</b>	<b>96</b>
<b>6 Bibliografía</b>	<b>100</b>
<b>7 Anexos</b>	<b>102</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1-1. Metodologías de evaluación de impacto de ciclo de vida(Vallejo 2004)	36
Tabla 1-2 Bases de datos para llevar a cabo un ACV	42
Tabla 1-3. Herramientas de software de ACV.	45
Tabla 1-4. Métodos que se encuentran en las categorías.	51
Tabla 3-1. Distintos métodos para asignar emisiones según la metodología Atribucional	57
Tabla 5-1. Resultados obtenidos.	96

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1-1. Análisis de ciclo de vida («Ik ingeniería   Análisis de Ciclo de Vida - ACV» 2023)	28
Figura 1-2. Tipos de análisis de ciclo de vida.(GISCI 2022)	29
Figura 1-3. Etapas de un ACV (elaboración propia)	32
Figura 1-4. Elementos opcionales y obligatorios en EICV de un ACV (elaboración propia)	34
Figura 1-5. Esquema de las relaciones entre intervenciones ambientales, impactos de efectos intermedios “midpoints”, impactos de efectos finales “endpoint” y áreas de protección (Vallejo 2004)	35
Figura 1-6. Logo de SimaPro	48
Figura 3-1. Organizaciones suizas que formanecoinvent (Goedkoop et al. 2016)	53
Figura 3-2. Metodología Cut-off («System Models - ecoinvent» 2020)	58
Figura 3-4. Metodología CFF (areco 2021)	61
Figura 3-5. Fórmula CFF(areco 2021)	62
Figura 4-1. Árbol de Procesos de la Metodología Consecuencial para el Cambio Climático	67
Figura 4-2. Metodología Consecuencial (última etapa del ciclo)	68
Figura 4-3. Metodología Consecuencial (etapa previa al residuo)	68
Figura 4-4. Metodología Consecuencial, el residuo de cartón clasificado	69
Figura 4-5. Metodología Consecuencia, etapa anterior a la formación del residuo de cartón reciclado	70
Figura 4-6. Metodología Consecuencial, materias primas	71
Figura 4-7. Árbol de Procesos de la Metodología APOS1 para el Cambio Climático	72
Figura 4-8. Metodología APOS, Gas Natural utilizado	73
Figura 4-9. Metodología APOS, Residuo de Cartón Reciclado	73
Figura 4-10. Metodología APOS, electricidad utilizada	74
Figura 4-11. Árbol de Procesos de la Metodología Cut-off para el Cambio Climático	75
Figura 4-12. Metodología Cut-Off	75
Figura 4-13. Metodología Cut-Off	76
Figura 4-14. Metodología Cut-Off	77
Figura 4-15. Metodología Cut-Off	77
Figura 4-16. Última etapa del ciclo de vida del producto (Consecuencial, Apos y Cut-off)	78
Figura 4-17. Obtención del Residuo de Cartón clasificado (Consecuencial, Apos y Cut-off)	79
Figura 4-18. Etapas anteriores a la producción del residuo de cartón clasificado según la metodología Consecuencial	80
Figura 4-19. Árbol de procesos de la Metodología Consecuencial para el Uso del Agua	84
Figura 4-20. Primera parte de la Red de uso del Agua	85
Figura 4-21. Materias primas del cartón virgen en la red del uso del agua	86
Figura 4-22. Corriente de aceite evitada en la privación del agua	87
Figura 4-23. Árbol de procesos de la Metodología APOS para el Uso del Agua	88

Figura 4-24. Uso del agua para obtener la patata como materia prima para el almidón	89
Figura 4-25. Árbol de procesos de la Metodología Cut-Off para el Uso del Agua	90
Figura 4-26. Cut-off con 1% porcentaje de corte	91
Figura 4-27. Obtención de la patata según el método Cut-off	92



# ÍNDICE DE GRÁFICOS

---

<b>Gráfico I. Contribución al Proceso Consecuencial.</b>	81
<b>Gráfico II. Contribución al Proceso APOS.</b>	81
<b>Gráfico III. Contribución al Proceso Cut-Off.</b>	82
<b>Gráfico IV. Contribución al Proceso Consecuencial.</b>	93
<b>Gráfico V. Contribución al Proceso APOS</b>	93
<b>Gráfico VI. Contribución al Proceso Cut-Off.</b>	94

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Concepto de ACV.

La primera definición de ACV es establecida por la ‘Society of Environmental Toxicology Chemistry (SETAC, 2022):

“El análisis del ciclo de vida es un proceso objetivo para evaluar las cargas ambientales asociadas con un proceso, producto o servicio mediante la identificación y cuantificación de la energía y materiales consumidos y de los residuos generados al ambiente, para valorar el impacto de estos consumos y generaciones al ambiente y para evaluar e implementar mejoras ambientales. Este análisis incluye el ciclo de vida entero del proceso, producto o servicio, incluyendo la extracción y procesado de las materias primas: transformación, transporte y distribución; uso, reutilización y mantenimiento; reciclado y eliminación total”.

Según la ISO 14040, es una recopilación y evaluación de las entradas o inputs, y de las salidas/ outputs y los impactos ambientales potenciales ya sea de un sistema, proceso o producto a lo largo de su ciclo de vida. Las etapas son: obtención de materias primas, producción, distribución, uso, reciclaje y/o disposición de residuos tal y como se muestra en la Figura 1-1



Figura 1-1. Análisis de ciclo de vida («Ik ingeniería | Análisis de Ciclo de Vida - ACV» 2023)

Se encuentran diferentes tipos de análisis de ciclo de vida según el alcance y tipo de estudio:

- ‘de la cuna a la puerta’: el sistema está formado por las entradas/salidas desde la obtención de las materias primas hasta que el producto está en el mercado.
- ‘de la puerta a la puerta’: solo se tienen en cuenta las entradas del sistema
- ‘de la cuna a la tumba’: en el cual se incluyen todas entradas y salidas de los procesos que se involucran a lo largo del ciclo. Está formado por la extracción de materias primas, procesamiento de los materiales para la manufactura de componentes, distribución y transporte, uso del producto y mantenimiento y, por último, reciclaje y/o gestión final.
- ‘de la cuna a la cuna’: en este caso las salidas de eliminación de residuos del sistema son consideradas materias primas y/o entradas para este sistema u otro.

En la Figura 1-2 podemos ver un esquema representativo de algunos de los tipos de ACV detallados anteriormente.

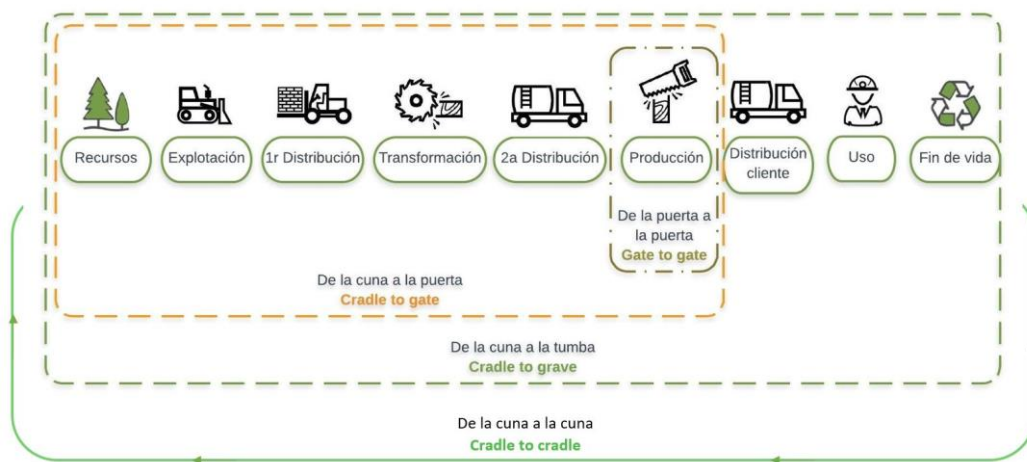


Figura 1-2. Tipos de análisis de ciclo de vida.(GISCI 2022)

Se llaman entradas a la utilización de materias primas, recursos, productos, transportes, electricidad, combustibles... y se tienen en cuenta en cada una de las etapas del sistema. Las salidas son las emisiones al aire, agua, suelo al igual que los residuos y subproductos del sistema.

El cómo se recopilan las entradas y salidas es a lo que se denomina inventario, es donde se cuantifican y recopilan todas las entradas y salidas que se van a tener en cuenta en el ACV del sistema a estudiar.

El cómputo de entradas y salidas es la base para llevar a cabo el análisis y evaluación de los efectos medioambientales del sistema a estudiar. El estudiar cómo afecta estos recursos y emisiones al medio ambiente y al ser humano es lo que se denomina *evaluación de impacto ambiental*. El último paso consiste en evaluar los resultados obtenidos e implementar una mejoras y/o tomar una decisión acerca del producto/proceso a estudiar.(Vázquez 2005)

## 1.2 Evolución histórica.

El análisis de ciclo de vida es una técnica que empezó a utilizar en los años sesenta en Estados Unidos. Se puede diferenciar tres etapas: la inicial, desarrollo y la última donde se ha consolidado (Romero Díaz de Ávila 2007).

**En una primera etapa**, desde el principio de la década 1960 hasta el final de la década de 1980, es en Estados Unidos donde se realizan los primeros estudios centrándose en los requerimientos energéticos y sus efectos ambientales. Con el tiempo, debido al aumento de la población y por ello el aumento del uso de recurso y la crisis del petróleo, los estudios se encaminaron hacia la gestión óptima de la energía; para ello era necesario tener en cuenta el uso de materias primas y los recursos generados (Vázquez 2005).

**La segunda etapa** de desarrollo de ACV comienza en 1990. En ella hay que destacar:

- Tiene lugar una proyección internacional del ACV para lo que tuvieron lugar varios seminarios a nivel internacional:
  - i. En Washington, organizado por World Wildlife Found y patrocinado por la EPA.
  - ii. En Vermont, organizado por SETAC.
  - iii. En Lovaina, organizado por Procter & Gamble.
- Varias instituciones comenzaron a desarrollar diferentes estudios de sectores industriales o productos concretos como es el caso de:
  - BUWAL (Swiss Federal Office of Environment, Forest and Landscape)
  - AMPE (Association of Plastic Manufactures in Europe)
  - PWMI (European Centre for Plastics in the environment).
- En 1992 crearon la SPOLD (Society for the Promotion of LCA Development) para potenciar y normalizar el uso del ACV.

En Europa, es el Laboratorio Federal Suizo para Ensayos e Investigación de Materiales es el primero en trabajar en su desarrollo y desarrolló la base de datos de Ecoinvent.

En el año 1993, la Universidad de Leiden (Holanda) publicó una metodología que dio lugar al inicio de la homogeneización de las metodologías de trabajo de ACV. Y, en la segunda mitad de la década de los noventa, desarrollaron la base de datos de Ecoinvent95.

En 1993, se creó en ISO el Comité Técnico 207 (ISO/TC 207), con el fin del desarrollo de normativas internacionales para gestión medioambiental. El contexto normativo del ACV en esta etapa era el siguiente:

- UNE-EN ISO 14040. (1997). Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Principios y Estructura: Especifica el marco general, principios y necesidades básicas para realizar un estudio de ACV, no describiéndose la técnica del ACV en detalles.
- UNE-EN ISO 14041. (1998). Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Definición de Objetivos y Alcance y análisis de inventario: en esta normativa se especifican las necesidades y procedimientos para elaborar la definición de los objetivos y alcance del estudio y para realizar, interpretar y elaborar el informe del análisis del inventario del ciclo de vida, ICV.
- UNE-EN ISO 14042. (2000). Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Evaluación de impacto de ciclo de vida: en ella se describe y se establece una guía de la estructura general de la fase de análisis del impacto, AICV. Se especifican los requerimientos para llevar a cabo un AICV y se relaciona con otras fases del ACV.
- UNE-EN ISO 14043. (2000). Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Interpretación de ciclo de vida: esta normativa proporciona las recomendaciones para realizar la fase de interpretación de un ACV o los estudios de un ICV, en ella no se especifican metodologías determinadas para llevar a cabo esta fase.

**La tercera etapa** tiene su inicio a mediados de los noventa, se puede considerar la etapa de mayor desarrollo de los trabajos de ACV; las revistas como “Environmental Science & Technology”, “Chemosphere” y “AICHE Journal” empiezan a incorporarla en sus ámbitos a estudiar.

En esta etapa, en el 2006, las normas que hasta el momento se utilizaban para el ACV fueron derogadas por las siguientes:

- UNE-EN ISO 14040. (2006) Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Principios y marco de referencia.
- UNE-EN ISO 14044. (2006). Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Requisitos y directrices.

A día de hoy existe una Plataforma Europea sobre el ACV, de forma que se promociona el trabajo y aplicación de ACV en distintos ámbitos, como son la industria, administración... Se busca la homogenización de la metodología y el tratamiento de datos para así tener herramientas comunes para los ACV. En 2012 surge el International Reference Life Cycle Data System donde fundamentalmente se trabaja en:

- Manual ILCD: guía para utilizar las normas de la serie ISO 14040, enfoques metodológicos, presentación de informes, etc. (European Commission. Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability. 2010)
- ILCD Data Network: desarrollo de bases de datos que puedan servir de referencia.(European Commission 2014)

### 1.3 Aplicaciones del ACV.

La herramienta de ACV puede ser utilizada por diferentes agentes sociales:

- En la legislación comunitaria y española.
- En la industria, administración.

Se trata de una herramienta que no está sometida a ninguna legislación, sin embargo, su ideología actual se refleja en la legislación de hoy en día sobre la gestión ambiental y prevención desarrollada por la Comisión europea como las que se exponen a continuación: (Romero Díaz de Ávila 2007)

- *Resolución de 13 de enero de 2000, de la Secretaría General de Medio Ambiente, por la que se dispone la publicación del Acuerdo de Consejo de ministros, de 7 de enero de 2000, por el que se aprueba el Plan Nacional de Residuos Urbanos.*
- *Real Decreto 239/2013, de 5 de abril, por el que se establecen las normas para la aplicación del Reglamento (CE) n.º 1221/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de noviembre de 2009, relativo a la participación voluntaria de organizaciones en un sistema comunitario de gestión y auditoría medioambientales (EMAS), y por el que se derogan el Reglamento (CE) n.º 761/2001 y las Decisiones 2001/681/CE y 2006/193/CE de la Comisión*

Además de estas disposiciones comunitarias, en España se incluye la idea de ACV en algunos de sus puntos:

- Ley 22/2011, de 28 de julio de residuos y suelo contaminados
- Real Decreto 1055/2022. De 27 de diciembre, de envases y residuos de envases

### 1.1.1 En la industria.

En el caso de la aplicación de ACV en la industria se debe tener en cuenta si se va a emplear para uso interno o externo (Romero Díaz de Ávila 2007):

*En el caso de Uso interno, se suele utilizar para:*

- Para planificar estrategias
- Desarrollar distintas alternativas en la gestión de residuos
- Para tomar decisiones como sería el modificar el diseño de un producto, comparar dos productos...
- Evaluar los efectos ambientales de la instalación

*En el caso de Uso externo, su empleo suele enmarcarse en:*

- Mejorar el marketing ambiental
- Ejercer presión sobre los proveedores
- Proporcionar información a la administración para la regulación y reducción de ciertos productos

### 1.1.2 En la administración pública.

Entre las distintas contribuciones que puede hacer el ACV destacan las siguientes (Vázquez 2005):

- Colabora en el Desarrollo de legislación y políticas ambientales, permitiendo que a largo plazo se conserven recursos y reduzcan los riesgos ambientales de productos y procesos.
- Evaluar distintas alternativas de gestión de residuos.
- Facilitarla información al público sobre las características medioambientales de productos, procesos y materiales.
- Detectar donde es necesario una mayor investigación y establecer un orden de prioridades.
- Establecer criterios a la hora de valorar y diferenciar un producto en el eco-etiquetado.

## 1.4 Etapas en la realización de un ACV.

Acorde a la norma UNE- EN – ISO -1440, se tratan de cuatro etapas que están conectadas de formas que es posible la retroalimentación y ajuste del proceso tal y como se puede ver en la Figura 1-3.

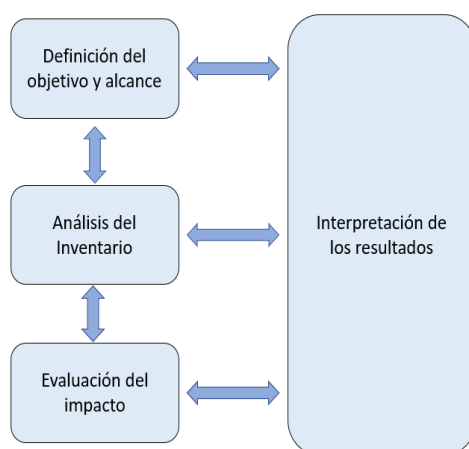


Figura 1-3. Etapas de un ACV (elaboración propia)

### 1.4.1 Definición del objetivo y alcance.

Se trata de la primera etapa del estudio. En esta primera etapa, se indica cuál es el objeto de estudio y los objetivos que se quieren alcanzar; que deben indicar cual es la aplicación de dicho estudio, las razones por las que se hacen, el público al que va dirigido y el uso que tendrán.

A la hora de definir el alcance hay que destacar los siguientes componentes que deben estar para poder considerarlo alcance de un ACV:

- Definición de la **unidad funcional**: según la norma ISO 1440, 2006 es: cuantificación de las funciones identificadas (características de desempeño) del producto” y “proporciona una referencia de la asignación de entradas y salidas del proceso considerado”. Según qué se vaya a estudiar la unidad funcional puede variar. Si se trata de un solo producto, ésta coincide con el concepto de la base de cálculo usada para resolver los balances de materia y energía; sin embargo, cuando se habla de un ACV comparativo es muy importante definir la unidad funcional a partir de la función del sistema pues luego afectará a los resultados de estudio.
- Es muy importante definirla correctamente ya que todas las entradas y salidas calculadas en la segunda etapa están referenciadas y normalizadas a esta unidad funcional (Ruiz Amador y Zuñiga López 2012)
- **Establecer el sistema y sus límites**: estos dependen de los objetivos del estudio
- **Análisis de la calidad de datos**: se debe tener en cuenta límites temporales, geográficos, precisión, integridad (si son medidos o estimados) representatividad, coherencia, reproductividad (si se puede reproducir el modelo con la documentación aportada), fuente de datos e incertidumbre (suposiciones, modelos...).

### 1.4.2 Inventario.

Es la fase en la cual se recogen los datos de entrada y salida de cada uno de los procesos del sistema incluidos en los límites que se han definido en el alcance, es decir, se identifican y cuantifican los aspectos o cargas medioambientales a lo largo del ACV como son el consumo de materias primas y energía, generación de residuos y emisiones, ya sean al aire, agua, suelo...

Se puede decir, que consiste en una lista de sustancias o flujos elementales que entran y salen de los límites del sistema. Los flujos elementales son los flujos de energía y materiales que provienen de la naturaleza sin transformación alguna o van directamente a ella. A la hora de hacer el inventario hay que tener en cuenta que los datos se deben normalizar según la unidad funcional (Ruiz et. 2012)

Para elaborar el inventario es necesario llevar a cabo una *recopilación de datos* para lo que hay que tener en cuenta lo siguiente:

En los datos a recopilar hay que diferenciar entre los datos de actividad y los factores de emisión.

- Datos de actividad, término con el que se identifican todas las entradas y salidas del ACV, como son los recursos materiales y energéticos, transporte, generación de co-productos y residuos.
- Factores de emisión, que son los que enlazan los datos de actividad con los flujos elementales.

Ambos tipos de datos tienen dos posibles orígenes:

- Primarios, son las medidas directas o información obtenida en campo.
- Secundarios, se tratan de medidas no específicas del proceso u objeto de estudio, sino más bien son una media de procesos, tecnologías o materiales adaptados al sistema estudiado. Este tipo de datos se suelen obtener de:
  - Bases de datos
  - Estudios que hacen organismos nacionales, organizaciones de partes interesadas...

- Publicaciones, informes, artículos científicos o técnicas
- Legislaciones y valores umbrales...

Es importante que, como resultado de esta etapa, solo tienen que aparecer los flujos elementales como único dato resultante de haber multiplicado el factor de emisión por los datos de actividad. (Ruiz Amador y Zuñiga López 2012).

### 1.4.3 Evaluación de impacto del ciclo de vida.

Esta etapa, EICV en adelante, relaciona los resultados del análisis de inventario con los efectos ambientales que tienen lugar. En esta etapa se busca valorar la importancia de los potenciales impactos que se generan.

Acorde a la norma ISO 14040, hay varias subetapas, todas indicadas en la Figura 1-4:

- i) Selección de las categorías de impacto, indicadores de categorías y modelos de caracterización.
- ii) Clasificación, es decir, se agrupan las cargas ambientales debidas al consumo de recursos y generación de emisiones y residuos, según los potenciales efectos ambientales que produce cada una de ellas.
- iii) Caracterización, consiste en el cálculo de la contribución de cada compuesto detectado en el análisis de inventario a un efecto ambiental
- iv) Normalización, consiste en calcular la magnitud de los resultados del indicador de categoría con respecto a una determinada información de referencia. Es útil para verificar si existen incoherencias e informar sobre la importancia relativa de los resultados del indicador.
- v) Valorización, de esta forma se determina de forma cuantitativa y cualitativa la importancia relativa de cada una de las categorías de impacto buscando obtener un único resultado o índice ambiental.

Según la norma ISO 14040, las tres primeras subetapas mencionadas son obligatorias mientras las dos últimas son opcionales.

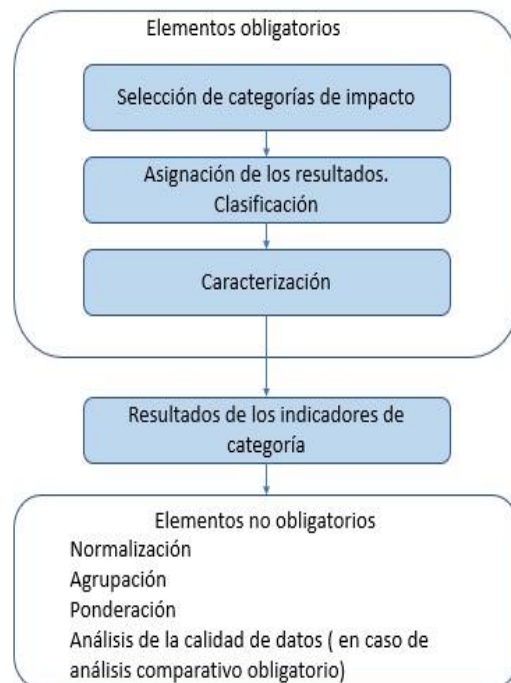


Figura 1-4. Elementos opcionales y obligatorios en EICV de un ACV (elaboración propia)



*Metodología para evaluar los impactos.*

Actualmente hay numerosas metodologías desarrolladas por distintos equipos de investigación; la principal diferencia entre ellas es hasta qué eslabón se llega durante el análisis que relaciona las emisiones del inventario con el daño provocado sobre la salud humana y el medio ambiente (Ruiz Amador y Zuñiga Lopez 2012)

Por ello, según qué efectos se consideren, se encuentran dos grandes grupos (Figura 3-5):

- Metodologías de efectos intermedios ‘*midpoint*’, son metodologías orientadas al problema, proporcionan información más detallada acerca de qué manera y en qué punto afecta al medio ambiente. Son las más empleadas dentro de la comunidad científica y técnica. En esta metodología se suelen encontrar diferentes categorías de impacto, por ejemplo, el calentamiento global, consumo de recursos energéticos, agotamiento de la capa de ozono, etc.
- Metodologías de impactos finales ‘*endpoint*’, están orientadas al daño, es decir, tratan de identificar y definir el daño que se causa al hombre y medio natural usando indicadores que afectan directamente a la sociedad, de forma que los resultados son más comprensibles para un público no especializado. En este tipo de metodologías encontramos como resultados el daño a la salud humana, la pérdida de biodiversidad, pérdida de la calidad del suelo, etc.

En la Figura 1-5 se resumen las metodologías más importantes, además de indicar las etapas de proceso que incluyen, categorías de impacto incluidas y descripción de las etapas que cubren (Vázquez 2005).

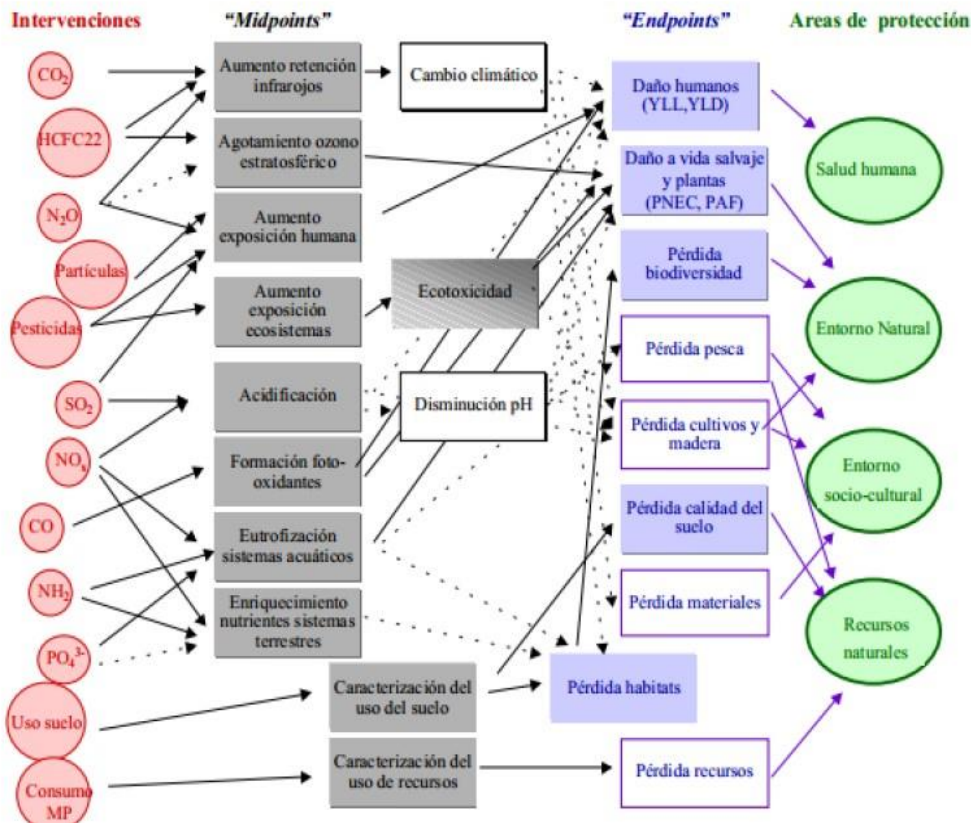
























Figura 1-5. Esquema de las relaciones entre intervenciones ambientales, impactos de efectos intermedios “*midpoints*”, impactos de efectos finales “*endpoint*” y áreas de protección (Vallejo 2004)











En la Tabla 1-1 están recogidas las metodologías más importantes desarrolladas para la evaluación de impactos, en ella aparecen indicados los creadores de las mismas y las categorías de impacto que evalúan (se indica tic verde si la metodología incluye la subetapa).

Tabla 1-1. Metodologías de evaluación de impacto de ciclo de vida(Vallejo 2004)

RECIPE		Ec99		METODOLOGÍA	
				Clasificación	<b>FASES DE EICV</b>
				Caracterización	
				Normalización	
				Agrupación	
				Ponderación	
Universidad de Leiden		PreConsultans		CREADOR	
Destrucción capa ozono Toxicidad humana Radiación Smog fotoquímico Formación particulados Cambio Climático Ecotoxicidad al suelo Acidificación Ocupación suelo rural	Transformación suelo natural Ecotoxicidad marina Ocupación suelo urbano Eutrofización marina Eutrofización agua dulce Ecotoxicidad agua dulce Uso de combustibles fósiles recursos naturales, agua	Carcinogénicos Respiratorios orgánicos Respiratorios inorgánicos Cambio Climático Radiación Destrucción capa ozono	Ecotoxicidad Acidificación Uso de suelo Uso de minerales Uso de combustibles fósiles	<b>CATEGORÍAS DE IMPACTO AMBIENTAL INCLUIDAS</b>	

EDIP/UMIP96	IPCC	CML 2001	METODOLOGÍA	
			Clasificación	<b>FASES DE EICV</b>
			Caracterización	
			Normalización	
			Agrupación	
			Ponderación	
Environmental Design of Industrial Products (EDIP)	Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)	Centre of Environmental Science (CML)	<b>CREADOR</b>	
Cambio climático Destrucción capa de ozono Acidificación Eutrofización Smog fotoquímico Ecotoxicidad acuática Ecotoxicidad del suelo Toxicidad humana Residuos Uso de recursos	Cambio climático	Cambio climático Destrucción capa ozono Toxicidad humana Ecotoxicidad Smog fotoquímico Acidificación Eutrofización Uso de recursos Agotamiento de los recursos abióticos	<b>CATEGORÍAS DE IMPACTO AMBIENTAL INCLUIDAS</b>	

ECOPOINTS97	EPS2000	METODOLOGÍA	
		Clasificación	<b>FASES DE EICV</b>
		Caracterización	
		Normalización	
		Agrupación	
		Ponderación	
Swiss Ministry of the Environment (BUWAL)	Centre for Environmental Assesment of Products and Material Systems	<b>CREADOR</b>	
Emisiones al aire Vertidos de aguas superficiales Vertidos de aguas subterráneas Vertidos al suelo Uso de recursos Residuos	Salud humana Capacidad de producción del ecosistema Reserva de recursos abióticos Diversidad biológica Valores culturales	<b>CATEGORÍAS DE IMPACTO AMBIENTAL INCLUIDAS</b>	

IMPACT2002+		TRACI		METODOLOGÍA	
				<b>Clasificación</b>	<b>FASES DE EICV</b>
				<b>Caracterización</b>	
				<b>Normalización</b>	
				<b>Agrupación</b>	
				<b>Ponderación</b>	
Instituto de tecnología federal suizo de Lausanne (EPFL)		Environmental Protection Agency (EPA US)		<b>CREADOR</b>	
Toxicidad humana Efectos respiratorios Radiación ionizante Destrucción capa ozono Smog fotoquímico Ecotoxicidad acuática, del suelo	Acidificación acuática Acidificación y eutrofización del suelo Ocupación del suelo Cambio climático Energías no renovables Uso de recursos	Destrucción capa ozono Cambio Climático Smog fotoquímico Acidificación Eutrofización Uso del suelo Agua	Efectos cancerígenos y no a la salud humana Polución a la salud humana Ecotoxicidad Agotamiento de combustibles fósiles	<b>CATEGORÍAS DE IMPACTO AMBIENTAL INCLUIDAS</b>	



#### **1.4.4 Bases de datos.**

La parte más compleja a la hora de realizar un ACV es la recopilación de datos, ya sean primarios/ específicos como secundarios/generales, ya que además es necesario garantizar la representatividad y calidad de los mismos.

En la mayoría de los casos se suelen recurrir a bases de datos, donde se pueden encontrar procesos de todo tipo, como es por ejemplo la extracción de materias primas, fabricación de embalajes, etc.

En las bases de datos se pueden encontrar dos tipos de procesos (Ruiz Amador y Zuñiga Lopez 2012):

- Unitarios, son los procesos más pequeños que cuantifican las entradas y salidas, como por ejemplo sería la extracción de la bauxita para producir aluminio.
- Agregados, son los que hacen referencia a inventarios de ciclos de vida en donde están todas las entradas y salidas de los procesos unitarios que forman el proceso.

En la Tabla 1-2 se han recopilado algunas de las bases de datos más utilizadas y algunas de sus características más relevantes (Vázquez 2005, Vallejo 2004)

Tabla 1-2 Bases de datos para llevar a cabo un ACV

<b>Nombre BBDD</b>	<b>Formato</b>	<b>Nº de datos deICV</b>	<b>Sector</b>	<b>Fuente</b>
<b>Ecoinvent</b>	Ecospold	12000	Genérico	Ecoinvent Centre <a href="http://www.ecoinvent.org/">http://www.ecoinvent.org/</a>
<b>Boustead</b>	Modelo propio	13000	Genérico	Boustead Consulting <a href="http://www.boustead-consulting.co.uk/">http://www.boustead-consulting.co.uk/</a>
<b>IVAMLCA</b>	Ecospold	1300	Genérico	IVAM UvA by <a href="http://www.ivam.uva.nl">http://www.ivam.uva.nl</a>
<b>ProBas</b>	Ecospold	7000	Genérico	Umbeltbundesamt, Germany (German only). <a href="http://www.probas.umweltbundesamt.de">http://www.probas.umweltbundesamt.de</a>
<b>GaBi databases</b>	Ecospold	2300	Genérico	PE International GmbH, Germany. University of Stuttgart, Germany. <a href="http://www.gabi-software.com/">http://www.gabi-software.com/</a>
<b>DEAM</b>	Ecospold	1200	Genérico	Ecobilan – PriceWaterhouse Coopers, France. <a href="https://www.ecobilan.com/">https://www.ecobilan.com/</a>
<b>ETH-ESU 96</b>	Ecospold	1181	Genérico	ETH-ESU, Switzerland. <a href="http://www.esu-services.ch/">http://www.esu-services.ch/</a>
<b>GEMIS 4.4.</b>	Excel	1000	Genérico	Institute for applied Ecology, Darmstadt office, Germany. <a href="http://www.gemis.de/">http://www.gemis.de/</a>
<b>Option data pack</b>	Excel	967	Genérico	National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Japan (Japanese only). <a href="http://www.jemai.or.jp/english/index.cfm">http://www.jemai.or.jp/english/index.cfm</a>
<b>Umberto library 5.5.</b>	Ecospold	600	Genérico	Institute for Environmental Informatics Hamburg GmbH, Germany. <a href="http://www.umberto.de/">http://www.umberto.de/</a>
<b>IDEMAT 2001</b>	Ecospold	507	Genérico	Delft University of technology, Holland. <a href="http://www.idemat.nl/">http://www.idemat.nl/</a>
<b>CPMLCA Database</b>	Spine	500	Genérico	Center for Environmental Assessment of Product and Material Systems-CPM, Sweden. <a href="http://www.cpm.chalmers.se/CPMDatabase/">http://www.cpm.chalmers.se/CPMDatabase/</a>



<b>Nombre BBDD</b>	<b>Formato</b>	<b>Nº de datos deICV</b>	<b>Sector</b>	<b>Fuente</b>
<b>Japanese Input-Output Database</b>	Tablas Input-Output	400 sectores	Multi Sectorial	Environmental Technology Laboratory of the Corporate Research & Development centre of Toshiba Corporation, Japan. <a href="http://www.toshiba.co.jp/env/en/products/ecp/factor.htm">http://www.toshiba.co.jp/env/en/products/ecp/factor.htm</a>
<b>FRANKLIN USLCI</b>	Ecospold	355	Genérico	Franklin Associates Ltd, USA. / National Renewable Energy Laboratory, USA. Sylvatica, USA / Athena Sustainable Materials Institute, Canadá. <a href="http://www.fal.com/">http://www.fal.com/</a>
<b>Data Archive</b>	Ecospold	354	Genérico	Plastics Waste Management Institute (PWMI), Japan. Federal Office for the Environment, Switzerland. Chalmers University of Technology, Sweden. <a href="http://www.plasticseurope.org/">http://www.plasticseurope.org/</a>
<b>BUWAL 250</b>	Ecospold	286	Genérico	Federal Office for the Environment, Switzerland. <a href="http://www.bafu.admin.ch/">http://www.bafu.admin.ch/</a>
<b>Ecodesign X-Pro database 1</b>	Ecospold	150	Genérico	Ecomundo, France. <a href="http://www.ecomundo.eu/default.aspx">http://www.ecomundo.eu/default.aspx</a>

#### **1.4.5 Herramienta software.**

En los últimos años se han desarrollado numerosos programas basados en la metodología del ACV, para facilitar el cálculo. En la mayoría de los casos incluyen bases de datos que pueden tener mayor o menor extensión y afectando también al precio de estos. Las bases de datos de inventarios públicos suelen estar incorporadas en la mayoría de los programas comerciales.

En la mayoría de ellos se encuentran datos que configuran el inventario, obteniéndose los resultados para diferentes categorías de impacto elegidas. En algunos incluso se puede realizar el análisis de sensibilidad e incertidumbre (Vallejo 2004) permitiendo así evaluar la diferencia entre los datos, y el margen de error que se encuentran en los resultados obtenidos.

En la Tabla 1-3 aparecen algunos de las herramientas que se suelen utilizar en el ACV (Vázquez 2005), indicando las principales características

Tabla 1-3. Herramientas de software de ACV.

Nombre	Desarrollador	Enfoque	Características
<b>SIMAPRO</b>	Pre-Consultants	Genérico	<p>Disponibles protocolos para la realización guiada de ACVs.</p> <p>Posibilidad de modificación en cualquier momento de todos los parámetros del ciclo de vida del producto.</p> <p>Permite análisis tipo: LCA: Life Cycle Assessment y LCC: Life Cycle Cost</p> <p>Posibilita la redacción de informes de acuerdo con la normativa ISO de ACV</p> <p>Posibilidad de análisis de: incertidumbre de los datos, escenarios de fin de vida, análisis de sensibilidad y Monte Carlo.</p> <p>Permite exportar la información tanto en formato Ecospold y en Excel. <a href="http://www.pre.nl/pre/default.htm">http://www.pre.nl/pre/default.htm</a></p>
<b>GABI</b>	Instituto de ciencia y ensayos de polímeros (IKP) y la universidad de Stuttgart en colaboración con PE EUROPE GMBH	Genérico	<p>Descripción gráfica del ciclo de vida del producto mediante estructura jerárquica.</p> <p>Entradas y salidas asociadas a cada proceso.</p> <p>Flujos entre procesos.</p> <p>Posibilidad de modificación en cualquier momento de todos los parámetros del ciclo de vida del producto.</p> <p>Posibilidad de reutilización de procesos y planes creados en otros proyectos. Permite análisis tipo: LCA: Life Cycle Assessment, LCC: Life Cycle Cost y LCWT: Life Cycle Working Time.</p> <p>Alimentación de datos del ICV en formato fichas (similitud con SimaPro)</p> <p>Asignación posterior de cada dato del ICV a un dato concreto de la BBDD.</p> <p>Gran variedad de representación de los datos del análisis, tanto en lo referente al balance del sistema, como a la EICV.</p> <p>Redacción de informes de acuerdo a exigencias ISO de ACV.</p> <p>Posibilidad de asignación de cargas.</p> <p>Posibilidad de análisis de: escenarios de fin de vida, sensibilidad y Monte Carlo.</p> <p>Permite la agrupación de procesos según tipo, nación, empresa y usuario definido (cumplimiento de VDA 231-106 e Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero. Permite exportar la información tanto en formato Ecospold y en Excel. <a href="http://www.gabi-software.com/">http://www.gabi-software.com/</a></p>

<b>EIME 9.0</b>	Bureau Veritas CODDE, France	Eléctrico	<p>Utiliza una amplia variedad de base de datos: BUWAL, DEAM, IDEMAT, datos de APME (Association of Plastics Manufacturers in Europe), etc.</p> <p>Método EICV: Concepto de Ecobalance. 11 categorías de impacto fijadas por Ecobilan.</p> <p>Responde a cumplimiento legislativo de RoHs, WEEE y EuP.</p> <p>Recomenda por EPA, EPD, BV, FIECC (French Federation of Electric, Electronics and Communication industries).</p> <p><a href="http://www.codde.fr/eng/EIMELicences.html">www.codde.fr/eng/EIMELicences.html</a></p>
<b>ENVIRONMENTAL IMPACT ESTIMATOR 3.0.2</b>	Athena Sustainable Materials Institute, Canada	Construcción y edificación	<p>Diferencia tipologías de construcciones.</p> <p>Dispone de BBDD propia.</p> <p>Disponible el “Ecocalculator”, el cual permite realizar ACVs de materiales de construcción.</p> <p>Dispone de método de EICV propio. <a href="http://www.athenasmi.org">www.athenasmi.org</a></p>
<b>EDP TOOLS SUIT 2007</b>	ITKE Environmental Technology Inc, China	Genérico / Construcción	<p>Herramienta ACV gratuita, disponible online y en castellano.</p> <p>Dispone de base de datos propia.</p> <p>Paso de caracterización según CML2001.</p> <p>Proporciona valores para diferentes categorías de impacto.</p> <p>Permite importar datos. <a href="http://www.ecosmes.net">www.ecosmes.net</a></p>
<b>EVERDEE 2.0</b>	ENEA, Italian National Agency for New Technology, Energy and the Environment	Genérico	<p>Herramienta ACV gratuita, disponible online y en castellano.</p> <p>Dispone de base de datos propia.</p> <p>Paso de caracterización según CML2001.</p> <p>Proporciona valores para diferentes categorías de impacto.</p> <p>Permite importar datos. <a href="http://www.ecosmes.net">www.ecosmes.net</a></p>

<b>GEMIS 4.42</b>	Oeko Institut (Institute for applied Ecology), Darmstadt Office, Germany	Genérico	<p>Herramienta ACV gratuita y descargable a través de su página web.</p> <p>Además de las habituales. Evalúa categorías de impacto no comunes en otras herramientas, como CER (Cumulated Energy Demand), CMR (Cumulated Energy Requirement).</p> <p>Disponible en castellano. <a href="http://www.gemis.de">www.gemis.de</a></p>
<b>GREEN-E1.0</b>	EcoIntsys-Life Cycle Systems, Switzerland	Genérico	<p>Herramienta integradora de la metodología ACV en la gestión empresarial.</p> <p>Utiliza como base de datos Ecoinvent, aunque el usuario puede configurar su propia base de datos.</p> <p>Por defecto utiliza como método de EICV Impact2002+, aunque se pueden configurar otros métodos.</p> <p>Información exportable en Excel. <a href="http://www.green-e.ch">www.green-e.ch</a></p>

### 1.4.5.1 *SimaPro*

En este Trabajo de Fin de Máster se va a utilizar la herramienta SimaPro, mencionada en la tabla anterior. Se trata de un software analítico para medir la huella ambiental tanto de productos como de servicios de una forma objetiva y con elevada transparencia. (CADIS 2022). Siendo su logo el que aparece en la Figura 1-6



*Figura 1-6. Logo de SimaPro*

Dicho software facilita la toma de decisiones informadas, mejorar los ciclos de vida y aumentar el impacto de las empresas, ya que permite tener información sobre el desempeño ambiental de los productos y servicios e impulsar cambios sostenibles.

Se trata un software que lleva presente entre los softwares de ACV líderes más de 30 años, y es utilizado en empresas y universidades en más 80 países. Fue diseñado por PRé Sustainability, para ser una fuente de información basada en la ciencia, aportando la seguridad suficiente a la hora de utilizarlo debido a las siguientes características(SimaPro 2023) (Goedkoop et al. 2016):

- Es transparente, permite tomar decisiones conscientes, realizar cálculos avanzados y se evita el realizar suposiciones ocultas debido a que se pueden ver todos los detalles de las bases de datos, procesos unitarios, redes de suministro, resultados.
- Es robusto y confiable, se basa en ciencia sólida de LCA, método líder para medir sostenibilidad del producto. Se basa en métricas de sostenibilidad y contribuciones a importantes desarrollos de investigación y políticas; siendo así la herramienta elegida para crear LCA compatibles con ISO, EPD e informes.
- Tiene una amplia gama de datos.
- Aplicación coherente de los límites y asignación del sistema.
- Bien documentada y se pueden acceder a esos informes.
- Especificación coherente de datos de incertidumbre.
- Especifica, ya que, por ejemplo, las emisiones se especifican en subcompartimentos.
- Están incluidos los bienes de capital por defecto.
- Se actualiza de forma regular además de tener un alcance más internacional.

Con SimaPro se pueden llevar a cabo las siguientes tareas:

- Modelar y analizar fácilmente ciclos de vida complejos de forma sistemática y transparente.
- Medir el impacto ambiental de sus productos y servicios en todas las etapas del ciclo de vida.
- Identificar los puntos críticos en cada eslabón de la cadena de suministro, desde la extracción de las materias primas hasta la fabricación, distribución, uso y fin de vida.

En la Tabla 1-1 se comentaron algunos métodos para evaluar los impactos, en caso de SimaPro encontramos que tienen una estructura la cual se explica a continuación:

Los métodos empleados para evaluar los impactos en SimaPro tienen la siguiente estructura:

- a) Caracterización, referida para el midpoint.
- b) Daños, hace referencia al endpoint.
- c) Normalización.
- d) Ponderación.
- e) Suma.

Los cuatro últimos son opcionales acorde a la norma ISO, es decir, que no siempre van a estar disponibles en todos los métodos.

### **Caracterización**

Las sustancias que contribuyen al impacto se multiplican por un factor de caracterización que expresa la contribución relativa de la sustancia, es decir, en el caso de evaluar el impacto del cambio climático se utiliza el CO<sub>2</sub> equivalente, para ello, por ejemplo, en el caso del óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) se multiplica por 273, lo que quiere decir que 1 kg de N<sub>2</sub>O equivalen a 273 kg de CO<sub>2</sub> eq.

En el caso de SimaPro se pueden especificar los subcompartimentos para cada sustancia, permitiendo crear métodos de evaluación más detallados ya que se utilizan factores más específicos para cada subcompartimento. Sin embargo, cuando se define un compartimento en que se encuentra una sustancia, pero el método no tiene definido el factor correspondiente, SimaPro lo refleja cómo *no especificado*.

### **Daños**

El fin de evaluar los daños es utilizar los factores de punto medio o de punto final de forma que se combinan los indicadores de la categoría de impacto en una categoría de daño o dicho de otra forma área de protección.

Cuando se evalúan los daños se añade un paso más en el mecanismo de forma que se puede medir el impacto de punto final, permitiendo así tener una unidad común y sumarla.

### **Normalización**

Hay muchos casos en los que se pueden reflejar los resultados a partir de un valor de referencia, es decir, se divide la categoría entre la referencia; aunque, hay muchas opciones, una muy común es la carga ambiental del país entre el número de habitantes, aunque hay completa libertad a la hora de elegir la referencia siempre y cuando sea coherente. El empleo de normalización puede ser realmente interesante ya que permite comunicar los resultados de forma que sea cual sea el público se entiendan, ya que se compara el LCA con algo que cualquiera puede imaginar.

La normalización facilita bastante la comparación de los indicadores de impacto ya que todos tienen la misma

unidad, además de que se puede aplicar tanto a la caracterización como a la evaluación de daños.

### **Ponderación**

Hay métodos que permiten ponderar las categorías de impacto, es decir, estas son multiplicadas por factores de ponderación, habiendo normalizado previamente o no. En el caso de SimpaPro hay distintos conjuntos de ponderación posibles, los cuales siempre están combinados con uno de normalización.

### **Suma**

Se trata de la última opción posible dentro de los métodos de evaluación; permite obtener todos los indicadores en una sola puntuación.

Aunque los métodos de evaluación cada vez son más completos y tienen más variedad de sustancias, no tienen toda la información acerca de las sustancias del inventario, siendo esto un problema ya que puede que no incluyan las materias primas (por ejemplo) en la categoría de impacto. Además, pueden surgir problemas al incorporar una sustancia nueva que no está incorporada en el método o si se utilizó un sinónimo.

Ante esto SimaPro tiene integrada una verificación de forma que indica que sustancias no están incluidas en el método y en los resultados, aquellas sustancias y su cantidad correspondiente que no se han incluido se muestran a parte.

#### **1.4.5.1.1 Categorización**

Actualmente SimaPro puede agrupar los métodos en cinco categorías:

- Global, en este caso se trata de métodos que tienen alcance global, interesa para casos donde los estudios son de una cadena de valor global.
- Norteamericana, son métodos desarrollados en América.
- Europea, se incluyen aquellos métodos que están centrados en el contexto europeo.
- Único tema, incluyen todos los métodos que se enfocan en una métrica o un solo área de impacto menos el agua.
- Huella hídrica, solo están aquellos métodos donde se estudian los impactos en relación con el agua.

Aunque en la Tabla 1-4 se indican todos los métodos que se encuentran en cada una de estas seis categorías, sobre todo se va a desarrollar la categoría europea y el método a utilizar dentro de esta categoría.



Tabla 1-4. Métodos que se encuentran en las categorías.

Global	Norteamericana	Europea	Único Tema	Huella Hídrica
IMPACT World+ LC-IMPACT ReCiPe 2016	BEES	CML-IA Costes medioambientales Escasez ecológica 2021 Huella Ambiental 3.1 (EF 3.1) EN 15804+A2 EPD (2018) EPS 2015d y EPS 2015dx	Demanda de Energía acumulada Demanda de energía acumulada (LHV) Demanda de exergía acumulada Eutrofización de agua fresca IPCC 2021 Impactos en la biodiversidad por el uso de tierra Selección de resultados LCI USEtox	AWARE WAVE (Water Scarcity, 2014) Escasez de Agua 2011, 2012

Teniendo en cuenta la ubicación y situación en las que nos encontramos actualmente se ha visto que la mejor opción y la más interesante es trabajar con las categorías europeas. Entre las distintas opciones indicadas en la Tabla 1-4, se ha decidido emplear la Huella Ambiental 3.1 la cual se desarrolla a continuación.

### **Huella Ambiental 3.1**

La base de datos de la Huella Ambiental está diseñada para admitir el uso de reglas de categoría de huella ambiental de producto y reglas sectoriales de la organización. Se trata de una base de datos cuyo desarrollador es la Comisión Europea, siendo parte de la iniciativa del Mercado Único para Productos Verde (PRé Sustainability 2023).

El desarrollo de esta base datos surge a raíz de que las empresas desean comercializar un producto que dentro de la UE que sea respetuoso con el medio ambiente, y debido a la existencia de gran variedad de métodos e iniciativas, la mayoría de las veces se obtenía una evaluación poco fiable; debido a esto las empresas no podían tomar una decisión acertada para la mejora ambiental, además que tampoco era claro para los consumidores.

Es por ello por lo que en diciembre de 2021 la Comisión Europea desarrolló una Recomendación revisada sobre el uso de métodos de huella ambiental (Director general de Medio Ambiente 2021), permitiendo a las empresas hacer sus cálculos respecto a una base de datos fiable, verificable y comparable; asimismo otros usuarios como son administraciones públicas, ONG... pueden acceder a esta información. El centro de investigación de la Comisión Europea se ha encargado de impulsar los avances científicos y técnicas de forma que se garantiza solidez e imparcialidad (Comisión Europea 2023).

Esta base de datos nos permite utilizar datos de alta calidad, que son adquiridos y respaldados por la Comisión Europea para la huella ambiental en gran variedad de sectores. Además, incluye la huella ambiental de los productos europeos medios de forma que se puede comparar la huella ambiental del producto con el promedio y ver cómo se desempeña el producto en comparación al promedio europeo.

Otro hecho interesante en esta base datos, se pueden identificar los contribuyentes más importantes para el desempeño ambiental de producto (PRé Sustainability 2023).

## 2 OBJETIVOS Y ALCANCE

---

El objetivo de este trabajo de fin de máster es documentar los diferentes métodos de asignación para el reciclaje en normas y documentos de orientación del ciclo de vida de los productos. Se han evaluado tres métodos, metodología Consecuencial, APOS y Cut-off.

El objetivo principal ha sido comprender, comparar y evaluar los distintos métodos de asignación y así posicionarse sobre qué método sería mejor opción, así como identificar aplicaciones y limitaciones de cada uno, a la hora de realizar un análisis de ciclo de vida del producto cartón ondulado reciclado desde la cuna a la cuna en distintas situaciones, cuyo objetivo del ACV puede ser la toma de decisiones internas o, comunicaciones externas. La elección de un método u otro es realmente importante ya que cada uno de ellos puede llevar a distintos resultados y conclusiones.

Para el estudio se ha utilizado la herramienta de SimaPro con la base de datos de Ecoinvent aplicando la metodología para evaluar impactos de la huella ambiental 3.1 siendo la recomendada por la Unión Europea.

# 3 METODOLOGÍA PARA ASIGNAR EMISIONES

SimaPro contiene la base de datos Ecoinvent, donde se cubren más de 10 000 de distintos procesos, como, por ejemplo, obtención de la electricidad de alto voltaje, o el tratamiento de residuos, entre otros. Esta base surge del esfuerzo entre distintas instituciones suizas para mantenerla actualizada (Goedkoop et al. 2016).

En la Figura 3-1 se muestran estas organizaciones implicadas en el desarrollo de la base de datos Ecoinvent.

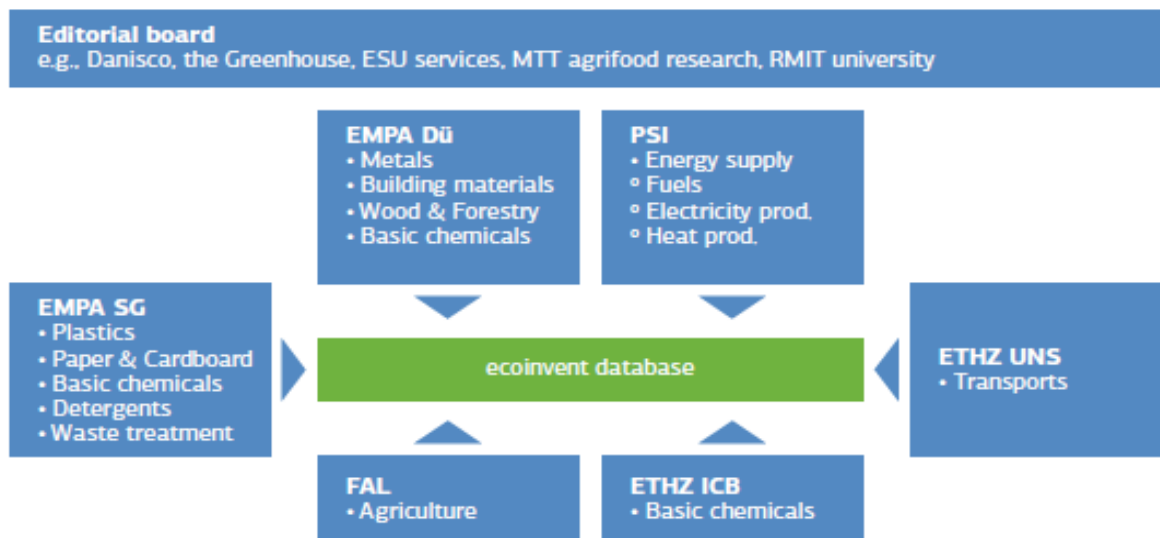


Figura 3-1. Organizaciones suizas que forman ecoinvent (Goedkoop et al. 2016)

En el software los datos pueden aparecer agrupados por procesos de sistema o procesos unitarios, siendo las diferencias entre una forma u otra las siguientes:

## Procesos unitarios

- El árbol de proceso permite rastrear la contribución de los procesos unitarios individuales
- Aporta información sobre la incertidumbre e incluso analizarlos
- Cálculo relativamente lento

## Procesos de sistemas

- Árbol de procesos es sencillo
- Sin información acerca de la incertidumbre
- Cálculo más rápido

Esto da pie a los casos de estudio de este trabajo de Fin de Máster, todos ellos se han estudiado como procesos unitarios tal y como los define SimaPro.

Hay que tener en cuenta de que el producto a estudiar se trata de un material reciclado, es por ello por lo que la hora de evaluar las tres metodologías para considerar cual sería más conveniente aplicar teniendo en cuenta el objetivo del ACV, resulta interesante tener en cuenta el ‘punto de vista’ de la Comisión Europea, es decir, a la hora de evaluar los resultados obtenidos se debe considerar lo siguiente: (Göteborg 2014):

- Si incentiva al uso de material reciclado, lo debe hacer siempre y cuando el proceso de reciclaje incluyendo la recolección, tenga menos impacto que el proceso virgen.
- Da incentivos a la recogida para reciclaje de materiales.
- Muestra diferencias entre productos en el estante.

Esto mencionado es importante, pero no se puede olvidar la visión industrial a la hora de hacer estudio, donde se deben plantear cuestiones como las siguientes:

- Aplicabilidad.
- Cuál es el cuello de botella del análisis de ciclo de vida de mi producto.
- Donde se puede mejorar.

Teniendo en cuenta esto, se pueden llevar a cabo dos posibles enfoques: **consecuencial** (CLCA en adelante) y **atribucional** (ALCA). Pero antes de explicarlos, hay que tener en cuenta ciertos los siguientes criterios.

Un buen método debe ser *factible, preciso, comprensible, inspirador y robusto* (Ekvall et al. 2020):

- ❖ **Factible**, el método se debe usar, cuanto más se utilice más resultados dará. Se llevarán a cabo más evaluaciones en función de la utilidad de resultados, sin embargo, también influye cómo de fácil es cómo aplicar los métodos y el coste de estos. Un método es más rentable y más interesa cuanto más pueda generalizarse y utilizarse en distintas situaciones, es decir, se busca que sea fácil y barato a la hora de llevarlo a cabo y generar resultados y conclusiones que se puedan generalizar.
- ❖ **Preciso**, a menudo la evaluación ambiental se hace para guiar una decisión específica y es necesario que los resultados guíen hasta un resultado positivo. Es por ello que el método ideal es aquel que genera unos resultados lo más completos, exactos y precisos dentro de lo posible.
- ❖ **Comprensible**, si el método empleado es preciso no sólo ayuda a llevar a cabo acciones deliberadas en el momento si no que, además, genera un impacto positivo en las decisiones futuras. Es por ello por lo que se necesita que el método debe ser transparente, fácil de entender y que los resultados sean fáciles de transmitir y entender, siendo este detalle el más desafiante a la hora de hacer este tipo de estudios, debido a que si el estudio es muy completo y complejo a nivel conceptual es poco útil ya que dificulta la toma de decisiones.
- ❖ **Inspirador**, cuando se realiza un estudio ambiental como es el caso del análisis de ciclo de vida, es necesario que la información y el conocimiento generados se puedan convertir en acciones.
- ❖ **Robusto**, es decir, es necesario que se obtengan los mismos resultados independientemente de quien los aplique. Para esto, es necesario que el usuario no tenga que hacer suposiciones o elecciones mientras emplea el método, ya que estas van a afectar en los resultados pudiendo provocar que una evaluación ambiental positiva resulte negativa o viceversa. Una forma de garantizar esta robustez es desarrollando unas pautas muy detalladas sobre cómo aplicar el método, garantizando así una buena aplicación de este.

Ambas opciones cumplen los siguientes criterios en mayor o menor grado, pero ninguno cumple todos los aspectos para tener en cuenta, a pesar de ello, puede ser una buena forma de decidir cuál utilizar según cada situación.

Esta diferenciación surge en 1990, sin embargo, no es hasta 2001 donde se emplean los términos de atribucional y consecuencial. A lo largo del tiempo han surgido numerosas definiciones para ambos métodos, pero las más utilizadas son las desarrolladas por Finnveden et al. 2009:

- Consecuencial, el objetivo es describir cómo cambian los flujos que son ambientalmente interesantes como respuesta a las decisiones tomadas
- Atribucional, se tiene como objetivo el describir los flujos físicos que son medioambientalmente importantes hacia y desde un ciclo de vida y sus subsistemas.

Se podría decir que se trata de un enfoque orientado al cambio frente a uno orientado a la descripción.

Según indica Finnveden et al. 2009 el enfoque consecuente se puede utilizar para la toma de decisiones, sin embargo, no es lo recomendado cuando entre este y el atribucional hay poca diferencia o si hay más incertidumbres que conocimientos en el resultado; esta opinión es apoyada por Weidema 2003, quien además argumenta que el consecuente interesa más cuando se busca dar más valor a la cadena de productos e identificar cuáles son los procesos más importantes a mejorar.

Por otro lado, Ekvall, Tillman y Molander 2005 indican que si el fin del estudio es el aprendizaje ambos enfoques son iguales de válidos; siendo el consecuente interesante para evaluar las consecuencias de las distintas decisiones o reglas individuales mientras que el atribucional puede resultar más interesante cuando se quiere evitar las conexiones entre sistemas a la hora de evaluar los impactos.

Como se puede ver, el elegir un LCA u otro depende no solo de las opciones metodológicas del LCA sino también con el objetivo de estudio, ya que un ALCA estudia cuánto del impacto ambiental pertenece al objeto de estudio mientras que un CLCA analiza cómo se ve el impacto ambiental afectado por la producción y uso que tiene el objeto de estudio.

Es por ello por lo que la elección de uno u otro afecta a los límites del sistema a estudiar, ya que, por ejemplo, si el sistema a estudiar tiene más de un tipo de producto cuando se habla de CLCA se debe tener en cuenta cómo cambia el proceso en caso de que haya un cambio en uno de los productos y esto afecta al resto de producto, debe expandirse para incluir dicho cambio. Sin embargo, en un ALCA no se incluyen consecuencias indirectas que pueden surgir fuera del ciclo de vida que se estudia, es más, el uso de materias primas, las emisiones en sistemas de coproducción se suelen dividir entre los distintos productos del proceso. Además, el emplear un enfoque u otro también influirá en las otras partes de un LCA, como es la unidad funcional, elección de métodos LCIA, etc.

Otro factor a tener en cuenta es que cuando se estudian las consecuencias ambientales debido a una decisión, estas dependen de muchos mecanismos ambientales, tecnológicos y económicos, dando lugar a que sea necesario que una persona sea experta en muchos ámbitos. Es por ello por lo que un LCA consecuente (para que sea lo más completo posible) se desarrolla no solo por una combinación de herramientas sino también por una combinación de expertos. Es más, Ekvall 2000 creó un listado para hacer frente a un modelado tan complejo:

- 1) Hacer una lista de consecuencias previsible.
- 2) Discutir qué consecuencias pueden ser cuantificadas (teniendo en cuenta tanto los costos como los beneficios)
- 3) Identificar las herramientas correctas para hacer el análisis y cuantificar bien los cambios.
- 4) Crear una red de expertos que sepan manejar cada una de las herramientas a utilizar.
- 5) Estudiar las consecuencias

Además, hay que añadirle la posibilidad de hacer suposiciones o decisiones erróneas, que afecten a los resultados.

Ante esta situación, Guinée y Lindeijer 2002 plantean estas tres cuestiones para elegir un enfoque u otro, en función de las decisiones a tomar:

- 1- Elecciones ocasionales, cumplen una única función
- 2- Estructurales, la función se suministra regularmente
- 3- Estratégica, se debe cumplir una función un largo periodo de tiempo y de forma indefinida

En función de esto, se puede elegir entre atribucional o consecuencial.

Una vez se ha elegido el enfoque del LCA, la siguiente decisión a tomar es la elección de la metodología que se va a llevar a cabo. Acorde a los que nos indica Ekvall et al. 2020 existen alrededor de 12 posibles métodos a utilizar cuando se habla de reciclaje como es el caso de este proyecto, que son los siguientes:

- Simple Cut-off.
- Cut-off with economic allocation.
- Cut-off plus credit.
- Allocation to material losses.
- Allocation to virgin material use.
- 50/50 methods.
- Quality-adjusted 50/50 methods.
- Circular Footprint Formula.
- Market priced- based allocation.
- Market price- based substitution.
- Price-elasticity approaches.
- Allocation at the point of substitution.

En la Tabla 3-1 se puede ver quien recomienda cada uno de estos métodos y otros nombres con los que se pueden encontrar.

Tabla 3-1. Distintos métodos para asignar emisiones según la metodología Atribucional

Método	Nombre Alternativo	Quién lo recomienda
Simple Cut-off	Recycled content approach 100/0 method	International EPD system PAS 2050 Greenhouse Gas Protocol
Cut- off with economic allocation	-	Dutch Handbook on LCA
Cut-off plus credit	Module D	ISO 21930:2011 EN 15804:2012+ CEN/TR 16970:2016 EN 16485:2014
Allocation to material losses	Close- Loop approximation 0/100 method End-of- life approach Recyclability substitution Value of scrap approach	ISO 14044:2006+ ISO TR 14049:2012 ISO 1406:2018 ISO 20915:2018 PAS 2050:2011 Greenhouse Gas Protocol WorldSteel Association International StainLESS- Steel Forum
Allocation to virgin material use	100/0 method	-
50/50 methods	-	Nordic Guidelines on LCA Ekvall 2000
Quality-adjusted 50/50 methods	UBA approach	German requirements on LCA of beverage packing Allacker et al. 2017
Circular Footprint Formula	PEF approach	Product Environmental Footprint Guide
Market priced- based allocation	Open- loop procedure	ISO 14067:2018
Market price- based substitution	-	Schrijvers, Loubet y Sonnemann 2016
Price-elasticity approaches	Market- based modeling	Ekvall 2000
Allocation at the point of substitution	APOS	Ecoinvent

De todos ellos en este Trabajo de Fin de Máster se van a estudiar los que SimaPro tiene integrados siendo Cut-off, Allocation at the point of Substitution (APOS) y se aplicará el enfoque consecuencial. Hay que resaltar que más adelante se va a explicar una metodología desarrollada por la Comisión Europea, aunque no se va a llevar a cabo debido a la falta de datos para poder aplicarla.

### 3.1 Cut off

Es el enfoque más sencillo cuando se habla de reciclaje: a cada producto se le asignan las cargas ambientales de los procesos en el ciclo de vida. El desafío más importante establecer los límites entre los ciclos de vida; es decir, el límite puede ser antes, dentro o después del reciclaje.

En esta metodología no se incluye ningún proceso más allá de su vida útil. Es por ello por lo que esta metodología se corresponde con un ALCA, ya que se busca identificar la participación y cargas ambientales que pertenecen al sistema del producto, esta metodología suele incentivar al uso de materiales reciclados y al reciclaje del producto tras usarlo.

Si se evalúa el método por los criterios anteriores, se encuentra lo siguiente:

- Es fácil de usar, a cada producto se le asignan las cargas ambientales de los procesos en el ciclo de vida de ese producto y no es necesario tener información acerca de los procesos más allá del ciclo de vida ya que no se van a tener en cuenta.
- Hay disponibilidad de datos al no requerir información sobre los procesos más allá del ciclo de vida del producto, por ejemplo, los datos acerca de la eliminación del producto o el producir materiales vírgenes no son necesarios si no están incluidos en el proceso.
- Se obtienen resultados generales ya que mantienen independientemente de cuál sea el contexto en el que se evalúa.

Sin embargo, aunque se distinga entre material virgen y reciclado, o los distintos destinos como es el reciclaje, recuperación energética y/o eliminación no lo hace en el nivel que alguien con experiencia puede esperar al determinar las consecuencias. Además, aunque el método habla de las diferencias ambientales no lo hace acerca de la calidad de los materiales, por ejemplo, cuando se habla de material reciclado el método permite evaluar el impacto ambiental de este, sin embargo, no va a indicar si dicho material es de mejor, igual o peor calidad que el material obtenido a partir de materias primas vírgenes.

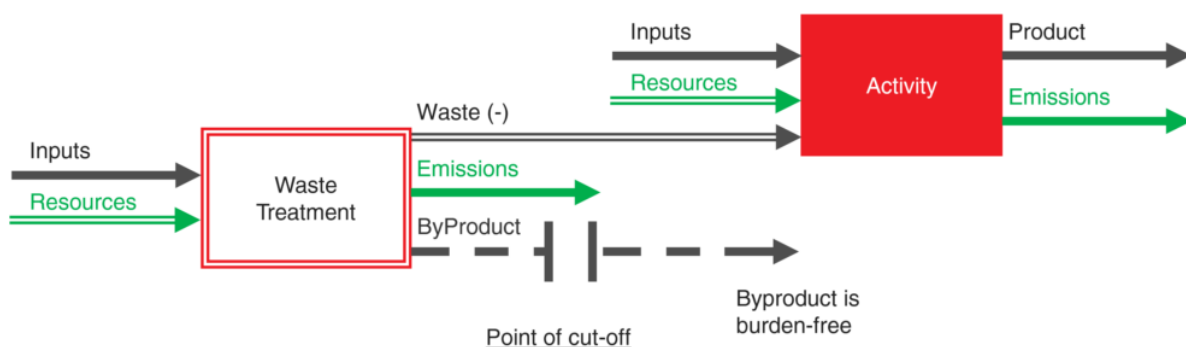


Figura 3-2. Metodología Cut-off («System Models - ecoinvent» 2020)



### 3.2 Allocation at the point of substitution

Este método es utilizado y diseñado especialmente para aquellos residuos que se exponen a una revaloración, es decir, se utilizan para obtener energía, se reciclan y convierten en otros productos.

En este método cuando se habla de residuos que se reciclan, se aplican los mismos factores de asignación a quien generan los residuos, como al proceso de reciclaje y a la disposición de los residuos que no se reciclan (Wernet et al. 2016). Se puede decir que parte del impacto se aplica al producto de la actividad que genera los residuos y el resto al material reciclado. Por regla general se hace asignación económica a partir de los ingresos del producto y del material reciclado, pero existe la posibilidad en la que el precio no represente el valor real del producto. Además, hay que tener en cuenta que los productos por regla general son más caros que el material en sí, por ello cuando se hace asignación económica la parte del material reciclado suele ser muy pequeña.

Pero existe la posibilidad de que el material reciclado sea un residuo post-consumo, por lo que se supone que el generar los residuos es parte del ciclo de vida del producto reciclado y la asignación se lleva a cabo entre ese producto y el material reciclado. Es decir, cuando se lleva a cabo la asignación se incluyen las cargas vírgenes de producción del material, además de, fabricación y uso del producto que se recicla tras ser usado dando lugar a que el material reciclado pueda tener más carga ambiental de la que debería, es más Williams y Eikenaar 2022 verifica esto en su estudio comparando los metales reciclados frente a los mismos metales vírgenes.

Si se evalúa el método por los criterios anteriores, se encuentra lo siguiente:

- No se trata de un método fácil de usar, ya que por ejemplo es muy complejo de modelar cuando los materiales de entrada provienen de distintos productos y estos tienen distintas etapas de producción, uso, etc.
- Respecto a la disponibilidad de los datos, este criterio tampoco se cumple ya que al asignar las cargas se incluyen la fabricación de materiales vírgenes, producción y uso del producto dando lugar a que el material reciclado tenga cargas ambientales que no le corresponden. Sin olvidar que en la mayoría de los casos no es fácil disponer de toda esa información.
- En lo que respecta al criterio de generalización de los resultados, se cumple con dicho criterio ya que independientemente del contexto en el que se evalúe los resultados no varían.
- Por último, en lo que respecta la toma de decisiones, se puede decir que cumple parcialmente este criterio. Es cierto que diferencia entre material virgen y reciclado, los distintos recursos recuperados y en la calidad de los materiales, pero, tiene en consideración procesos más allá del ciclo de vida del producto, aunque no más allá del ciclo de vida del material. Estas diferenciaciones permiten determinar las consecuencias ambientales del reciclaje a una persona experimentada, pero al tener en cuenta la fabricación del producto y su uso, en caso de que estas tengan mucho más impacto ambiental que la producción del material, puede darse la situación del material reciclado tenga mayores cargas que el virgen.

Este método al igual que el *Cut-off* encaja con un enfoque ALCA al no implicar procesos evitados ni procesos más allá de los límites del ciclo de vida, pero como se ha mencionado antes, parte de la fabricación y uso del producto se asigna al material reciclado por lo que este último puede llevar más cargas ambientales sin estar relacionadas con la fabricación del material, incluso dando lugar a que tenga más cargas que el material virgen incentivando a no emplear material reciclado aun cuando una alta tasa de reciclaje es buena para la sociedad

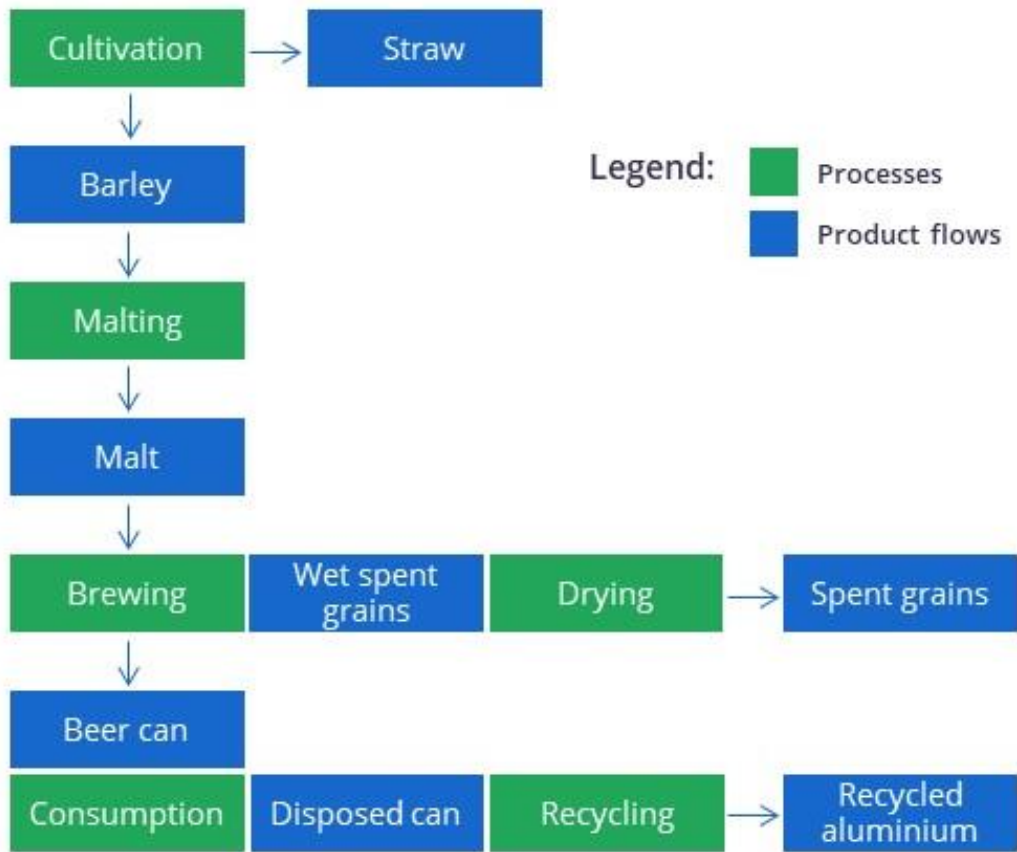


Figura 3.3. Metodología APOS (Williams y Eikenaar 2022)

### 3.3 Circular Footprint Formula ó Fórmula de Huella circular

Se trata de un método que aplica la Comisión Europea para integrar los distintos enfoques de asignación al final de la vida útil, combinándolas con las características específicas tanto del material como del mercado. En la fórmula se dividen los beneficios y cargas del reciclaje entre el que emplea el material para reciclar y el que ha producido ese material que se termina reciclando, es decir, parte de los beneficios y cargas del reciclaje se atribuyen a ese producto que se fabrica a partir del material reciclado, sucediendo igual en los procesos de eliminación y valorización del material (sobre todo al hablar de recuperación energética) Sin embargo, si el destino final del producto es el vertedero o se incinera sin tener una valorización energética las cargas se atribuyen sólo al producto (Williams y Eikenaar 2022; Comisión Europea 2021).

Es decir, se consideran tres materiales: los vírgenes/ primarios, los reciclados/ secundarios utilizados para la fabricación y por último el material reciclado que resulta del proceso tras reciclar un producto (Batlle Bayer 2021). De forma que se dividen las cargas en tres, siendo las indicadas en color naranja, verde y azul en la Figura 3-4.

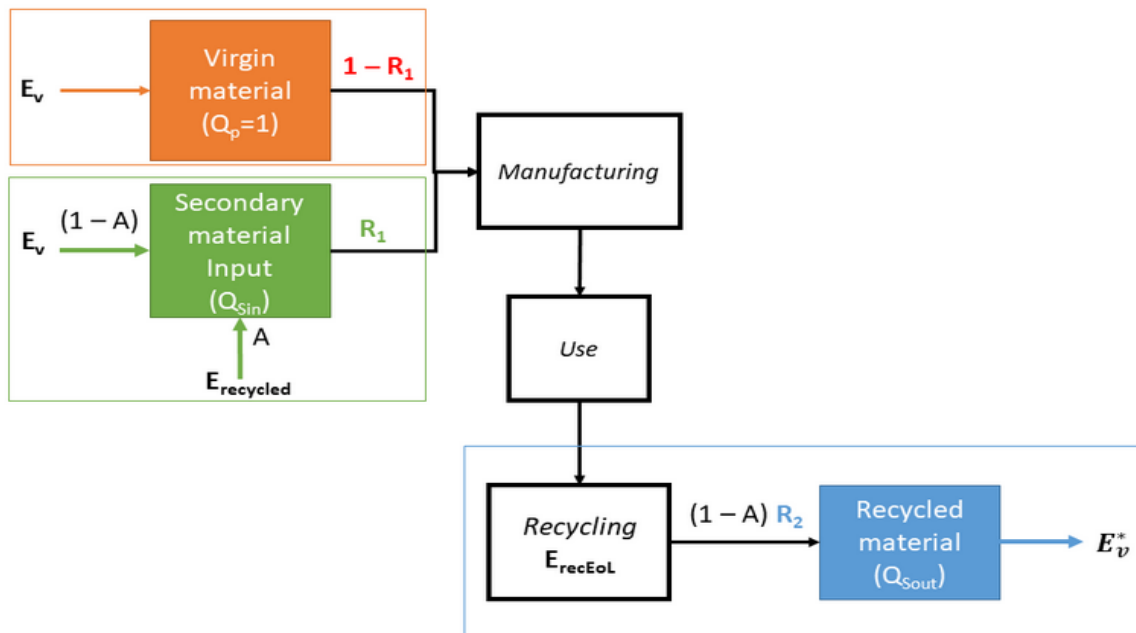


Figura 3-3. Metodología CFF (areco 2021)

La parte Naranja hace referencia a las emisiones y recursos utilizados para obtener las materias primas vírgenes.

La verde, es consecuencia de restar las emisiones del material reciclado y las del material virgen que ha sido sustituido por el material reciclado.

Y la parte azul, hace referencia a las emisiones y recursos que se han empleado para adquirir el material virgen que es sustituido por los materiales reciclables.

Es decir, se deben considerar los impactos asociados a obtener materias primas tanto vírgenes como recicladas y restar parte de los impactos del material virgen que se sustituye por el material reciclado en el producto y por el material reciclable que se obtiene tras el fin de su vida útil.

$$\text{CFF}_{\text{RPCs}} = \underbrace{(1 - R_1) \times E_v}_{\text{Amount of virgin material}} + \underbrace{R_1 \times \left( A E_{\text{recycled}} + (1 - A) E_v \times \frac{Q_{\text{sin}}}{Q_p} \right)}_{\text{Amount of secondary (recycled) material input}} + \underbrace{(1 - A) R_2 \times \left( E_{\text{recEoL}} - E_v^* \times \frac{Q_{\text{sout}}}{Q_p} \right)}_{\text{Amount of secondary material output}}$$

Figura 3-4. Fórmula CFF(areco 2021)

Como se puede ver en la Figura 3-5 hay cinco parámetros importantes:

- A, es el factor de asignación de cargas y créditos entre el reciclaje y el material virgen, es decir, entre el proveedor y el que usa el material reciclado. Tiene un valor entre 0,2 y 0,8.
- R1, es la proporción de materia prima que se recicla.
- R2, es la proporción de producto que se va a reciclar.
- Ratios de calidad ( $Q_{\text{sin}}/Q_p$  y  $Q_{\text{sout}}/Q_p$ ) donde se consideran la calidad de los materiales reciclados entrantes y salientes.

La Comisión Europea da unos valores por defecto, sin embargo, para el producto estudiado que es cartón reciclado no se encuentran aún definidos estos parámetros por lo que de momento no se puede aplicar.

# 4 CASOS DE ESTUDIO

---

En este trabajo de fin de máster se va a estudiar el ciclo de vida del cartón reciclado, alcance de la cuna a la cuna por ello antes de aplicar las distintas metodologías para asignar emisiones, se va a explicar el proceso.

El ciclo de vida del cartón, y en base alcance definido consta de las siguientes etapas(Legro 2023a); (Legro 2023b):

- 1- Recolección y clasificación.
- 2- Triturado y pulpeado.
- 3- Destintado.
- 4- Blanqueado.
- 5- Repulpeado y refinado.
- 6- Formación de la hoja
- 7- Prensado.
- 8- Secado.
- 9- Recubrimiento
- 10- Corte y acabado.

## ***Recolección y clasificación***

El primer paso en el reciclaje es recolección y clasificación; normalmente, es recogido por empresas de gestión de residuos y es transportado a una instalación de reciclaje. Una vez llega a la instalación, es clasificado según la calidad y grosor:

- Corrugado: es el más común en embalajes y envíos, tiene una o más capas intermedias onduladas de forma que tiene más resistencia y durabilidad.
- Compacto: es más delgado y suele utilizarse en bienes de consumo como son los cereales, cajas de zapatos, etc.
- Cartoncillo: es el más delgado de los tipos de cartones, se puede encontrar en los rollos de toalla de papel, cajas de pizzas, entre otras opciones.
- Couché: está recubierto por una cara o incluso ambas con papel satinado brillante, dándole cierta apariencia de elegancia. Cada vez se emplea más en el packging.

Una vez clasificado se compacta en balas y se envía a una fábrica de reciclaje para su procesamiento, aunque hay casos especiales que son llevados a otro proceso debido a su modo de fabricación o uso, como sería cuando están en contacto directo con los alimentos.

## ***Triturado y pulpeado***

Para llevar a cabo el pulpeado es necesario triturar previamente el cartón en pequeños trozos y mezclarlo con agua para crear una suspensión. Posteriormente se calienta y agita dicha suspensión de forma que se descomponen las fibras de cartón y se crea una pulpa similar, tanto en propiedades químicas como físicas, a la que se obtiene a partir de los árboles.

Hay que tener en cuenta que dicha pulpa puede contener impurezas y contaminantes, como es el pegamento, los cuales hay que eliminar del proceso. Después se tamiza para eliminar los residuos restantes y refina para generar una textura uniforme.

### ***Destintado***

La pulpa se destinta para eliminar los pigmentos del cartón, para lo que se agregan productos químicos (agua oxigenada, ozono...)(Sanz Tejedor 2023). Mientras se agita la pulpa, se descompone la tinta y se separa de las fibras, siendo necesarios tamices y centrifugadoras para llevarlo a cabo.

### ***Blanqueado***

Una vez se destintada la pulpa, se blanquea para tener un color uniforme y eliminar cualquier resto de impureza que pueda quedar. Para estos se necesitan más productos químicos (agua oxigenada o hidrosulfuro sódico) y agitarla de nuevo.

### ***Repulpado y refinado.***

Es la etapa final del proceso del reciclaje. La pulpa se mezcla con agua, otros aditivos como el carbonato cálcico, silicato sintético, dióxido de titanio, talco, almidón, caolín (arcilla), latex, fungicidas para evitar la aparición de mohos, y pulpa virgen para dar más resistencia al producto. La combinación de ellos da lugar a una suspensión (Sanz Tejedor 2023)

### ***Formación de la hoja***

La suspensión anterior se alimenta a una mesa de formación, que tiene una malla o tamiz para retener las fibras de la pulpa. Conforme se elimina el agua, las fibras se van comprimiendo y formando una hoja.

### ***Prensado.***

Una vez se tiene la hoja, se coloca en una prensa de rodillos de forma que se elimina el exceso de agua y aumenta su densidad. A este nuevo producto se le denomina cartón húmedo y se transporta hasta la siguiente etapa por una cinta.

### ***Secado.***

Tras el prensado la hoja se transporta hasta una máquina de secado, un horno donde se seca a altas temperaturas y con aire. La hoja pasa por varios rodillos donde se va secando de forma gradual hasta que alcanza la humedad deseada.

### ***Recubrimiento.***

Esta etapa es opcional, se aplica una capa de estuco de forma que se hace la superficie más suave y resistente. Para lo que se aplica una capa de yeso blanco y agua de cola en una de las caras de la hoja, o incluso en ambas.

El estuco puede ser de distintas maneras, todo en función del acabado que se busque; puede ser brillante, mate, satinado...

### ***Corte y acabado.***

Es la última etapa, la hoja se corta en las dimensiones deseadas en función del uso. Para lo que se emplean cuchillas de alta precisión que permiten cortar la hoja de forma uniforme y precisa.

En función del tipo de cartón se le da un acabado u otro, es decir, se puede incluir un estampado, laminación, perfilado...

Una vez conocido el proceso, se procede al estudio de la evaluación de los impactos ambientales de cada metodología de asignación aplicada. A la hora de realizar el estudio se han evaluado dos categorías de impacto:

- Cambio Climático, cuya unidad de medida es tCO<sub>2</sub>eq/ kg de producto.
- Uso del agua, cuya unidad de medida es la privación del agua en m<sup>3</sup>eq/ kg de producto.

Hay que tener en cuenta que a la hora de estudiar cada categoría de impacto para cada metodología aplicada los resultados obtenidos aparecen indicados en un árbol de procesos. En este árbol se verán reflejados todos los procesos relevantes del ciclo de vida que se han considerado a la hora de realizar el estudio, de forma que se representarán como ‘cajas negras’ con distintas entradas y salidas de forma que se represente el proceso/etapa que tiene lugar de forma esquemática. De esta forma se podrán estudiar todas las etapas del proceso de producción del cartón reciclado.

## 4.1 Cambio Climático.

En esta categoría de impacto ambiental todas las entradas y salidas del sistema producen emisiones de gases de efecto invernadero del ciclo de vida del producto estudiado.

Dentro de las consecuencias se incluye el aumento de temperatura global promedio y cambios repentinos en el clima a nivel regional; el cambio climático es un impacto que afecta a escala mundial y está constituido por dos subindicadores (INESCOP 2021):

- Fósil (kg CO<sub>2</sub>eq).
- Biogénico (kg CO<sub>2</sub>eq).

En este proyecto se utilizó el subindicador fósil sin tener en consideración las emisiones biogénicas, obteniéndose los siguientes resultados para cada metodología:

- Metodología Consecuencial se emiten 1,40 kg CO<sub>2</sub>eq/ kg producto.
- Metodología APOS se emiten 0,743 kg CO<sub>2</sub>eq/ kg producto.
- Metodología Cut-Off se emiten 0,74 kg CO<sub>2</sub>eq/ kg producto.

Como se puede observar, para esta categoría de impacto ambiental estudiada la metodología menos favorable según los resultados obtenidos es la Consecuencial ya que es la que produce un mayor impacto con un valor de 1,4 kg de CO<sub>2</sub>eq, seguido de la metodología APOS y, por último, Cut-Off siendo ésta la opción más favorable, aunque en lo que respecta a kilogramos de CO<sub>2</sub> eq no hay mucha diferencia entre esta metodología y la APOS.

A continuación, se analizará cada metodología para entender estos resultados.



### 4.1.1. Método Consecuencial

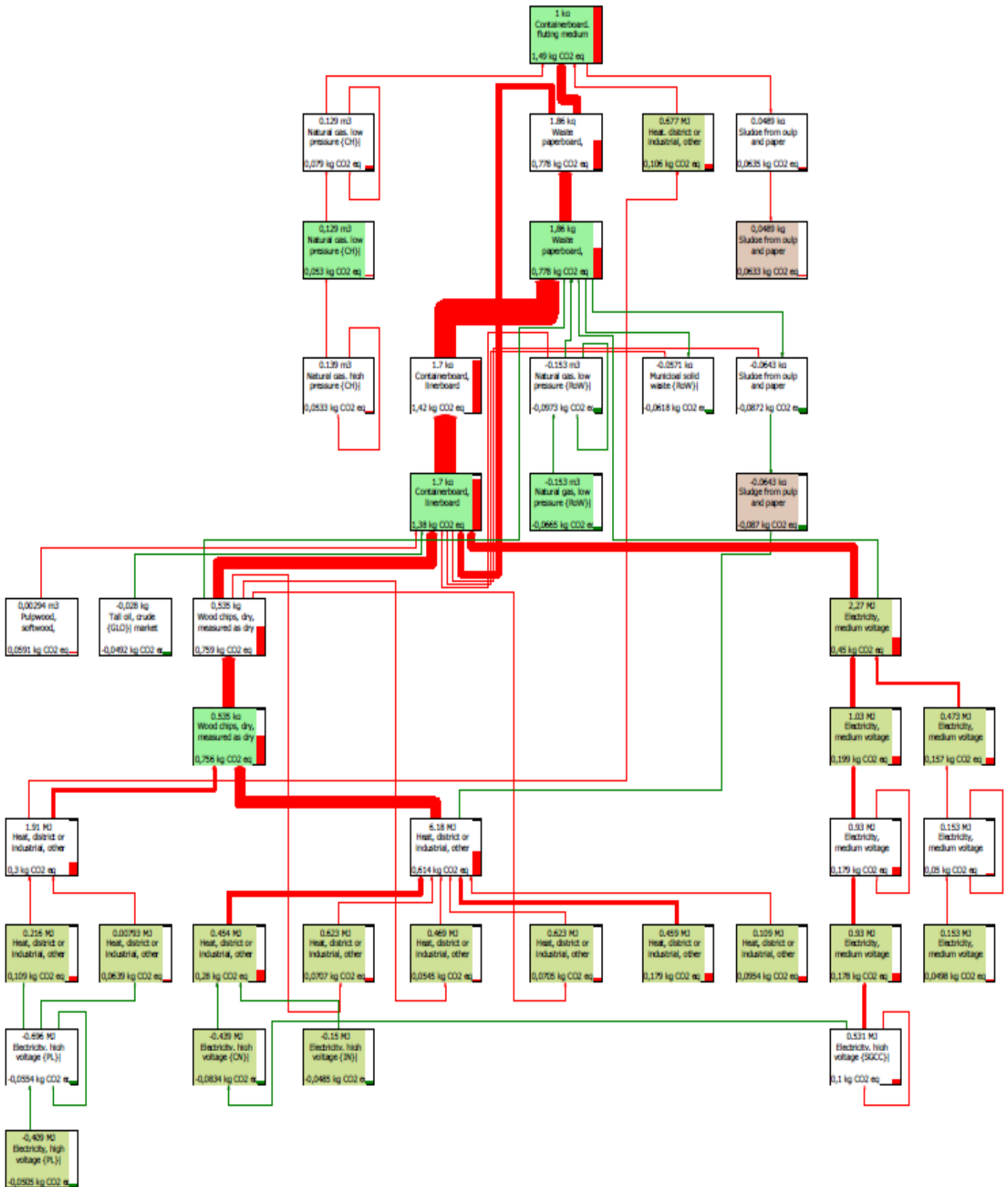


Figura 4-1. Árbol de Procesos de la Metodología Consecuencial para el Cambio Climático

Como se puede ver en la Figura 4-1, para producir un 1 kg de una caja de cartón estriado reciclado se emiten 1,49 kg CO<sub>2</sub> eq

La siguiente Figura (4-2) muestra el árbol de proceso que se obtiene aplicando la metodología consecucional, se representan las etapas que contribuyen al ciclo de vida con un % de corte del 3,2 %. Se puede observar que las principales contribuciones corresponden a: Residuo de cartón clasificado, calor y GN y como salida de dicha producción se tienen lodos.

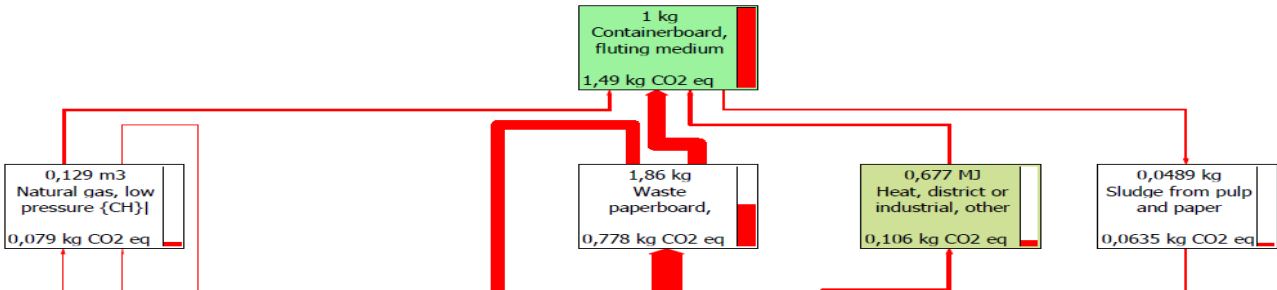


Figura 4-2. Metodología Consecucional (última etapa del ciclo)

Las entradas más interesantes a destacar son el residuo de cartón clasificado, seguido del calor y, por último, el GN; éste último según el diagrama es un proceso lineal (se puede despreciar el pequeño bucle que hace referencia a un autoconsumo en la producción siendo una cantidad mínima respecto a lo que sale) y solo tiene en cuenta la obtención del GN de baja presión y su uso en la obtención del cartón estriado. En cambio, los otros mencionados resultan más interesantes como se verá a continuación:

### Residuo de cartón clasificado:

Esta entrada se trata de datos promedios a nivel Global, por lo que se ha hecho una media de todos los datos disponibles acerca de éste. Luego, si se observan sus entradas y salidas en la Figura 4-3 se encuentra lo siguiente:

- Como corriente de salida se puede ver que parte de ese 1,86 kg de residuo se utiliza en el material virgen del que procede dicho residuo tras ser usado, es decir, se ha tenido en cuenta que para producir ese cartón se necesita parte de material reciclado.

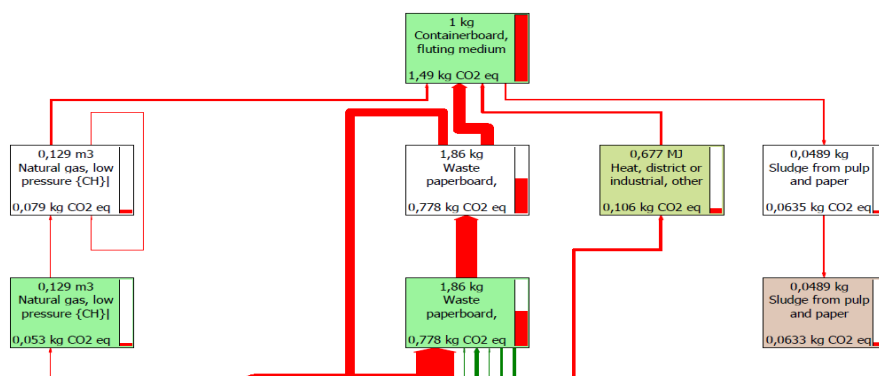


Figura 4-3. Metodología Consecucional (etapa previa al residuo)

- En las corrientes de entradas: residuo de cartón clasificado, como se puede ver en la Figura 4-4 se tiene en cuenta el uso del producto y su fabricación ya que como entrada tiene la caja de cartón obtenida a partir de material virgen que posteriormente es un residuo.

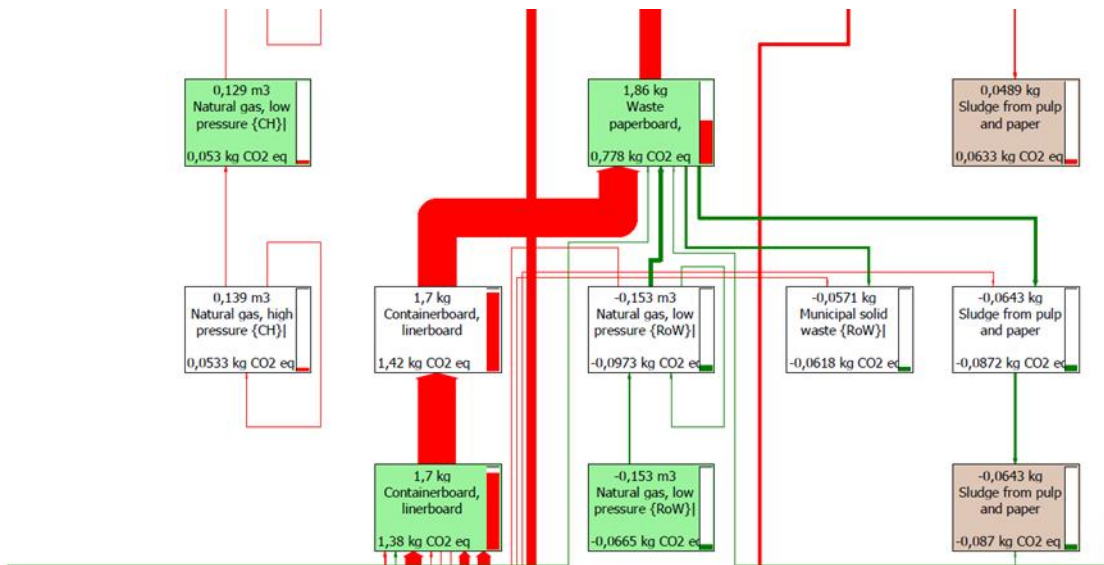


Figura 4-4. Metodología Consecuencial, el residuo de cartón clasificado

Como se observa en la Figura 4-4, la mayor aportación es la de la caja de cartón corrugado, sin embargo, se puede ver como tiene entradas de GN, pero de valores negativos. Es decir, se está teniendo en cuenta que ese residuo se va a utilizar como materia prima para producir cartón, por tanto, se está evitando la utilización de ese GN para fabricar esa caja a partir de material virgen.

Además, como entradas, en menor porcentaje tiene trozos de madera seca y electricidad, pero son de color verde, es decir, se ha evitado su utilización. Se está teniendo en cuenta que al obtener dicho residuo clasificado posteriormente va a ser la materia prima de otro producto y, por tanto, se está evitando el utilizar esa cantidad de electricidad y trozos de madera seca.

Luego, se puede observar cómo tiene salidas negativas, es decir, al hacer ese residuo de cartón clasificado se está evitando generar un residuo municipal y generar el lodo que se formaría si se produjese ese cartón a partir de materias primas.

## Caja de Cartón (RoW)

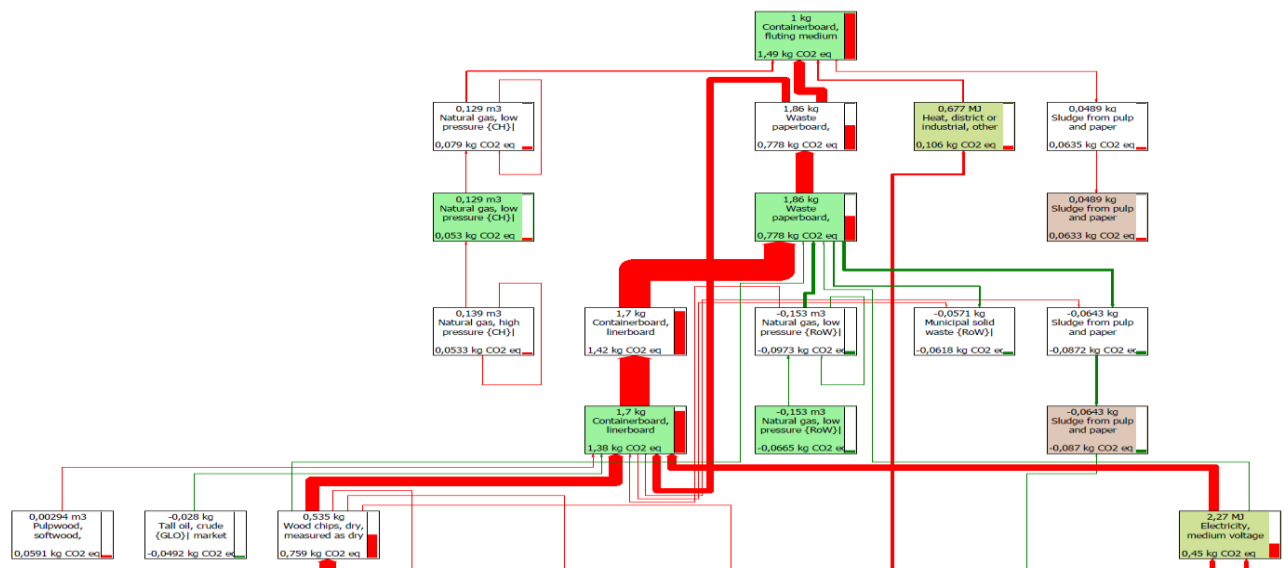


Figura 4-5. Metodología Consecuencia, etapa anterior a la formación del residuo de cartón reciclado

Como se puede observar en la Figura 4-4 y en 4-5 hay una diferencia de emisiones entre la caja de cartón blanca y la verde, SimaPro diferencia por colores en las redes en función de si es un proceso, un transporte, energía, etc. En este caso, el verde representa el producto y el blanco, el producto más otra información; en este caso la diferencia de emisiones es debida a que en el blanco se ha incluido el transporte final mientras que en el verde sólo se tiene en cuenta la fabricación del mismo, la caja de cartón ‘virgen’.

Analizando la caja de cartón de 1,38 kg de CO<sub>2</sub>eq, es decir, la caja de cartón virgen, se puede ver que tiene las siguientes entradas:

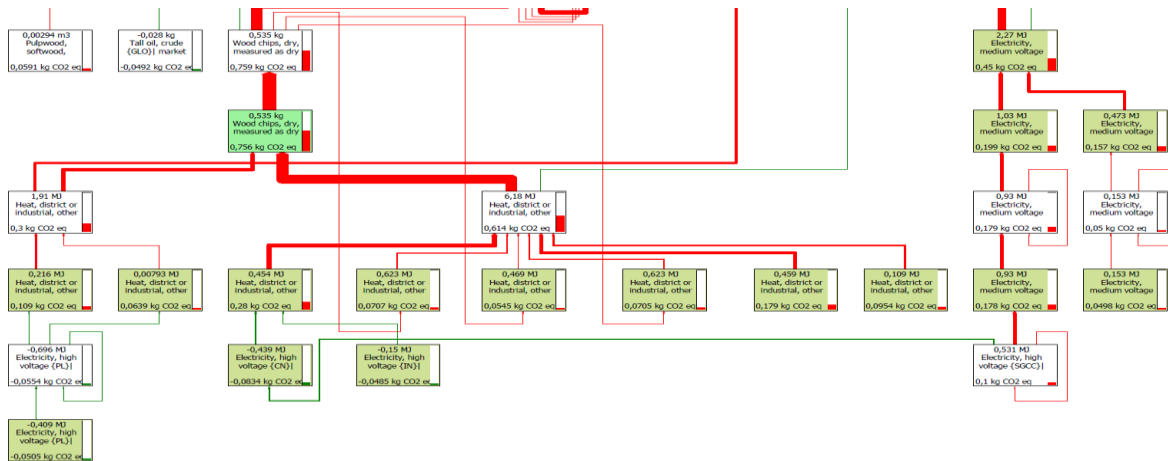
- Madera para la pasta del papel.
- Trozos de madera seca, siendo la entrada mayoritaria.
- Residuo de cartón, es decir, se está considerando que parte del residuo que se obtiene al final también es necesario para la fabricación del material virgen, hay un bucle entre estos dos productos.
- Electricidad.
- Gas Natural.
- Aceite, es un producto evitado, ya que es aceite que se obtiene a partir de la madera que empleamos para fabricar el cartón.

Como salidas se encuentran:

- Residuos municipales, en la fabricación de cartón corrugado se obtienen residuos los cuales no van todos a reciclaje, es más ni se considera.
- Lodos.

Pero en estas salidas no se consideran los posibles destinos ni usos de esos residuos, sino solo su producción.

**Materias primas de la caja de cartón (RoW):**



*Figura 4-6. Metodología Consecuencial, materias primas*

En la Figura 4-6 se ve el origen de las materias primas y recursos utilizados en la producción del cartón corrugado, en este caso las más relevantes son los trozos de madera seca y la electricidad.

En el caso de los trozos de madera seca, se puede observar que se utiliza calor, el cual tiene entradas evitadas, es decir, al utilizar ese calor se está evitando utilizar electricidad de alto voltaje y, por tanto, también el producirla y en consecuencia todas las emisiones que corresponde a ese proceso.

#### 4.1.2. Método APOS

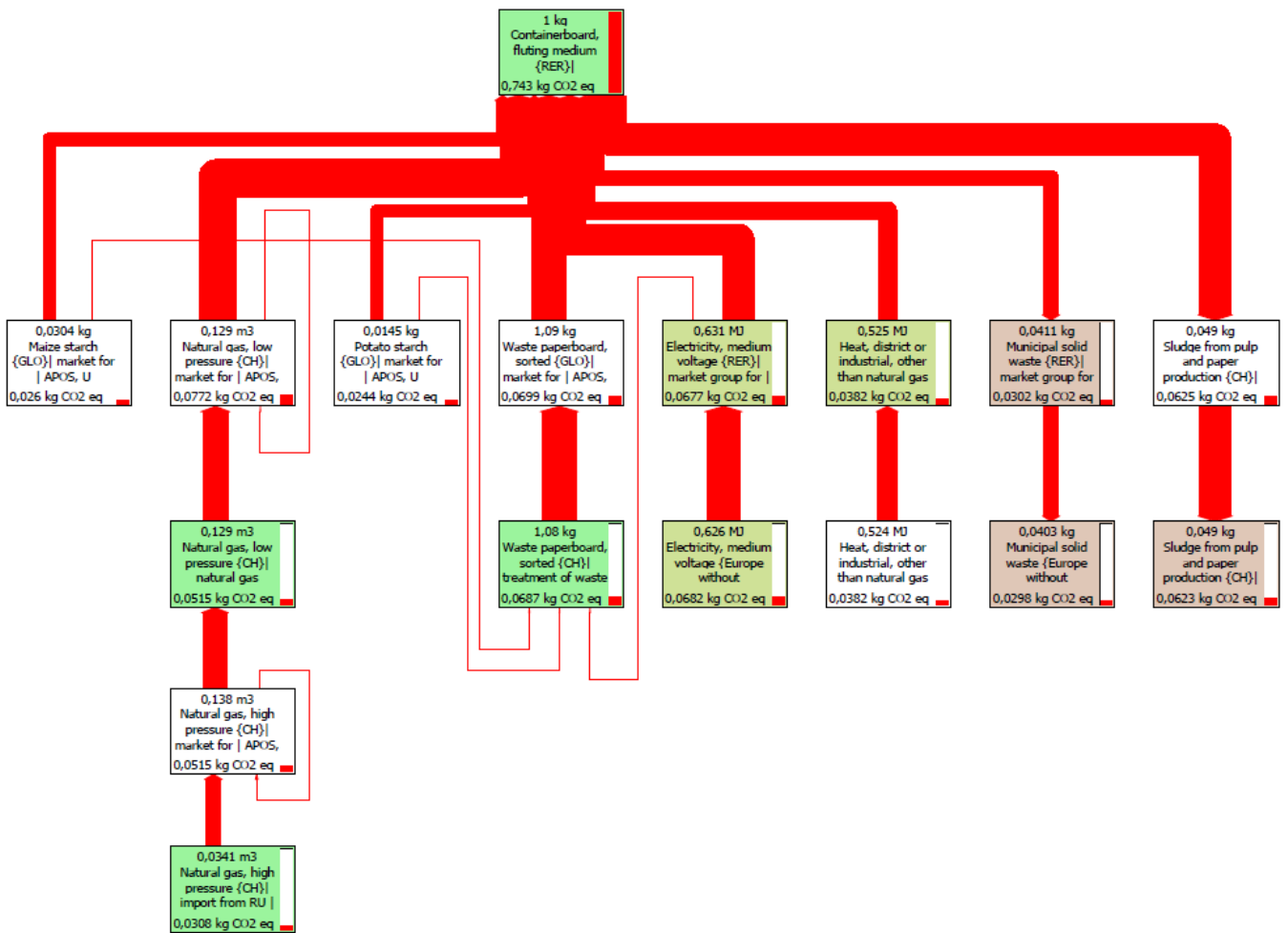


Figura 4-7. Árbol de Procesos de la Metodología APOSI para el Cambio Climático

En la Figura 4-7 se puede observar que se obtienen 0,743 kg CO<sub>2</sub>e por kg de caja de cartón estriado reciclado. Se trata de un sistema mucho más simple y prácticamente lineal a excepción de algunos detalles que se comentarán más adelante.

Como se puede ver, las salidas del sistema son residuos sólidos municipales y lodos resultantes de la fabricación del kg de caja de cartón estriado reciclado.

En lo que respecta a las entradas se encuentran:

- Almidón de maíz y de patata.
- Residuo de cartón reciclado.
- Gas natural de baja presión.
- Electricidad de voltaje medio.
- Calor.

En este caso, se puede ver que las entradas que tienen mayores aportaciones son la del gas natural, seguido del residuo de cartón reciclado, y, por último, la electricidad los cuales se van a estudiar a continuación con más detalle.

## Gas natural

En este caso, yendo al origen se puede ver que se parte desde la obtención del gas natural de alta, el cual hay que transportar y luego convertir en gas natural de baja presión de ahí sus emisiones. En esta entrada se puede ver que hay pequeños bucles los cuales hacen referencia al autoconsumo.

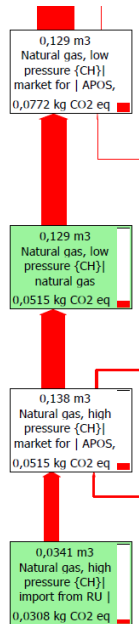


Figura 4-8. Metodología APOS, Gas Natural utilizado

## Residuo de cartón reciclado

En este caso, se puede ver en la Figura 4-9 que no se tiene en cuenta todo lo anterior hasta la obtención de ese residuo, es más se necesita mucha menos cantidad que en el caso anterior.

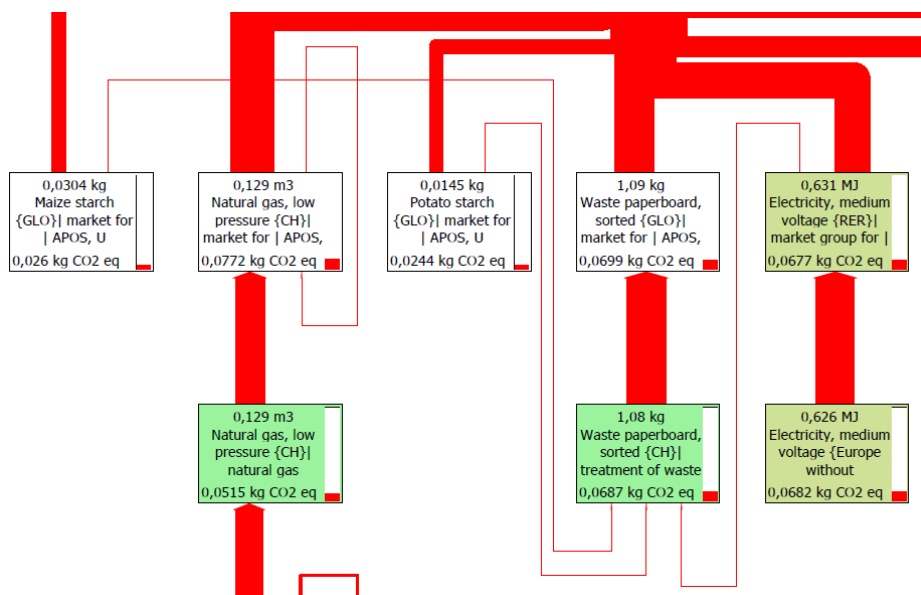


Figura 4-9. Metodología APOS, Residuo de Cartón Reciclado

En lo que respecta a las entradas a dicho producto, se puede ver que se tiene en cuenta la electricidad empleada, además de, almidón de maíz y de patata para la fabricación del producto siendo estas las principales entradas representadas en el árbol de procesos para el valor de corte de 3,2%.

## Electricidad

En este caso se puede ver en la Figura 4-9 que hace dos atribuciones al sistema, una al producto de forma directa y otra de forma indirecta ya que se necesita electricidad para fabricar el cartón reciclado.

Por otro lado, respecto a las salidas del sistema, al observar la Figura 4-10 se encuentra que se está considerando el *tratamiento de residuo* y no la obtención del residuo, es decir, la carga se está atribuyendo al proceso no al residuo como tal de ahí que aparezca en un color rojizo.

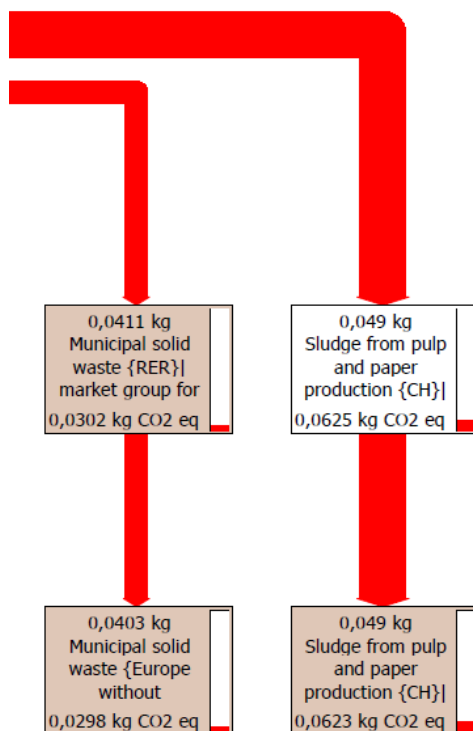


Figura 4-10. Metodología APOS, electricidad utilizada

Otro detalle importante es que la salida mayoritaria en este caso se trata de los lodos de la pulpa y el papel, los cuales son 0,049 kg que suponen unos 0,0623 kg de CO<sub>2</sub> eq.



### 4.1.3. Método Cut-off

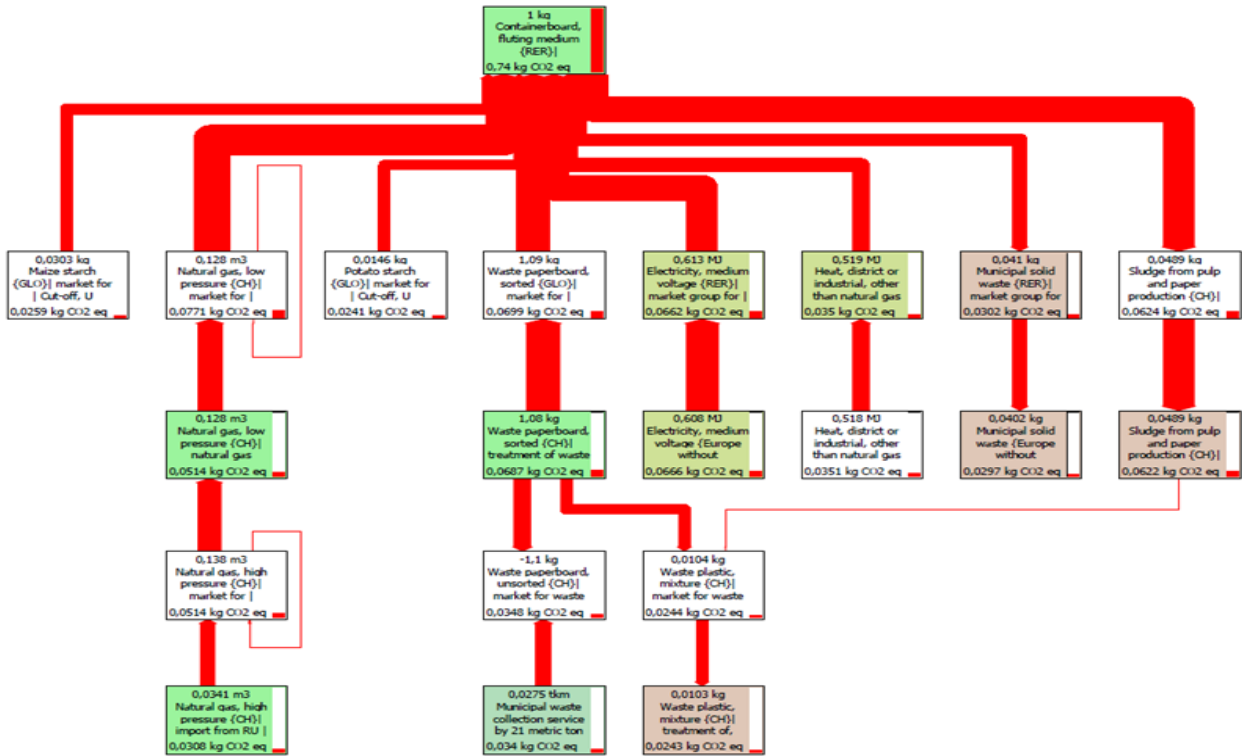


Figura 4-11. Árbol de Procesos de la Metodología Cut-off para el Cambio Climático

Como se puede ver en la Figura 4-11, en este caso se obtienen 0,74 kg CO<sub>2</sub> eq por kg de cartón estriado reciclado.

En lo que respecta a las entradas y salidas se encuentra lo siguiente:

- En este caso ni el almidón de maíz ni el de patata alimentan al residuo de cartón reciclado, sino que aparecen como entrada directa al producto objeto de estudio, tal y como se ve en la Figura 4-12.

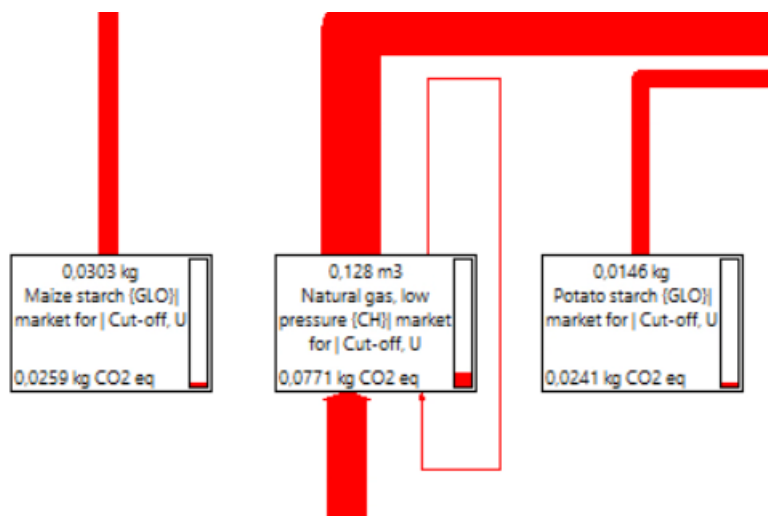


Figura 4-12. Metodología Cut-Off

- Respecto a la energía empleada en el sistema se puede observar que se consideran tres, que ordenados de mayor a menor contribución son: electricidad, calor y gas natural, en este último se encuentran unos pequeños bucles haciendo referencia al autoconsumo que se realiza para obtenerlo como se puede observar en la Figura 4-13.

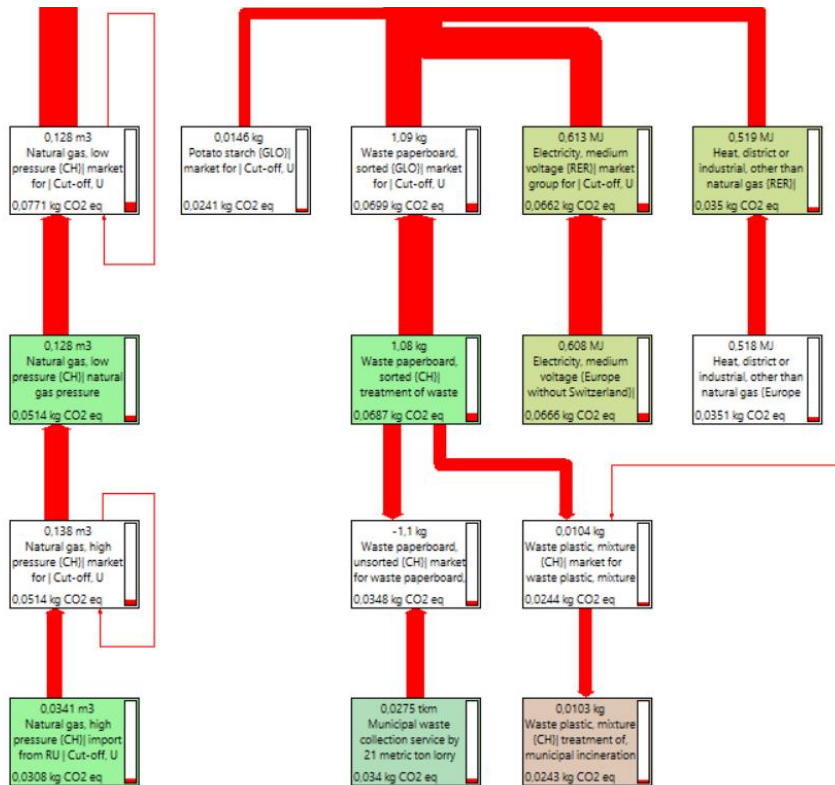


Figura 4-13. Metodología Cut-Off

Por último, pero no menos importante, en las entradas se encuentra el Residuo de cartón clasificado, observando la Figura 4-14 se encuentra que hay tres salidas:

- Cartón no clasificado, este tiene signo negativo, ya que al reciclarse se evita que se produzca este residuo y a la vez el transporte de este, que es lo que hace referencia el cajetín verde oscuro.
- Mezcla de residuos plásticos, consecuencia de tratar el cartón para su reutilización, los cuales luego se envían a valoración y se incluye el transporte de estos.
- Por último, residuo de cartón clasificado al que se le ha incorporado el transporte (de ahí que aumenten las emisiones respecto al cajetín verde).

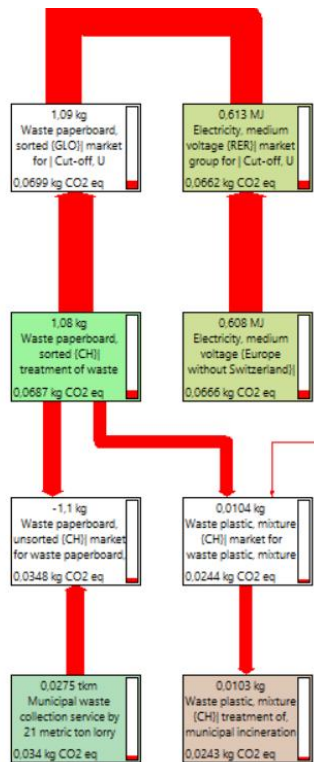


Figura 4-14. Metodología Cut-Off

En lo que respecta a las salidas, se encuentran dos que son las que se ven en la Figura 4-15:

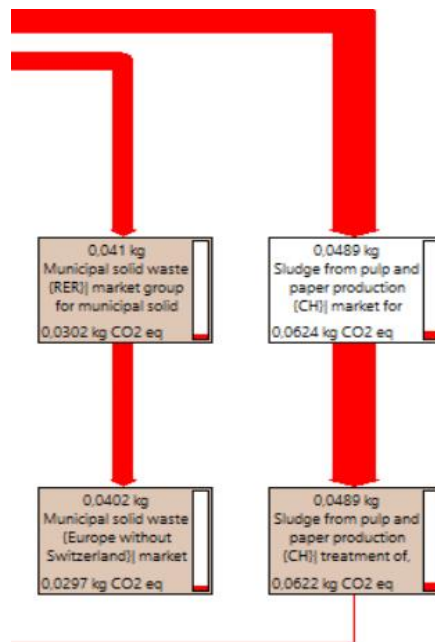


Figura 4-15. Metodología Cut-Off

Siendo en ambos casos residuos, tratándose de residuos sólidos municipales y de los lodos de producción de pulpa y papel. En ambos se puede ver como se trata del tratamiento de residuos, con la peculiaridad de que en este caso los lodos al igual que la mezcla de plásticos mencionados anteriormente, su destino de tratamiento es la incineración.

Como se puede observar en la Figura 4-16, las tres metodologías en la última etapa del ciclo de vida del producto tienen entradas y salidas muy similares:

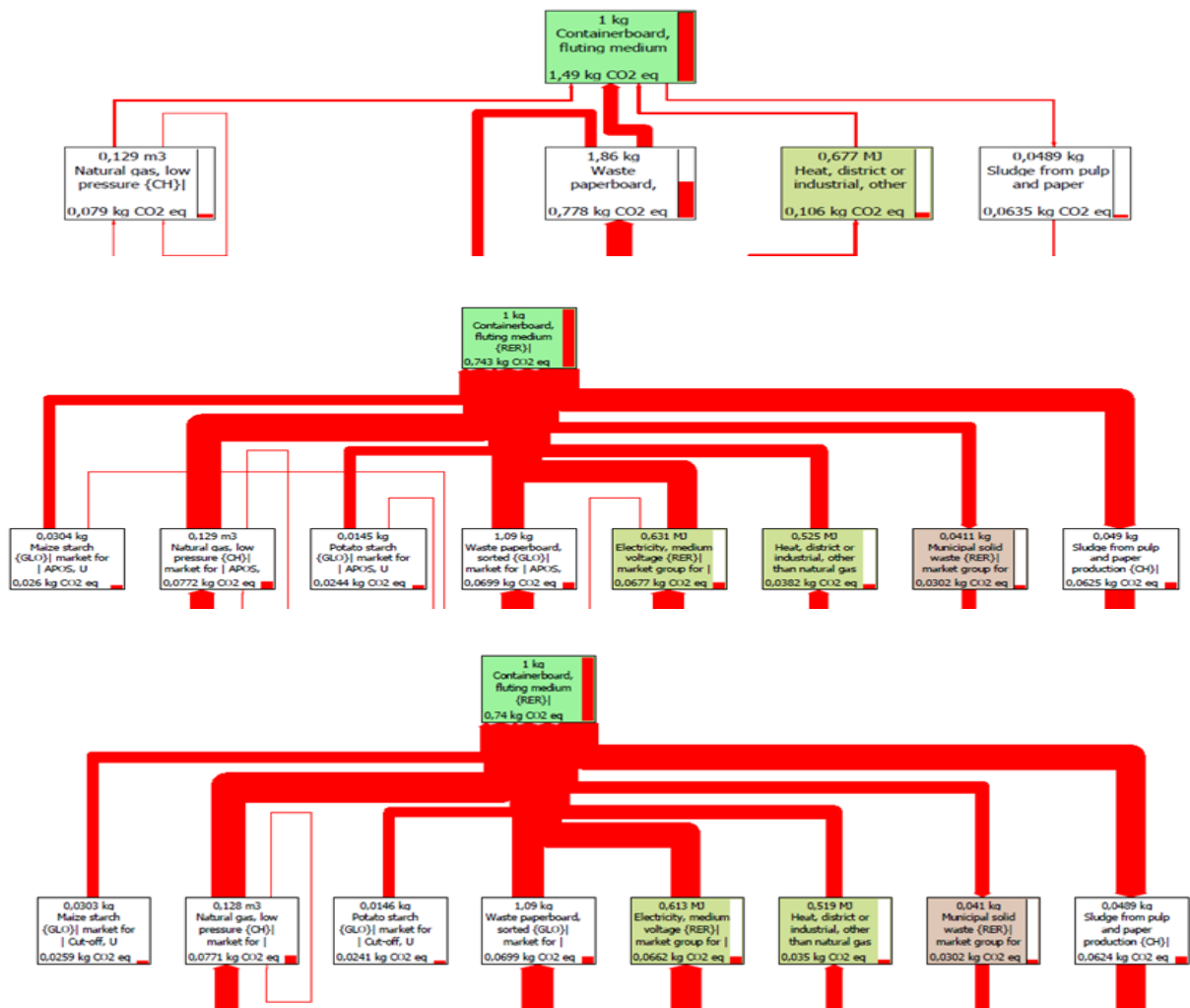


Figura 4-16. Última etapa del ciclo de vida del producto (Consecuencial, Apos y Cut-off)

Se puede ver en la Figura 4-16 cómo las tres metodologías consideran una salida en común, los lodos de la producción del papel y la pulpa mientras que el APOS y Cut-off, además, tienen en cuenta la producción de residuos sólidos municipales. Sin embargo, si se observa con atención en la figura posterior, se puede ver que no se consideran de igual manera los lodos ya que, el árbol de procesos del consecuencial indica que se obtienen dichos residuos con unas emisiones determinadas, mientras que el APOS y Cut-Off atribuyen las emisiones al proceso, siendo diferentes entre sí. En el caso del APOS se encuentra que las emisiones se atribuyen a la producción de lodos como tal, en cambio en el Cut-off se observa que se atribuyen al tratamiento al que es sometido el residuo, es decir, la incineración junto a los plásticos que se han producido en etapas anteriores.

En lo que respecta a las entradas de energía todas las metodologías consideran el gas natural y el calor, sin embargo, en la metodología consecuencial no aparece la electricidad mientras que los otros dos sí. Es más, en estos dos últimos la electricidad es la entrada mayoritaria de las energéticas, siendo aproximadamente 0,61 MJ. En cambio, en el sistema consecuencial la entrada energética mayoritaria es la del Calor siendo de 0,6 MJ mientras que en el resto de los sistemas de estudio es de 0,5. En lo que respecta al gas natural en los 3 sistemas ronda el 0,12-0,13 m<sup>3</sup> que en kgCO<sub>2</sub>eq corresponden a 0,08 frente a 0,035 en el caso del calor y en el caso de la electricidad todos rondan el de 0,07.

En referencia al sistema consecuencial no se representan/consideran más entradas (además del residuo de cartón clasificado, del que se hablará más adelante), pero en las otras dos metodologías sí, siendo muy similares entre sí. Tanto en el APOS como en el Cut-Off se hace referencia al almidón del maíz y de la patata mientras en el consecuencial es menor del 3,2% por lo que no aparece representado.

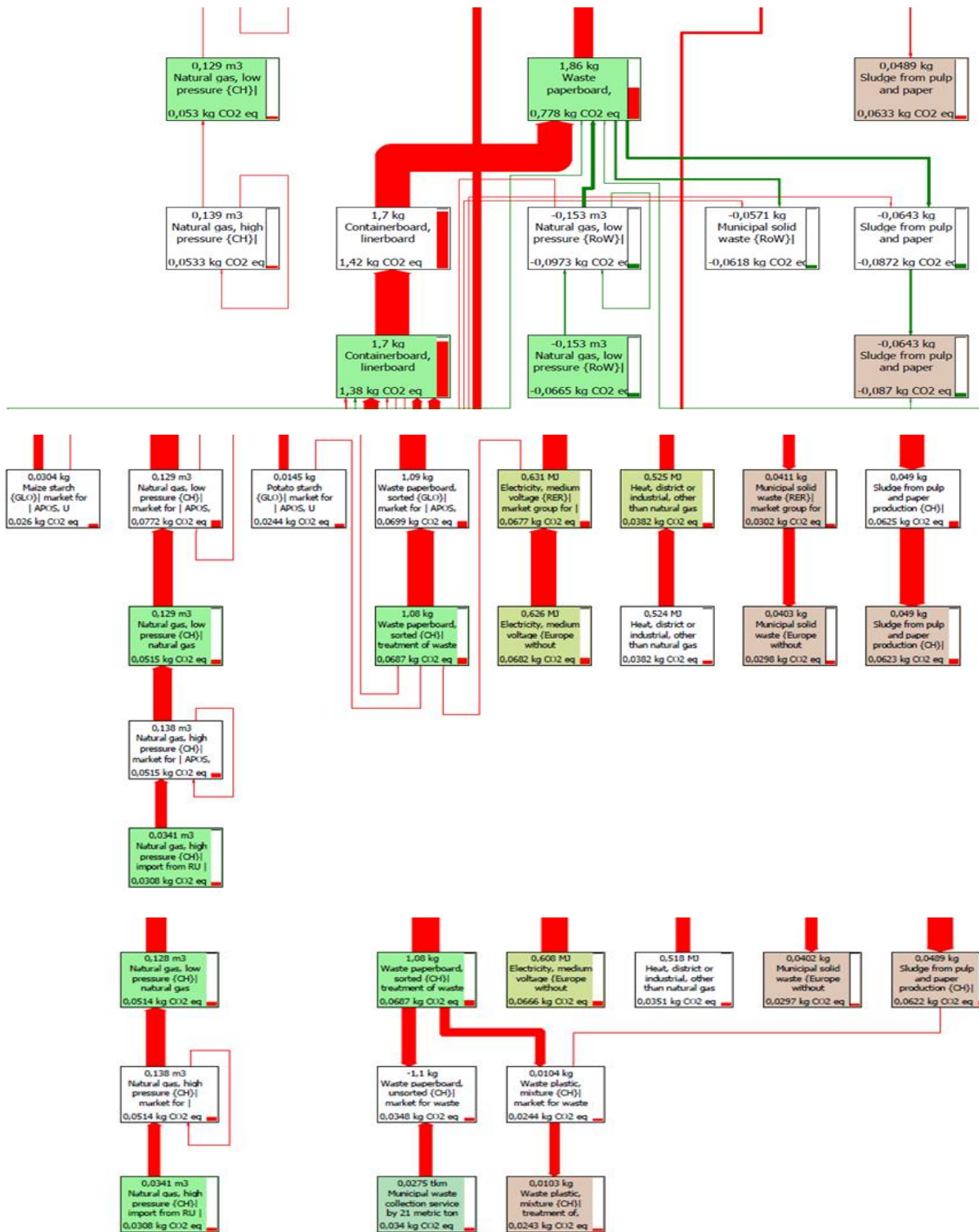


Figura 4-17 Obtención del Residuo de Cartón clasificado (Consecuencial, Apos y Cut-off)

En la Figura 4-17 se puede ver el cuello de botella de este ciclo de vida del producto, causante de las diferencias entre los sistemas, el cartón a partir el cual se obtiene el residuo que posteriormente será reciclado y dará lugar al producto estudiado. En el caso del Consecuencial se puede observar que se tienen en cuenta muchísimos detalles, donde destacan el proceso de transformación donde la caja de cartón pasa a ser un residuo, considerándose las consecuencias de obtener este residuo, como, por ejemplo, es evitar el uso de gas natural, y se formen residuos sólidos urbanos y los lodos.

Luego, respecto a la metodología APOS se puede observar que aparecen las materias primas necesarias para llegar a producir esos residuos, es decir, se tiene en cuenta las materias primas para producir el producto virgen que al final acaba siendo residuo.

Por último, respecto a la metodología Cut-off, en este caso no se tiene en cuenta las materias primas etapas anteriores ciclo de vida que se ha necesitado para producir dicho residuo que se va a utilizar ahora como materia prima, ni se consideran los productos o procesos evitados al utilizarlo y no fabricarlo como materia prima; En cambio, sí se tiene en cuenta qué se evita al obtener este residuo clasificado, siendo en este caso la producción de residuos sólidos municipales y su respectivo transporte.

Mientras que en las metodologías APOS y Cut-off se considera que el ciclo de vida del producto no tiene más etapas previas a ese cartón con el que se obtendrá el cartón reciclado, en la metodología Consecuencial sí hay más etapas siendo las que aparecen el Figura 4-18, las cuales se van a estudiar a continuación

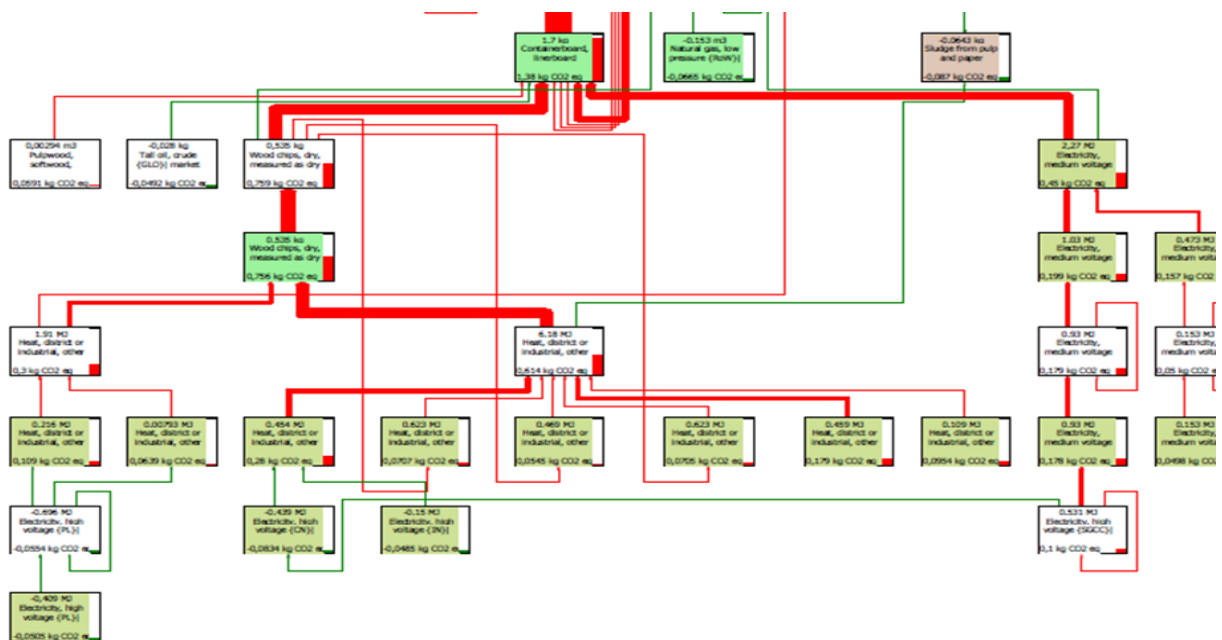


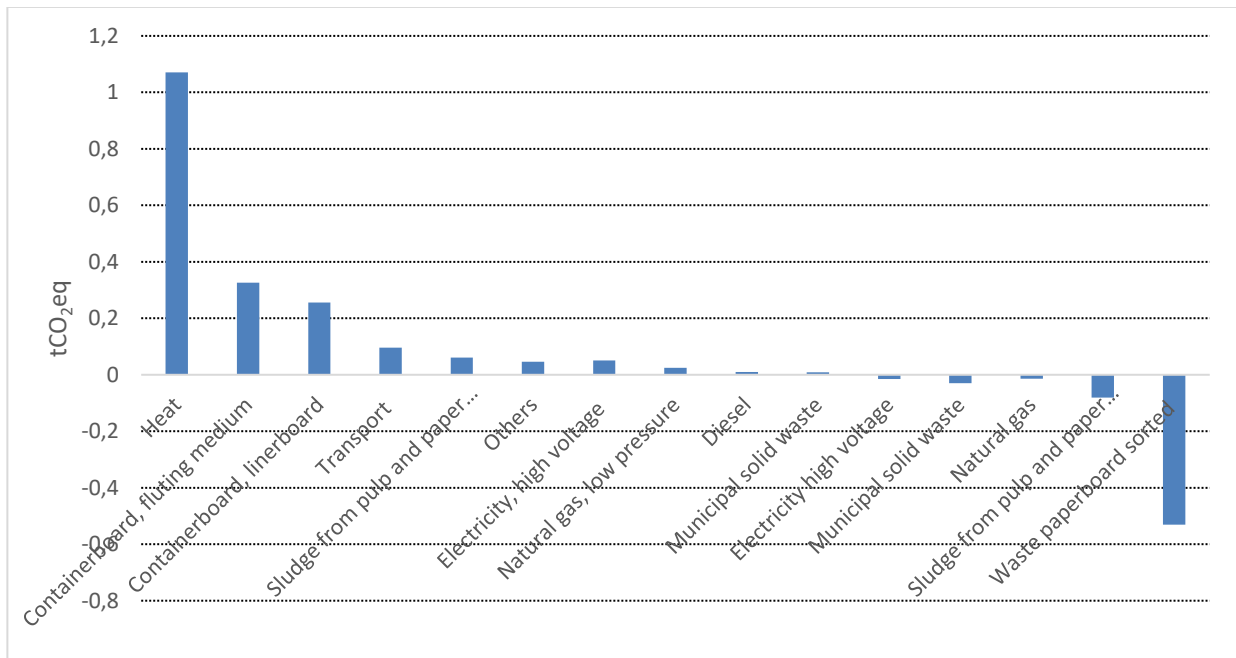
Figura 4-18 Etapas anteriores a la producción del residuo de cartón clasificado según la metodología Consecuencial

Como se puede observar en la Figura 4-18 para un mismo valor de corte (3,2%) en la metodología consecuencial se tiene en cuenta la formación de esa caja de cartón a partir de las materias primas, es decir, se trata una caja de cartón virgen. Es más, se ha considerado que se evita la utilización trozos de madera seca en la caja de cartón reciclada (es la flecha verde que va más allá del límite de la imagen), sucediendo igual con la electricidad que se emplea para fabricar la caja de cartón ‘virgen’.

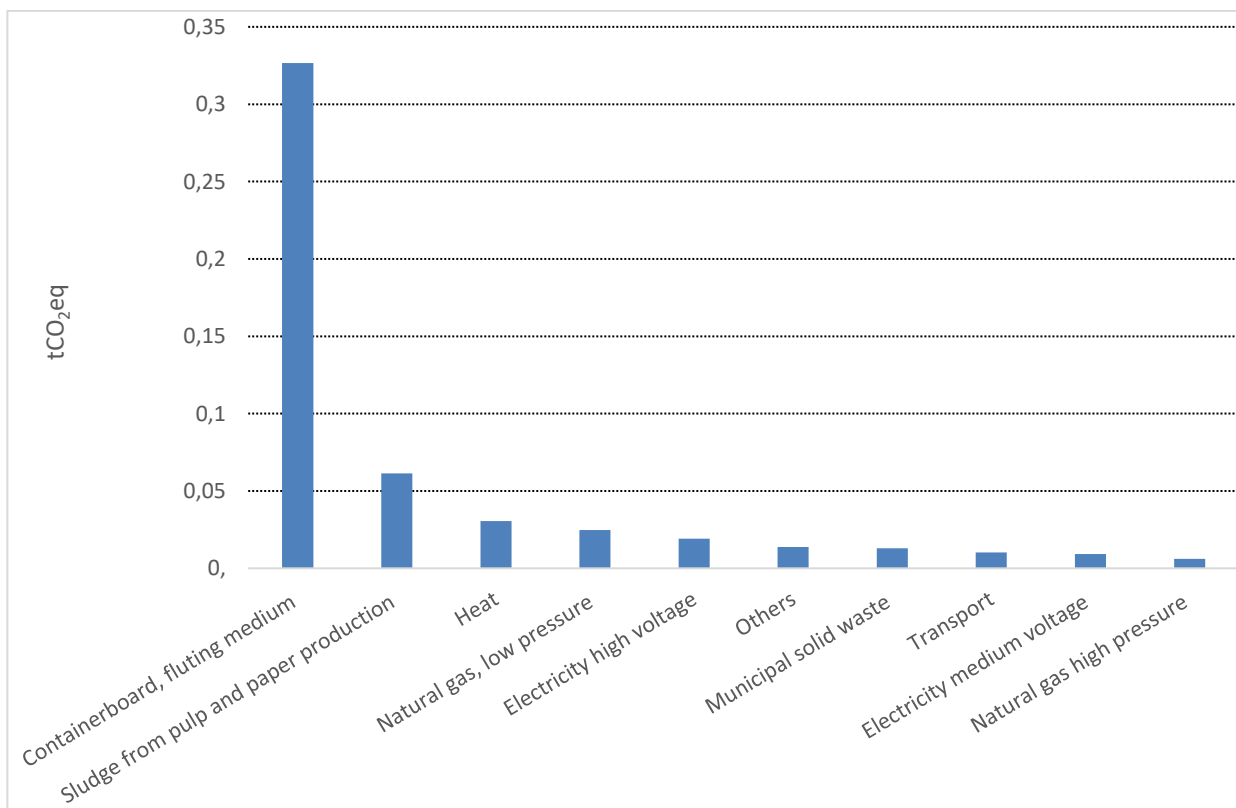
Si se sigue avanzando en la figura, en la obtención de las materias primas y recursos se encuentran los trozos de madera seca y la electricidad. En el caso de la madera seca, se puede observar que al utilizar calor se ha tenido en cuenta que se evita la utilización de la electricidad de ahí las flechas verdes y símbolos negativos en las cantidades a ambas etapas y no solo esto, también se ha considerado que se evita utilizar ese calor en la fabricación de la caja de cartón a partir de material reciclado. Mientras que en la electricidad se puede ver como se obtiene desde la electricidad de alto voltaje.

## Contribución al proceso en cada metodología

En los gráficos I, II Y III se puede observar la contribución de los procesos en cada una de las metodologías, siendo la Consecuencial, APOS y Cut-Off respectivamente.

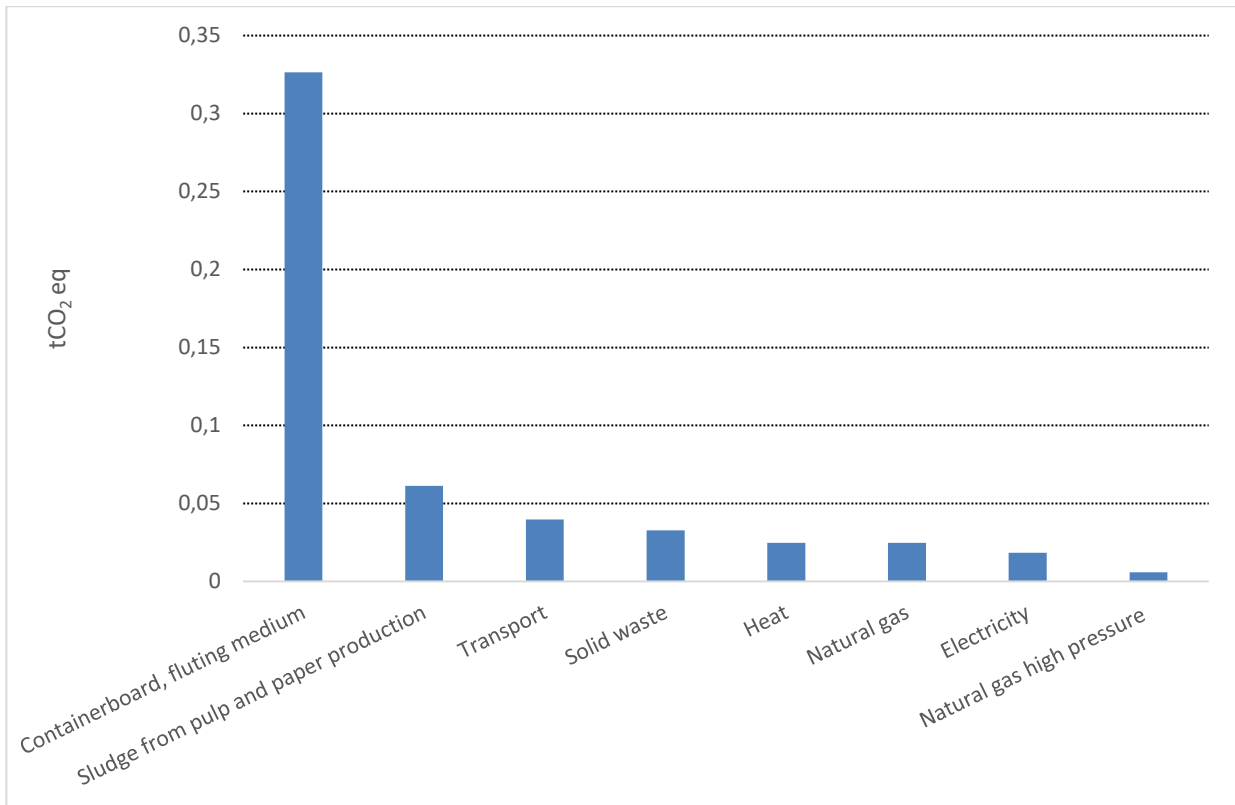


**Gráfico I. Contribución al Proceso Consecuencial.**



**Gráfico II. Contribución al Proceso APOS.**





**Gráfico III. Contribución al Proceso Cut-Off.**

Como se puede observar, para un punto de corte 0,5% siguiendo de izquierda a derecha se encuentra que en el caso APOS y Cut-Off la mayor contribución al proceso es por parte del cartón estriado reciclado mientras que en Consecuencial es el calor utilizado en el ciclo de vida.

La segunda mayor contribución es por parte de los lodos resultantes de la fabricación de la pulpa y el papel, en lo que respecta al caso APOS y Cut-off, siendo muy similar entre ellos mientras que en el Consecuencial es el cartón estriado reciclado.

Si se continúa observando los gráficos se puede apreciar que en el caso Consecuencial la siguiente contribución es la del transporte al igual que en Cut-Off mientras que en el APOS es el calor utilizado en el proceso.

Una de las características importantes de las gráficas a destacar es el hecho de que la gráfica Consecuencial se puede apreciar que se han considerado aquellas emisiones evitadas, siendo de menor a mayor contribución las siguientes, electricidad, residuos municipales, gas natural, lodos de la pulpa y el papel y por último residuos clasificados. En cambio, en los casos del APOS y Cut-off para el valor de corte evaluado no salen como procesos evitados.



## 4.2 Uso del Agua.

El agua se trata de un elemento clave en el desarrollo de los países, es más, debe gestionarse como parte integral del desarrollo social y económico de una nación. Un hecho a considerar es evaluar la sostenibilidad medioambiental estudiando los recursos hídricos. Esta situación es lo que ha dado lugar al desarrollo de la Huella Hídrica, siendo una nueva metodología de ECV que evalúa los impactos ambientales del uso del agua en el medio ambiente (Ansorge y Beránková 2017).

Con el fin de evaluar los resultados obtenidos aplicando cada una de las metodologías evaluadas, para otra categoría de impacto diferente, y observar si sigue la misma tendencia, se ha seleccionado esta categoría y se va a seguir el mismo proceso que para la contribución al cambio climático del producto en estudio.

A la hora de evaluar los impactos, el método de la Huella ambiental (EF) en el caso del agua utiliza los m<sup>3</sup> de agua eq privados, es decir, representa el agua necesaria para obtener el producto en relación con el agua disponible para una determinada área en una cuenca hidrográfica una vez ya han satisfecho las necesidades de los humanos y ecosistemas acuáticos (INESCOP 2021). Se basa en el supuesto de cuanto menos agua quede disponible por área más probable será que otro usuario se vea privado (Wulca 2023).

Teniendo en cuenta esto, se han obtenido los siguientes resultados para cada metodología:

- Metodología Consecuencial da lugar a una privación de agua de 0,716 m<sup>3</sup>eq
- Metodología APOS da lugar a una privación de agua de 0,26 m<sup>3</sup>eq
- Metodología Cut-Off da lugar a una privación de agua de 0,214 m<sup>3</sup>eq

Como se puede observar, en este caso la metodología que proporciona resultado menos favorable es el método Consecuencial, seguido del APOS y, por último, el Cut- Off, aunque entre estas dos últimas hay poca diferencia. Se trata de un 17% menos de un caso a otro, a nivel teórico puede tener poca importancia, pero a nivel ambiental se puede considerar una variación significativa.

### 4.2.1. Método Consecuencial.

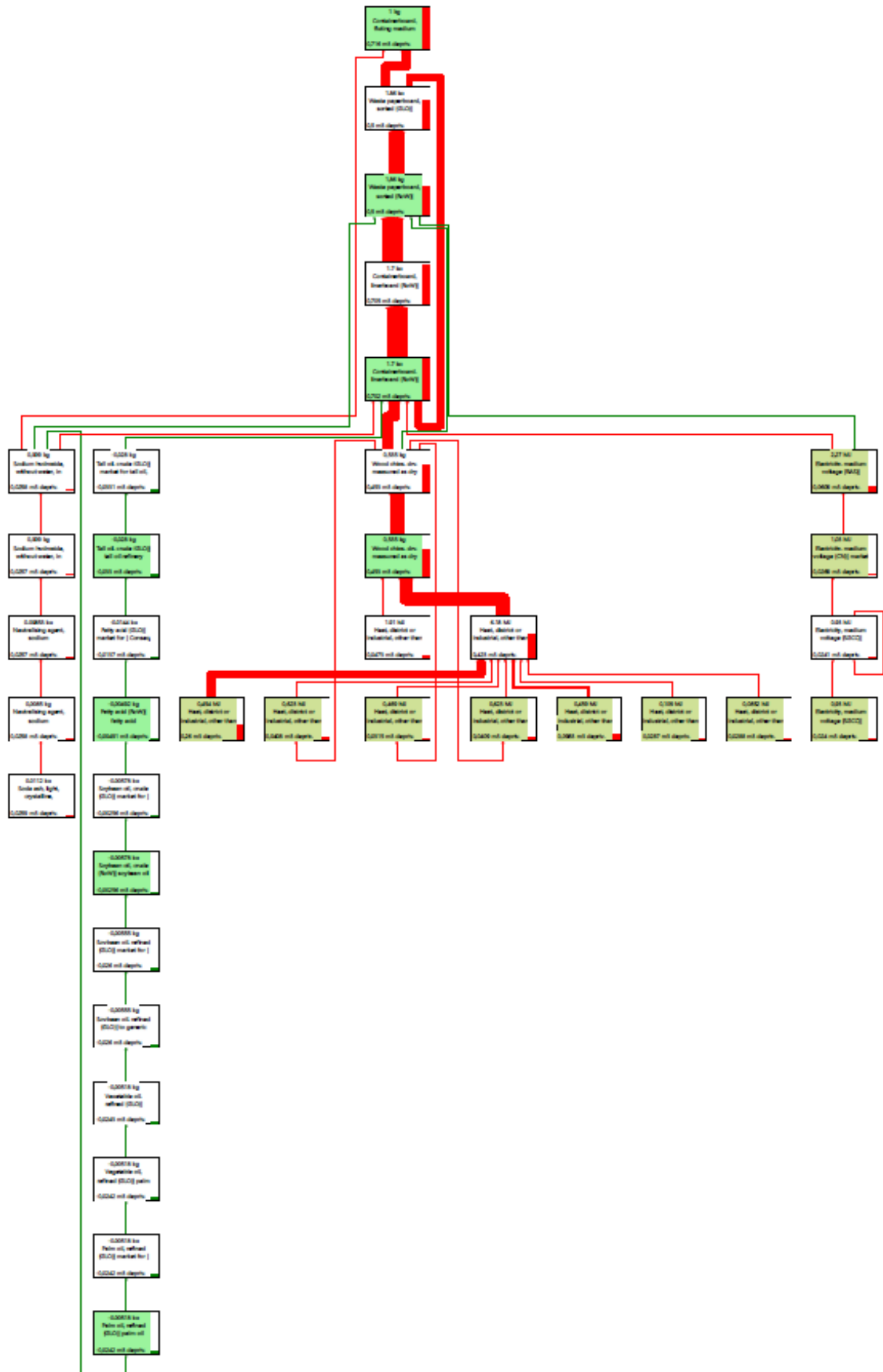


Figura 4-19. Árbol de procesos de la Metodología Consecuencial para el Uso del Agua

Como se puede observar en la Figura 4-19, el producto estudiado obtiene esas emisiones a raíz de las entradas del desecho de cartón clasificado y uso del hidróxido de sodio sin agua, aunque en este sistema no se ve reflejada ninguna salida ni cantidades evitadas cuando en el anterior sí.

A continuación, al igual que en el cambio climático se van a ir mostrando fragmentos de la red para ir entendiendo mejor el método.

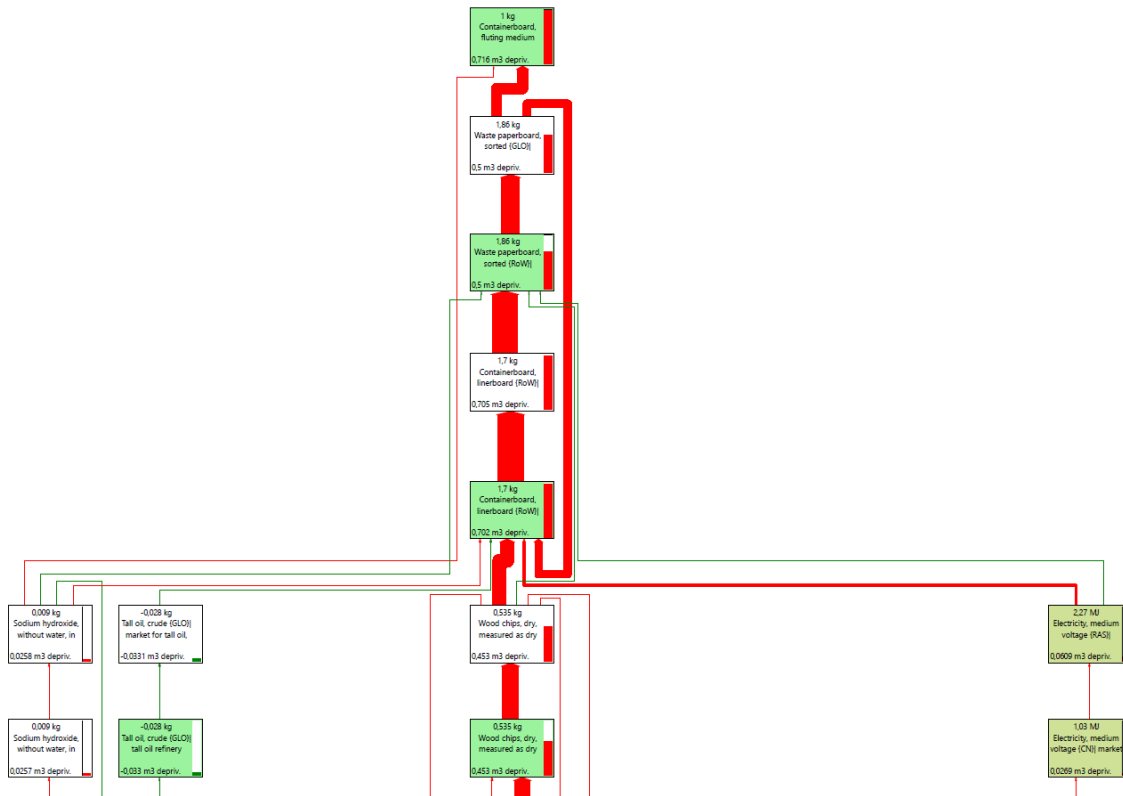
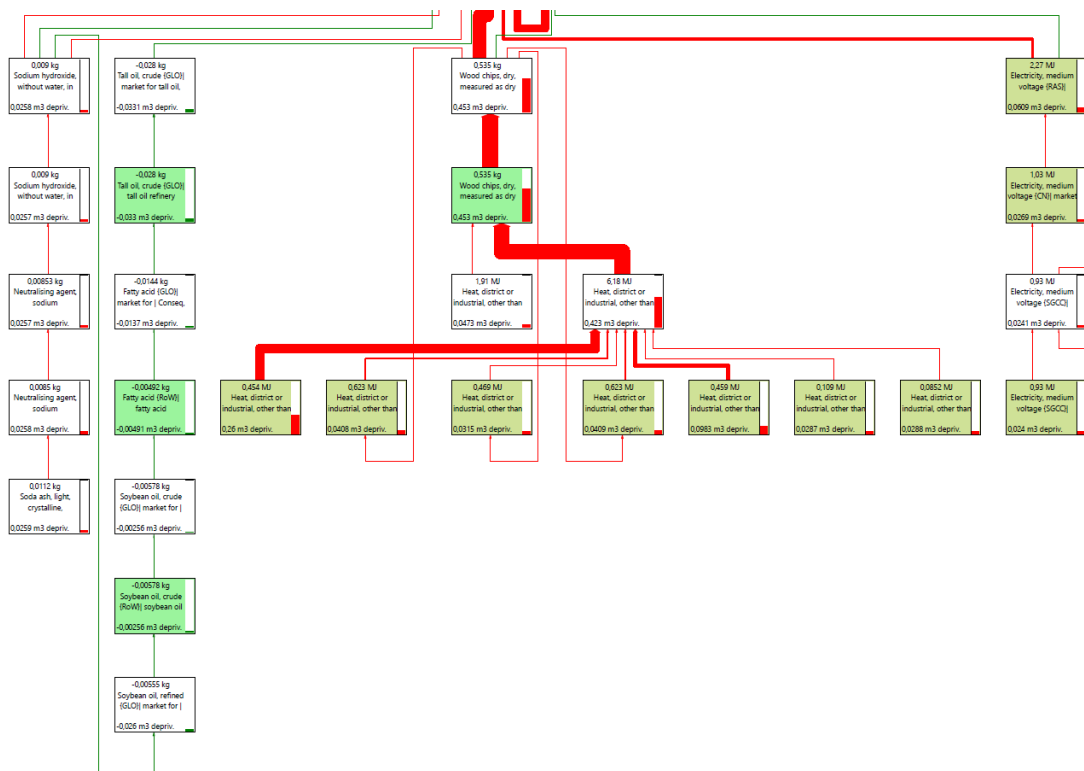


Figura 4-20. Primera parte de la Red de uso del Agua

La Figura 4-20, la cantidad de agua privada procede en su mayor parte del residuo de cartón clasificado, pero si se observa se puede ver que se tiene en cuenta para la fabricación del cartón ‘virgen’, donde se centrará el análisis posteriormente ya que es el más interesante en esta metodología.

Si se sigue analizando el residuo de cartón clasificado, el de color verde aunque en lo que respecta a la privación del agua hay poca diferencia con la del color blanco, se puede observar que tiene varias entradas verdes con esto quiere decir que se está teniendo en cuenta que al enviar el residuo del cartón a ser clasificado y utilizarse como materia prima se está evitando que posteriormente se utilice en sus cantidades correspondientes tanto la electricidad, como las materias primas como es el caso de la madera, hidróxido de sodio deshidratado y el aceite.

Si se sigue avanzando en la red de la Figura 4-20, se puede ver lo indicado en la Figura 4-21



**Figura 4-21. Materias primas del cartón virgen en la red del uso del agua**

Tal y como se puede ver en la Figura 4-21, las materias primas y recursos que se necesitan la fabricación de ese cartón virgen para esta categoría de impacto son: el residuo de cartón clasificado (ya mencionado y explicado anteriormente), virutas de madera, electricidad e hidróxido de sodio sin agua. Además, se indica que se evita la utilización del aceite, el cual analizaremos más detenidamente posteriormente.

En el caso del hidróxido de sodio es el que menos privación del agua da lugar y el menos interesante por lo que nos centraremos en las virutas de madera seca. Como se puede ver en la Figura 4-21, hay varios pequeños bucles entre la madera y el calor empleado, es decir, se está teniendo en cuenta que se ha necesitado madera seca para producir dicho calor; sin embargo, si se sigue analizando dicho fragmento de la red se puede ver que las principales aportaciones son debidas al calor y se encuentran dos las cuales se diferencian en lo siguiente:

- En la de la izquierda, se incluyen las actividades de suministro de calor procedentes de las diferentes tecnologías se han estimado basándose en las estadísticas de la AIE para el 2009 (EIA 2009). Las proporciones en las que se han incluido son las siguientes: 52% del calor. procedente del carbón y la turba, el 16 % del calor procedente del petróleo, el 18 % de biocombustibles (modelados con biogás y madera), el 11 % del calor procedente de residuos y el 2 % del calor procedente de otras fuentes.
- Mientras que en la de la derecha se incluye, la quema de biometano en turbinas de gas; biogás en motor de gas cogenerado; antracita, carbón, briquetas de lignito y coque en estufa; madera dura, troncos, madera blanda, astillas de madera, pellets de madera en hornos y calentadores de leña; Fuelóleo ligero en calderas. De ahí que tenga diversas entradas, siendo las más representativas la de cogeneración con lignito que da lugar a una privación del agua de 0,26 m<sup>3</sup>eq, seguida del que provoca una privación de agua de 0,0409 m<sup>3</sup> eq en donde se representa la producción de electricidad de alto voltaje y calefacción urbana en una central eléctrica de hulla combinada de calor y energía promedio. La "hulla" incluye la antracita, la hulla coquizable y otras hullas bituminosas según la definición de la información sobre electricidad de la AIE de 2014.

Ahora, se explicará brevemente lo que esa corriente evita, que aparece en la Figura 4-22:

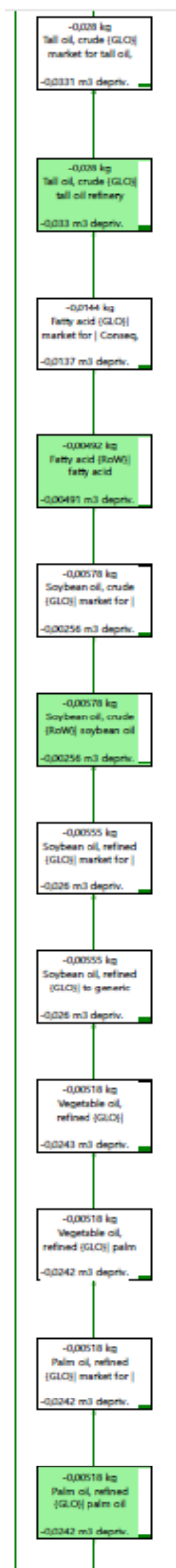


Figura 4-22. Corriente de aceite evitada en la privación del agua

En Figura 4-22 indica que se está evitando la utilización de dicho aceite, y todo lo que ello conlleva, es decir, obtención de las materias primas que se necesitan, los procesos que se deben llevar a cabo para poder obtenerlo.

## 4.2.2. Método APOS.

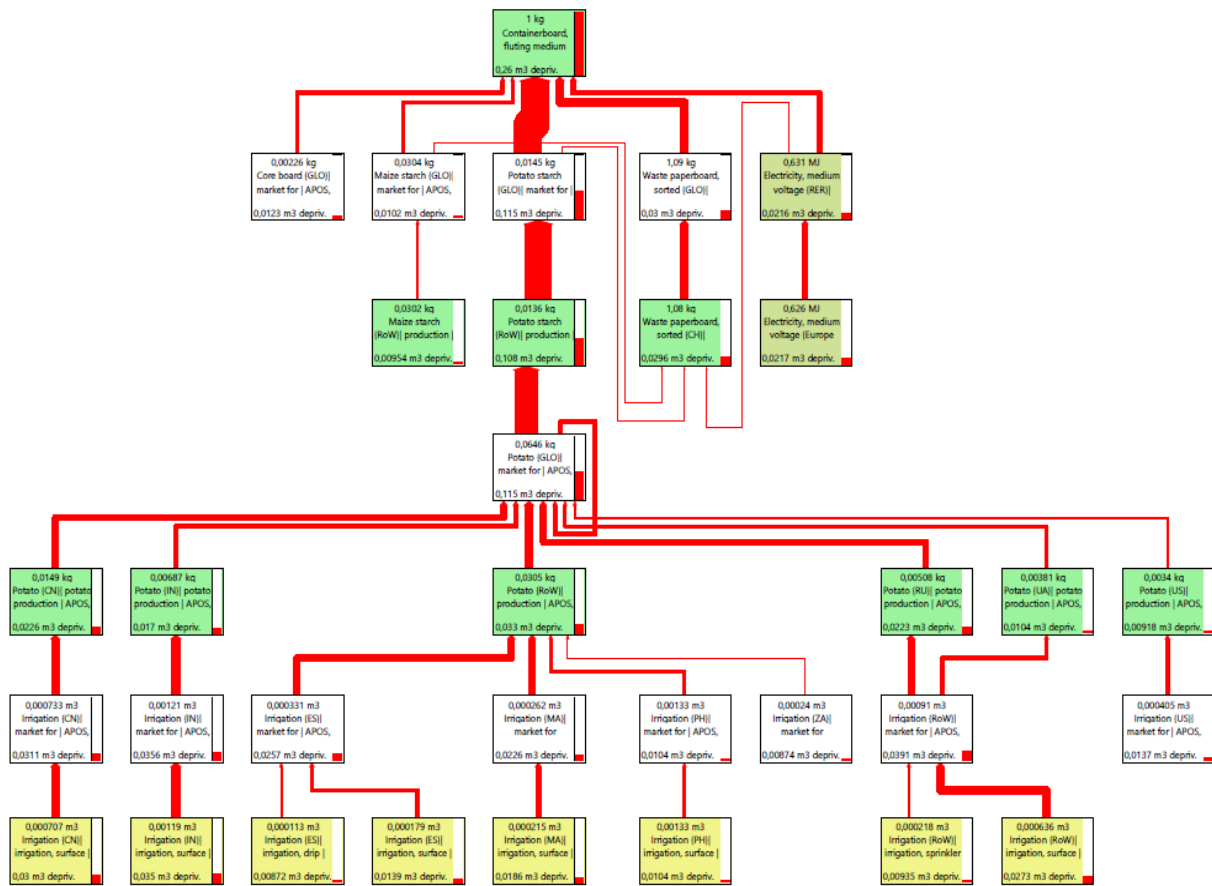


Figura 4-23. Árbol de procesos de la Metodología APOS para el Uso del Agua

Como se puede observar en la Figura 4-23 se trata de una privación de agua de 0,26 m<sup>3</sup> eq por kilogramo de producto.

Sin embargo, en este caso se puede ver que la mayor aportación la produce el almidón de patata, seguido del residuo de cartón clasificado y luego la electricidad, el resto de las entradas hacen aportaciones pequeñas en comparación a estas tres.

Centrándonos en las dos primeras, la electricidad no aporta información interesante más allá de que se trata de electricidad de alto voltaje (no se considera otro tipo de electricidad) y que se tiene en cuenta en el residuo de cartón clasificado ya que es necesaria en el proceso de clasificación.

En cambio, el residuo de cartón clasificado, en este caso no tiene tanta importancia, aunque respecto a las entradas que se tienen en cuenta es el segundo mayoritario.

Como se puede observar, se ha tenido en cuenta que se necesita almidón de patata, de maíz y electricidad para producir dicho residuo, es decir, se está teniendo en cuenta las materias primas para producir el cartón virgen que luego se convertirá en residuo.

Sin embargo, en la Figura 4-24 se puede ver a que se debe esa gran importancia que tiene ahora el almidón de patata. Es cierto, que aparecen dos procesos de esta materia prima, pero la diferencia es los transportes que se incluyen en unas y otras. Posteriormente se indica la obtención de la patata como materia prima para ese almidón, por ello nos vamos a centrar en este proceso donde se indica una privación de agua de 0,115 m<sup>3</sup> eq.

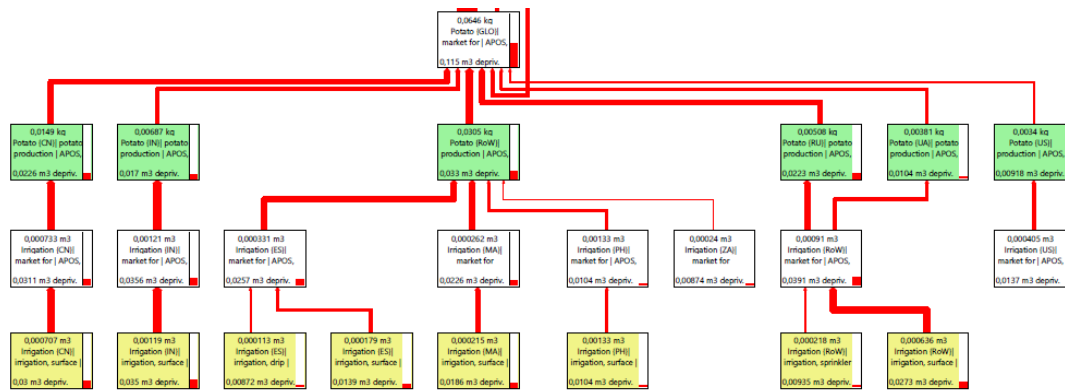


Figura 4-24. Uso del agua para obtener la patata como materia prima para el almidón

Como se puede ver en la Figura 4-24, dicha materia prima tiene numerosas entradas, es decir, es un dato promedio teniendo en cuenta la privación de agua que tiene lugar en diferentes puntos geográficos y distintas consideraciones.

Analizando cada uno de ellos, se puede ver que se tienen en cuenta distintos tipos de regadío como es el caso del regadío por goteo y con aspersores y la superficie que se riega, siendo esta última la que más afecta a la privación del agua, seguida del riego por aspersores y, por último, el de goteo.

### 4.2.3. Método Cut-Off.

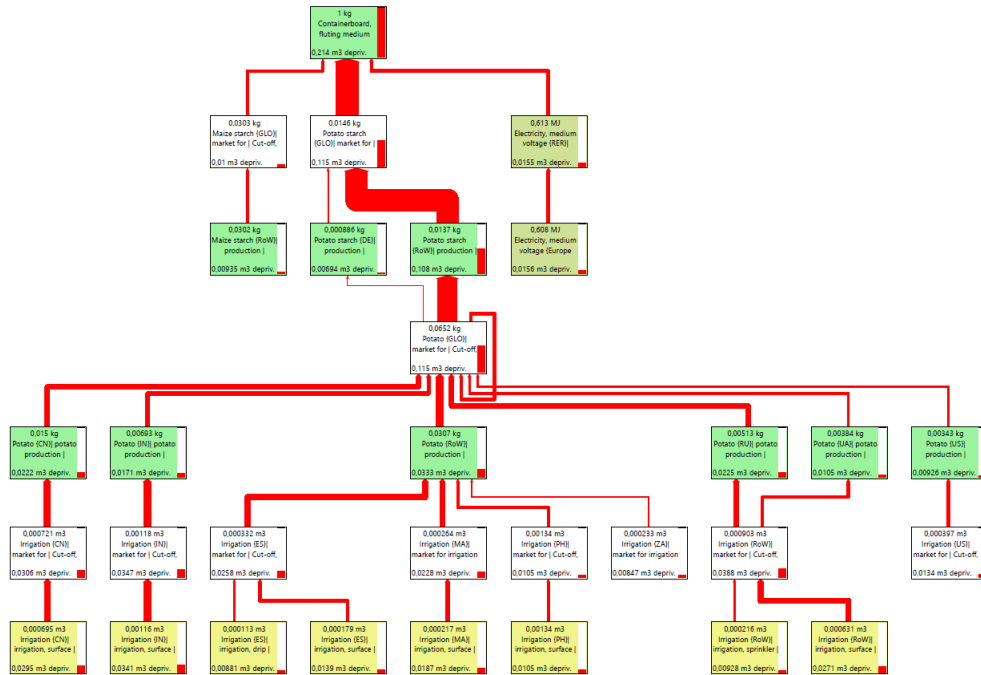


Figura 4-25. Árbol de procesos de la Metodología Cut-Off para el Uso del Agua

Como se puede observar en la Figura 4 -25, con esta metodología tiene lugar una privación del agua de 0,214 m<sup>3</sup>eq. Sin embargo, en este caso se ve que las principales corrientes son el almidón de patata y de maíz y la electricidad; estos dos últimos son menos relevantes, por lo que nos centraremos en el almidón de patata. Mientras que el residuo de cartón reciclado del cual debería partir no aparece en este caso para el porcentaje de corte indicado (3,2%); es más, para que este salga en la red del proceso es necesario reducir el porcentaje de corte al 1% (Figura 4-26) en donde se ve que para este caso de estudio da lugar a una privación del agua del 0,00315m<sup>3</sup> eq. Es decir, para en esta situación lo que menos afecta a la privación del agua es la utilización de ese residuo de cartón clasificado en comparación al resto de materiales/ productos que se necesitan para obtener el producto objeto de estudio.





En la Figura 4-26 se puede apreciar que en el proceso se está teniendo en cuenta que se evita la formación de agua residual al fabricar cartón corrugado reciclado en el proceso de producción de la patata, ya que no se necesita tanto almidón de patata como cuando se trata de un producto virgen, por lo que es una pequeña cantidad se evita, para ser más exactos se evitan 8,5E-5 m<sup>3</sup> de agua residual lo que corresponden a 0,00325 m<sup>3</sup> eq de agua que se evitan privar.

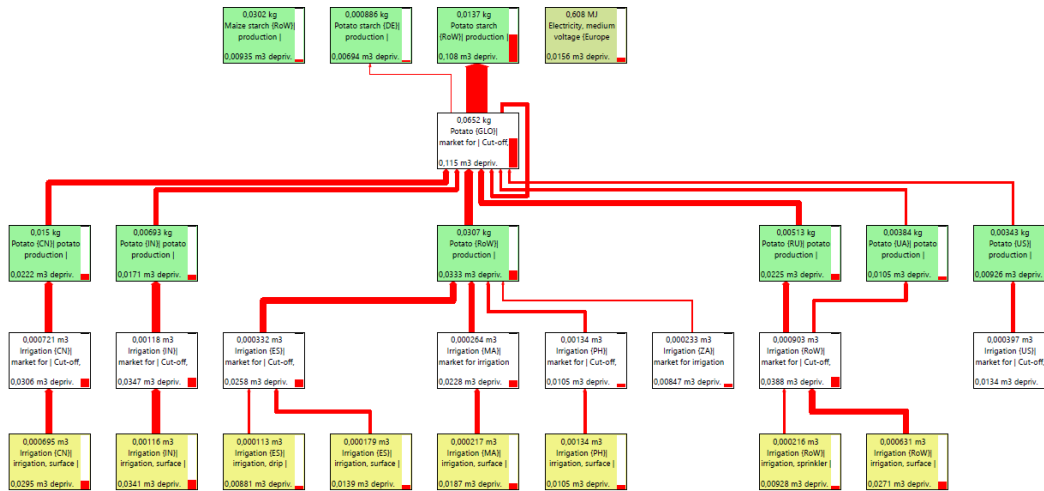
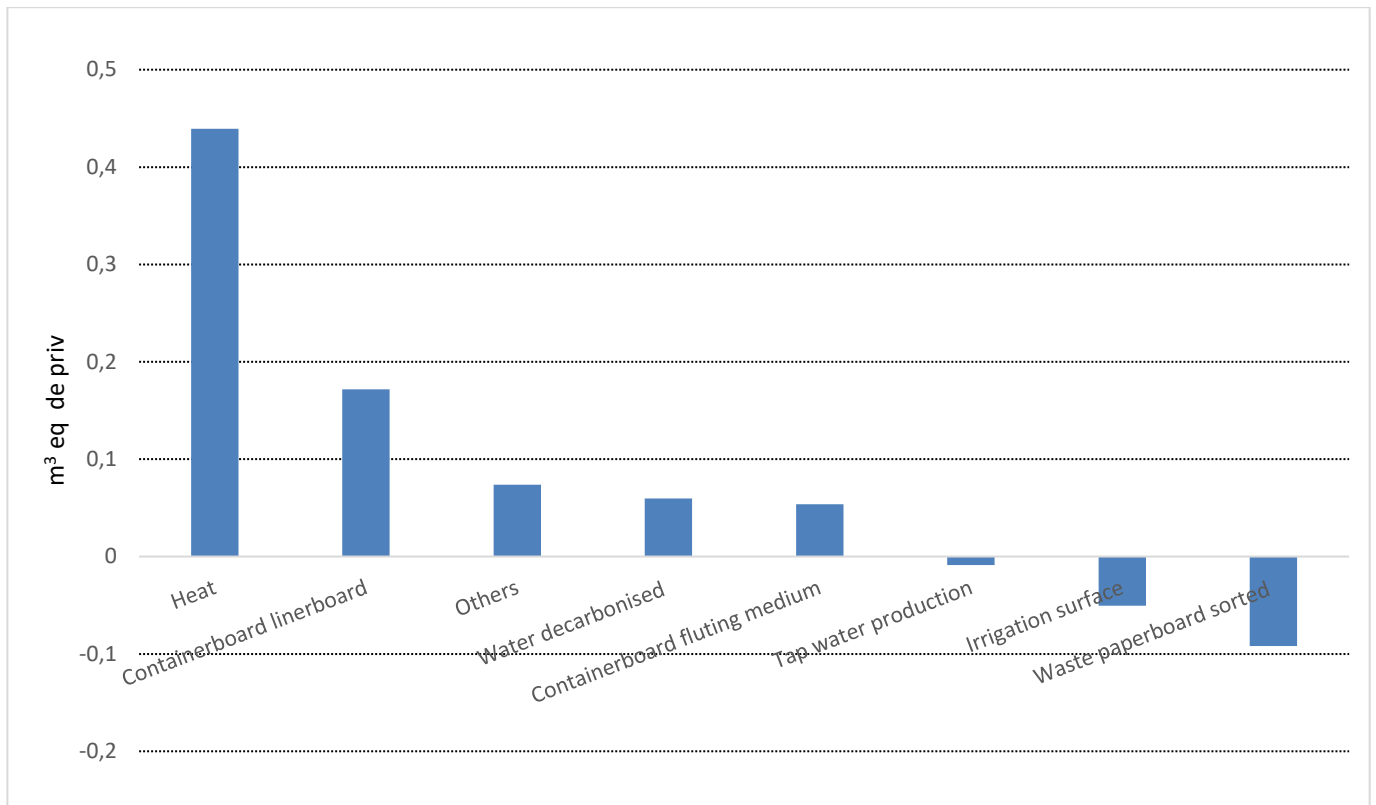


Figura 4-27. Obtención de la patata según el método Cut-off

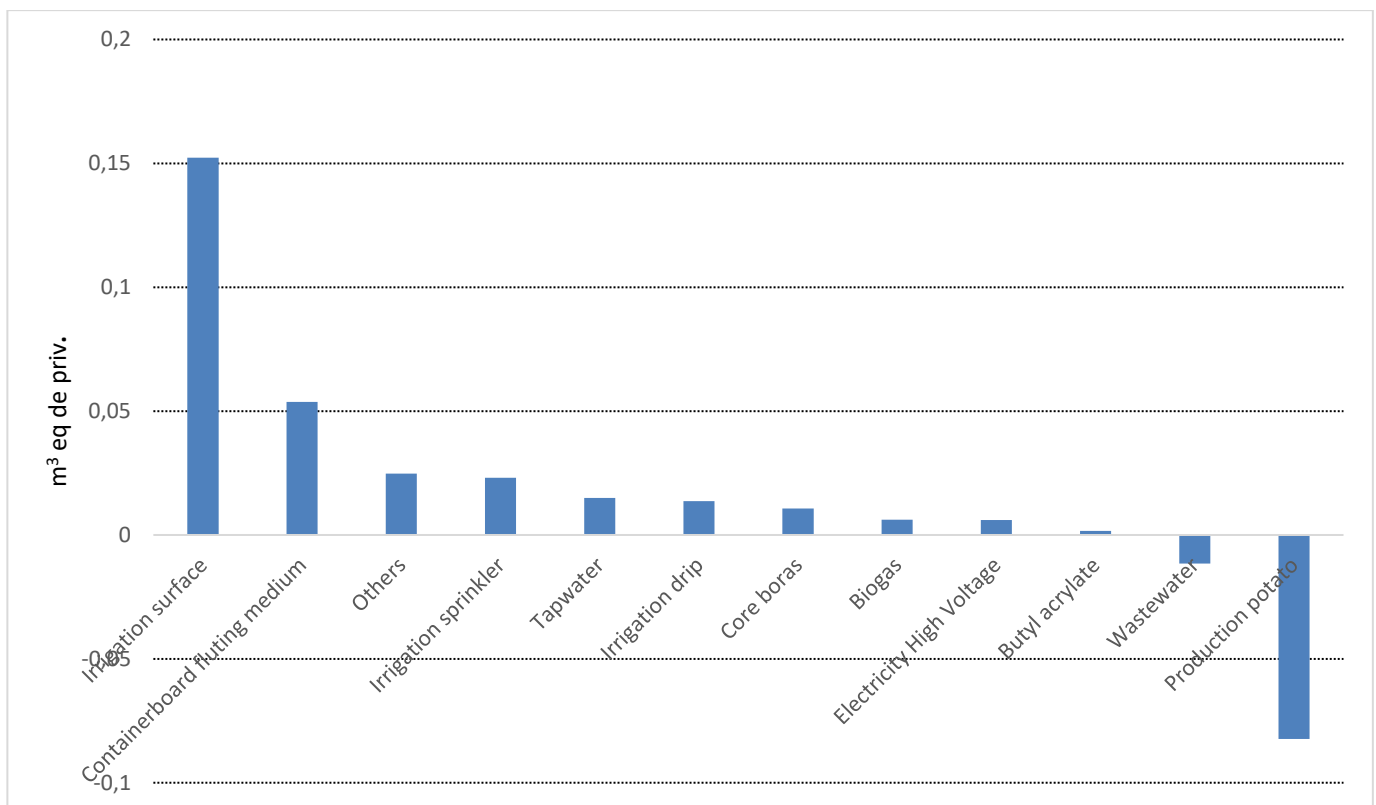
En la Figura 4-27 se puede ver que en este caso se trata de 0,115 m<sup>3</sup> eq de privación de agua. Si se sigue avanzando en la red se puede ver que se parte desde la obtención de la patata (materia prima necesaria para producir el producto virgen) donde se han utilizado datos promedios, ya que se puede ver que son datos de producción de ésta con distintos orígenes como es Rusia, Estados Unidos... y en todos ellos se ha tenido en cuenta el área que se riega, y el método de regadío siendo principalmente por goteo y por aspersores; generando un mayor impacto de mayor a menor la superficie de regadío, el riego por aspersores y por último el regadío por goteo.

## Contribución al proceso

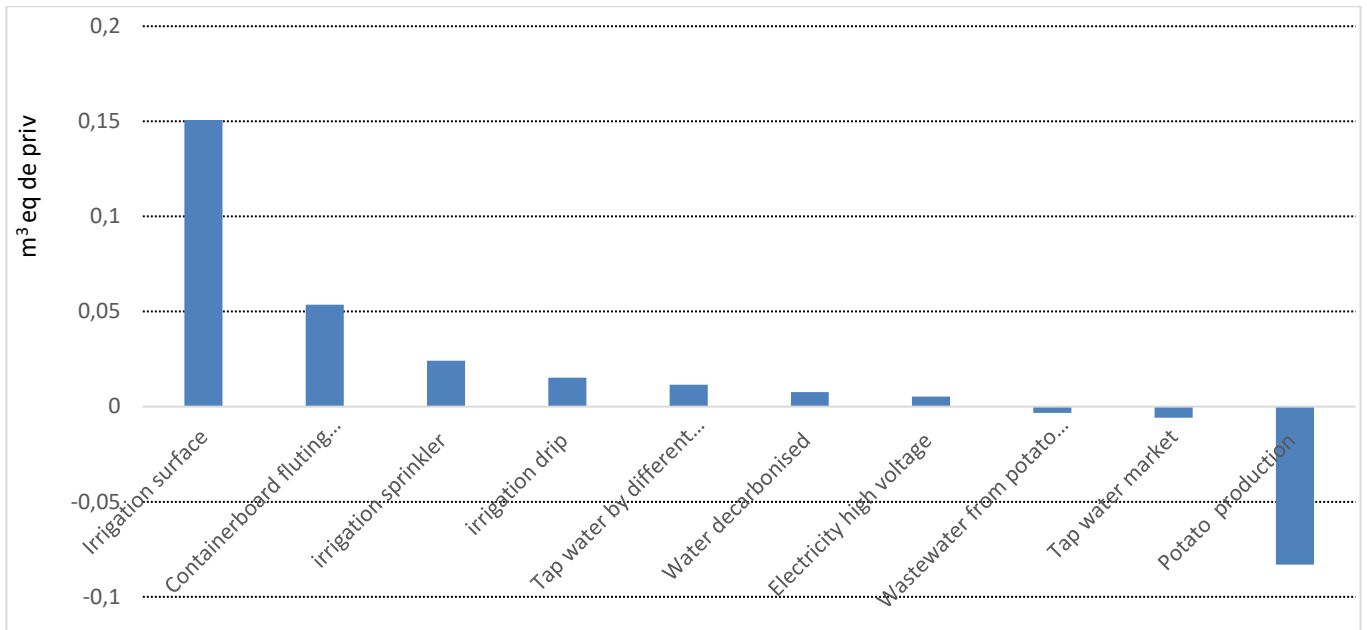
En los gráficos IV, V y VI se puede observar la contribución de los procesos en cada una de las metodologías, siendo la consecuencial, APOS y Cut-Off respectivamente.



**Gráfico IV. Contribución al Proceso Consecuencial.**



**Gráfico V. Contribución al Proceso APOS**



**Gráfico VI. Contribución al Proceso Cut-Off.**

Como se puede observar en los gráficos IV, V, y VI existen muchas diferencias entre los procesos que hacen una mayor o menor contribución entre una metodología y otras, siendo más similares entre sí la APOS y la Cut-Off mientras que la Consecuencial no presenta ninguna similitud a las anteriores.

Sin embargo, en todas ellas se puede ver que han considerado procesos a evitar, aunque son distintos entre sí, explicando de esta forma los valores negativos de las gráficas.

Un hecho interesante entre los tres gráficos, es que para un valor de corte de 0,59 % en la metodología Consecuencial la electricidad no tiene importancia, es más está incluida dentro de los procesos remanentes, mientras que, tanto en la metodología APOS y Cut-Off tiene la novena posición en el primero y la séptima en el segundo.

Otro aspecto a destacar es quién encabeza la contribución a los procesos en cada uno de los casos. En la metodología Consecuencial se encuentra el calor empleado en el ciclo de vida, mientras que, tanto en la metodología APOS y Cut-Off es la superficie de tierra regada cuando en el primero solo aparece como evitado; resulta interesante ver como en el primer caso tiene mayor peso el calor empleado que el área regada, esto puede ser debido a que en el Consecuencial se tiene en cuenta desde la obtención de la materia prima para obtener ese cartón que posteriormente se recicla y se utiliza para obtener nuestro producto objeto de estudio. Si se observa la Figura 4-1, ese calor que aquí es tan importante, es utilizado para acondicionar los trozos de madera seca que se emplean para la obtención de ese cartón virgen antes de ser utilizado y clasificado. Mientras que, en los otros dos, se trata de un residuo el cual todo su ciclo anterior no interesa dando lugar a que se necesite menos calor y de ahí que aparezca para el valor de corte estudiado y mientras que el área regada tiene mayor protagonismo.

A continuación, se van a estudiar brevemente cada uno de los gráficos.

## CONSECUENCIAL

El gráfico IV está ordenado de mayor a menor contribución al proceso Consecuencial.

A la hora de estudiar esto, hay que tener en cuenta que el indicador ambiental empleado son los m³ eq de agua que se privan, es decir, la cantidad de agua que deja de estar disponible. Como se puede observar la mayor contribución es el calor utilizado a lo largo del ciclo vida, es decir, en este caso lo que más genera una privación del agua es el calor empleado en el proceso de producción de cartón, seguido de cartón utilizado para envases (virgen) y siendo los siguientes la producción de agua y el cartón ondulado reciclado, siendo estos dos iguales en valor.

Si se observa el gráfico IV los procesos representados en la parte derecha, se puede ver que hay valores

negativos, es decir, son los  $m^3$  eq de agua que se han evitado privar, ya que dicho proceso no se ha llevado a cabo, en este caso se evita el residuo de cartón clasificado y el área de superficie regada. Con esto se quiere que decir, que al producir un kilo de cartón ondulado reciclado se ha dejado disponible esos  $m^3$  eq de agua (0,092; 0,051 respectivamente) ya que no se han usado para fabricar dicho kilogramo de cartón ondulado reciclado.

## **APOS**

Como se puede observar en el gráfico V, para esta metodología las mayores contribuciones a este indicador son: área de superficie regada, seguida del cartón ondulado reciclado, el agua de grifo utilizada y las distintas técnicas de regadío por aspersores y por regadío.

Sin embargo, en lo que respecta a  $m^3$  eq de agua que se han evitado privar, se encuentran solo el agua residual y la producción de patata. En el caso del agua residual, hace referencia al conjunto de agua que se ha evitado convertir en agua residual, ya sea porque se ha evitado el regar ciertas áreas, el cultivo de patata o agua residual que se puede producir durante los procesos de fabricación.

En lo que respecta a la producción de patata, hay que tener en cuenta que para la fabricación del papel/ cartón se utiliza el almidón, es un blanqueante como se explicó anteriormente, por ello para este caso se hace referencia a toda el agua que se ha evitado utilizar en el dicho proceso al utilizar un kilo de cartón ondulado reciclado-.

## **Cut-off**

Para este caso, al igual que en el APOS se puede observar en el gráfico VII la mayor contribución al sistema es llevada a cabo por la superficie de regadío, seguido por la fabricación del cartón ondulado reciclado y las distintas técnicas de regadío.

Sin embargo, en este caso en lo referente a  $m^3$  eq de agua que se evitan privar se encuentra que la mayor cantidad de privación evitada se encuentra en la producción de patata, seguida del agua del grifo haciéndose referencia a la venta de este y no a la producción del mismo, es decir, se evitan vender esos  $m^3$  eq de agua. Es interesante que mientras en los casos anteriores simplemente se hacía referencia a que se evitaba producir agua residual de una forma u otra, en esta metodología se especifica que la que se evita es la que se produce debido a la producción del almidón de la patata.

# 5 CONCLUSIONES

En última instancia para concluir este Trabajo de Fin de Máster cabe recordar cual era el objetivo del mismo.

El objetivo del proyecto es documentar los diferentes métodos de asignación para el reciclaje en normas y documentos de orientación del ciclo de vida de los productos. Se han evaluado tres métodos, los cuales son: Consecuencial, APOS y Cut-off.

El estudio ha consistido en comprender, comparar y evaluar los distintos métodos de asignación y resultados obtenidos para el producto seleccionado, y así identificar aplicaciones y limitaciones de cada uno, pudiendo posicionarse sobre qué método sería la mejor opción para realizar un análisis de ciclo de vida. De esta forma a la hora de realizar un análisis de ciclo de vida del producto cartón ondulado reciclado en distintas situaciones, ya sea para la toma de decisiones internas o, comunicaciones externas elegir el método más conveniente.

A la hora de desarrollar el proyecto, se utilizó el software SimaPro con la metodología de evaluación de impacto de la Huella Ambiental (3.1) con la que se han estudiado dos categorías ambientales, el cambio climático (kg CO<sub>2</sub>eq) y el uso del agua (m<sup>3</sup> eq de privación del agua) con los que se han obtenido los resultados indicados en la Tabla 5-1 para cada metodología de asignación de emisiones.

Tabla 5-1. Resultados obtenidos.

Metodología	Cambio Climático (kg de CO <sub>2</sub> eq)	Uso del agua (m <sup>3</sup> eq de agua privada)
Consecuencial	1,40	0,716
APOS	0,743	0,26
Cut-off	0,74	0,214

Respecto a los resultados obtenidos, hay que tener en cuenta previamente las diferencias entre cada metodología:

En la metodología Consecuencial se busca describir cómo cambian los flujos que son ambientalmente interesantes como respuesta a las decisiones tomadas, de forma que se identifican cuáles son los procesos más interesantes a destacar. Además, se le da mucha importancia al proceso ya que se tienen en cuenta muchas más etapas, se considera la obtención de las materias primas vírgenes, fabricación del producto, uso del producto y transformación del producto usado en materia prima para obtener el producto reciclado. En consecuencia, se obtengan altas emisiones en ambas categorías ambientales.

En la metodología APOS, es importante destacar que las cargas se distribuyen entre quien genera el residuo y el que lo utiliza como materia prima, es decir, que el material reciclado o residuo que se valoriza va a tener parte de las cargas de las materias primas vírgenes, proceso de fabricación y uso del producto tal y como hemos visto anteriormente.

Por otro lado, en la metodología Cut-Off, se asignan las cargas de los procesos del ciclo de vida, es decir, si la materia prima a utilizar se trata de un residuo en este caso los únicos procesos a tener en cuenta sería el transporte del mismo y en caso de recibir algún tratamiento previo para poder ser utilizado, también incluirían esas emisiones y en caso de que no, solo se incluyen el transporte.

De esta forma se explican las diferencias entre las emisiones entre estas dos últimas metodologías, al dividirse las cargas el método APOS ha resultado tener más emisiones que en la metodología Cut-Off donde solo se consideran las emisiones del transporte y tratamiento como hemos visto en el apartado anterior.

Además de estas conclusiones, otra de las principales conclusiones de carácter general es que todos los métodos

estudiados son difíciles de entender y no son lo suficientemente transparentes.

Por otro lado, de forma intencionada o no, todas tienen opciones de valor, es decir, las opciones estudiadas al tratarse de diferentes formas de proceder conllevarán a resultados distintos a nivel de ciclo de vida, y por tanto también distintas conclusiones acerca del desarrollo del producto.

Ninguno de los métodos estudiados es el ideal para usarse ante cualquier situación, tienen sus ventajas e inconvenientes, pero según el objeto del ACV y el tipo de producto, uno sí puede ser mejor opción para el ámbito estudiado ayudando en la toma de decisiones, como herramienta interna, ACV para comunicaciones externas etc.

A la hora de seleccionar un método, según se ha indicado en la sección 3, se puede tener en cuenta el ‘punto de vista’ de la Comisión Europea, es decir, los resultados obtenidos deben:

- Incentivar al uso de material reciclado, solo debe hacer siempre y cuando el proceso de reciclaje incluyendo la recolección tenga menos impacto que el proceso virgen.
- Dar incentivos a la recogida para reciclaje.
- Mostrar diferencias entre productos en el estante.

En lo que respecta a los tres métodos estudiados y el producto objeto de estudio, la última consideración no se puede tener en cuenta ya que se considera el mismo producto final en los tres métodos y el compararlo con otros productos con misma función queda fuera del alcance de este proyecto. Teniendo en cuenta las otras dos consideraciones, se encuentra que para la metodología consecucional no se cumple ya que el producto estudiado es reciclado y tiene mayor impacto ambiental que en el resto de metodologías por lo que esta opción sería la menos favorable para estos criterios considerados.

En lo que respecta a las metodologías APOS y Cut-OFF, en ambos casos se incentivan al uso de material reciclado, ya que su obtención tiene un menor impacto ambiental que el material virgen.

En lo referente a dar incentivos a la recogida para reciclaje, se puede considerar que el método Cut-Off es más interesante, ya que dentro de este método tal y como se ha indicado anteriormente, se ha considerado que se evita la producción de residuos no clasificados, incluyendo su transporte y su destino final, actos que generan un mayor impacto que la producción del material reciclado mientras que en la metodología APOS esto no se considera.

Por tanto, acorde a estos criterios la mejor opción sería Cut-Off, seguido de APOS y en última instancia Consecucional.

Sin embargo, también está la opción de evaluar los métodos en función de las características que debe tener un ACV como se mencionan en el apartado 3, que son las siguientes:

- Factible, debe de poder utilizarse siempre que se pueda y no solo en un caso determinado.
- Preciso, debe guiar en la dirección correcta o al menos facilitar la toma de decisiones para ir por el camino correcto.
- Comprensible, debe entenderlo cualquiera que tenga acceso a él.
- Inspirador, debe facilitar la toma de decisiones.
- Robusto, es decir, da igual quien lo use se obtienen los mismos resultados.

Teniendo en cuenta estas cinco características, para cada metodología para asignar emisiones se puede decir:

- Consecuencial:

Esta metodología de asignación se puede considerar bastante compleja como ya se vio en la Figura 4-1 ya que se ven numerosos bucles e interconexiones entre cada una de etapas y procesos del ciclo de vida.

Respecto a las características indicadas, se puede decir que es parcialmente robusto, ya que si alguien ajeno al proceso sigue los mismos pasos indicados para llevarlo a cabo podría hacerlo, pero siempre y cuando realizase la misma toma de decisiones que quien hizo el ACV previamente.

Respecto a ser Inspirador y Preciso, si la cumple, sin embargo, puede llevar en la dirección incorrecta como sería no elegir el cartón estriado reciclado pues se han obtenido más emisiones en comparación a los otros dos, 1,49 kg de CO<sub>2</sub> eq por kg de producto frente a los 0,74 kg CO<sub>2</sub> eq que se obtienen en las otras dos metodologías para describir el sistema (es el doble prácticamente). Por tanto, habría que ver las emisiones del cartón estriado virgen, es decir, el obtenido a partir de materias primas mediante esta metodología, si son mayores a las del reciclado o no. Sin embargo, si se observa la Figura 4-1 se puede ver simplemente la obtención del producto virgen tiene menos emisiones que el reciclado, 1,42 kg de CO<sub>2</sub> frente al 1,49 kg de CO<sub>2</sub>. Es cierto que no hay mucha diferencia, sin embargo, esa ligera diferencia es suficiente para que se incentive a no reciclar y usar el material virgen pues con el tiempo tendrá menos emisiones que el material reciclado, siendo esto más perjudicial para el medio ambiente que utilizar el material reciclado.

En lo referente a Comprensible, se ha visto que no lo cumple. En esta metodología se ha tenido que emplear más tiempo para ver qué procesos incluir, cuales no, y cuales con signo negativo y su motivo, por lo que alguien ajeno al proceso no lo entendería por sí mismo.

Por último, haciendo referencia a la característica de factible, no la cumple. A lo largo del proceso se han ido tomando numerosas decisiones y numerosos cambios, por lo que se ha especificado demasiado para una situación dada por lo que no se va a poder utilizar siempre que se quiera.

- APOS y Cut-OFF

En estas dos se van a comparar de forma conjunta al haberse obtenido resultados numéricos próximos, sin embargo, el procedimiento ha sido bastante diferente como se ha podido ver anteriormente.

En ambos casos, se puede ver que cumplen las características de factible, comprensible e inspirador, ya que se tratan de redes muy simples, las cuales son fáciles de entender. Cualquiera que los vea a simple vista puede entenderlos sin llegar a conocer el proceso a fondo, pues son diagramas en su mayoría lineales salvo por pequeños bucles en la parte de energía. Además, como se ha indicado anteriormente invitan a utilizar el cartón reciclado al obtenerse una cantidad tan baja de emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes (0,74).

Aunque en lo respecta a la robustez y precisión, si se encuentran diferencias entre ambos. En el método APOS se cumple parcialmente, ya que también se consideran las materias primas que se utilizan para fabricar por primera vez ese cartón que terminará siendo el residuo que se utilizará para fabricar esa caja de cartón estriado reciclado, haciéndolo ligeramente más complejo y si el individuo no tiene esto en cuenta posiblemente no se obtenga el mismo resultado.

En lo que respecta al método Cut-Off es el más sencillo y simple de las tres. En este caso se cumplen tanto la robustez como la precisión ya que la única complejidad del estudio es tener en cuenta los residuos evitados y el transporte de los mismos al tomar la decisión de reciclar el cartón y utilizarlo como materia prima, hecho el cual un individuo ajeno al proceso sabe que ocurre y quiere que se dé ya que por eso recicla.

Sin embargo, observando los tres ACV, el Consecuencial es mucho más completo frente al APOS y Cut-off; aporta mucha más información del ciclo y ayuda en la toma de decisiones internas a la hora de utilizar un producto reciclado, ya que se estudia desde la obtención de la materia prima para obtener el producto que luego será materia prima para nuestro producto objeto de estudio. Mientras que, en los otros casos todo lo anterior no se considera, es como una 'caja negra' donde todo lo anterior no interesa, la atención está en el residuo que se emplea como materia prima para obtener el producto estudiado.



Teniendo en cuenta los resultados obtenidos para cada categoría ambiental, la opción menos favorable es la metodología Consecuencial, seguido del APOS y, por último, y por tanto más favorable según las categorías ambientales es el método Cut-Off.

En lo referente en los pasos a seguir, el Cut-off es mucho más sencillo y fácil de comprender que el método APOS, resultando más interesante Cut-off teniendo en cuenta los productos evitados como es el cartón que acaba en un centro distinto al de clasificación y el del mismo transporte.

Además, a la hora de aplicar una metodología u otra, es importante tener en cuenta la información que se tenga disponible, debido a que:

- Si tenemos toda la información y es de calidad, desde la obtención de las materias primas del producto virgen y se puede hacer un seguimiento de todas las emisiones desde ahí hasta el producto objetivo, se puede llevar a cabo el consecuencial, pero este estudio va a ser muy específico por lo que no vale para otra situación.
- Si no se tiene tanta información del proceso desde las materias primas del producto virgen hasta llegar al reciclado, es mejor opción utilizar el APOS, ya que como hemos visto en este caso se tienen en cuenta, pero no se llega al detalle del consecuencial y es más simple.
- En el caso de tener menos información disponible o no se necesita incluir tanto detalle del origen de las materias primas del residuo que se utiliza como materia prima o simplemente no se necesita esa información, es mejor opción el Cut-off.

En conclusión, no se puede decir que metodología de asignación de emisiones es mejor opción para una misma evaluación de impactos aplicada a un mismo producto, ya que todos tienen opciones de valor por lo que en función de las decisiones tomadas se puede llegar a un resultado u otro o incluso a uno totalmente distinto a los indicados en este proyecto; en lo que respecta a incentivar el material reciclado e incentivar el reciclaje se ha visto que hay dos métodos que lo favorecen siendo más convenientes si nos basamos en esos criterios a la hora de elegir una metodología. Sin embargo, en lo correspondiente a las características que tiene un ACV ninguna de las opciones estudiadas cumple las cinco características al completo, aunque si se ha visto que la metodología Cut.off la cumple en mayor proporción, aunque con ciertos inconvenientes como se mencionaron anteriormente. Por último, habría que tener en cuenta a la hora de elegir una metodología u otra, cuál es el objetivo del estudio, a quien va destinado y el uso que se le va a dar ya que como se ha visto algunas metodologías favorecen más unas consideraciones u otras.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

ALLACKER, K., MATHIEUX, F., PENNINGTON, D. y PANT, R., 2017. The search for an appropriate end-of-life formula for the purpose of the European Commission Environmental Footprint initiative. *The International Journal of Life Cycle Assessment* [en línea], vol. 22, no. 9, [consulta: 23 julio 2023]. ISSN 0948-3349, 1614-7502. DOI 10.1007/s11367-016-1244-0. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/s11367-016-1244-0>.

ANSORGE, L. y BERÁNKOVÁ, T., 2017. LCA WATER FOOTPRINT AWARE CHARACTERIZATION FACTOR BASED ON LOCAL SPECIFIC CONDITIONS. *European Journal of Sustainable Development* [en línea], vol. 6, no. 4, [consulta: 8 octubre 2023]. ISSN 22395938, 22396101. DOI 10.14207/ejsd.2017.v6n4p13. Disponible en: <https://ecsdev.org/ojs/index.php/ejsd/article/view/543/540>.

ARECO, 2021. The circular footprint formula (CCF), the EU methodology to credit for circular strategies. *ARECO* [en línea]. [consulta: 24 julio 2023]. Disponible en: <https://areco.org.es/en/the-circular-footprint-formula/>.

CADIS, 2022. ...:CADIS:... *Center for Life Cycle Assessment and Sustainable Design* [en línea]. [consulta: 19 julio 2023]. Disponible en: [https://www.centroacv.mx/simapro\\_en.php](https://www.centroacv.mx/simapro_en.php).

COMISIÓN EUROPEA, 2021. European Platform on LCA | EPLCA. [en línea]. [consulta: 24 julio 2023]. Disponible en: <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/EnvironmentalFootprint.html>.

COMISION EUROPEA, 2023. Environmental Footprint methods. [en línea]. [consulta: 29 julio 2023]. Disponible en: [https://green-business.ec.europa.eu/environmental-footprint-methods\\_en](https://green-business.ec.europa.eu/environmental-footprint-methods_en).

DIRECTOR GENERAL DE MEDIO AMBIENTE, 2021. Recommendation on the use of Environmental Footprint methods. [en línea]. [consulta: 29 julio 2023]. Disponible en: [https://environment.ec.europa.eu/publications/recommendation-use-environmental-footprint-methods\\_en](https://environment.ec.europa.eu/publications/recommendation-use-environmental-footprint-methods_en).

EIA, 2009. IEA – International Energy Agency. *IEA* [en línea]. [consulta: 8 octubre 2023]. Disponible en: <https://www.iea.org/stats/electricitydata.asp>.

EKVALL, T., 2000. A market-based approach to allocation at open-loop recycling. *Resources, Conservation and Recycling* [en línea], vol. 29, no. 1-2, [consulta: 23 julio 2023]. ISSN 09213449. DOI 10.1016/S0921-3449(99)00057-9. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344999000579>.


EKVALL, T., BJÖRKLUND, A., SANDIN, G. y LAGE, J., 2020. Modeling recycling in life cycle assessment.

EKVALL, T., TILLMAN, A.-M. y MOLANDER, S., 2005. Normative ethics and methodology for life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production* [en línea], vol. 13, no. 13-14, [consulta: 8 octubre 2023]. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2005.05.010. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652605001149>.

EUROPEAN COMMISSION, 2014. Welcome to the Life Cycle Data Network -. [en línea]. [consulta: 8 octubre 2023]. Disponible en: <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/index.xhtml>.

EUROPEAN COMMISSION. JOINT RESEARCH CENTRE. INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY., 2010. *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook :general guide for life cycle assessment : detailed guidance*. [en línea]. LU: Publications Office. [consulta: 8 octubre 2023]. Disponible en: <https://data.europa.eu/doi/10.2788/38479>.

FINNVEDEN, G., HAUSCHILD, M.Z., EKVALL, T., GUINÉE, J., HEIJUNGS, R., HELLWEG, S., KOEHLER, A., PENNINGTON, D. y SUH, S., 2009. Recent developments in Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management* [en línea], vol. 91, no. 1, [consulta: 22 julio 2023]. ISSN 03014797. DOI 10.1016/j.jenvman.2009.06.018. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479709002345>.

GISCI, 2022. Análisis del ciclo de vida (ACV) . [en línea]. [consulta: 24 enero 2023]. Disponible en: <https://blogs.upm.es/gisci/analisis-del-ciclo-de-vida-acv-una-guia-completa-de-los-acv/>.

GOEDKOOP, M., OELE, M., MEIJER, E. y PONSIOEN, 2016. *Introduction To LCA* [en línea]. 2016. S.I.:

s.n. Disponible en: [www.pre-sustainability.com](http://www.pre-sustainability.com).

GÖTEBORG, 2014. *Evaluation of recycling and allocation methods for paper*. 2014. S.l.: s.n.

GUINÉE, J.B. y LINDEIJER, E., 2002. *Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards*. Dordrecht: Kluwer. Eco-efficiency in industry and science, 7, ISBN 978-1-4020-0228-1.

Ik ingeniería | Análisis de Ciclo de Vida - ACV. [en línea], 2023. [consulta: 23 enero 2023]. Disponible en: <https://www.ik-ingenieria.com/es/analisis-ciclo-vida-acv>.

INESCOP, 2021. *Informe-de-ACV.pdf*. 2021. S.l.: s.n.

LEGRO, M., 2023a. ¿Cómo se fabrica el cartón? Lo explicamos paso a paso. *Legro* [en línea]. [consulta: 8 octubre 2023]. Disponible en: <https://legro.es/como-se-fabrica-carton-paso-a-paso/>.

LEGRO, M., 2023b. ¿Cómo se recicla el cartón? Proceso, beneficios y retos. *Legro* [en línea]. [consulta: 8 octubre 2023]. Disponible en: <https://legro.es/como-se-recicla-carton-proceso-beneficios/>.

PRÉ SUSTAINABILITY, 2023. Environmental Footprint database. *SimaPro* [en línea]. [consulta: 29 julio 2023]. Disponible en: <https://simapro.com/products/environmental-footprint-database/>.

ROMERO DÍAZ DE ÁVILA, M.T., 2007. *ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV) HERRAMIENTA DE GESTIÓN*. 2007. S.l.: EOI Escuela de Negocios. PDF

RUIZ AMADOR, D. y ZUÑIGA LOPEZ, 2012. *Analisis de ciclo de vida y huella de carbono*. Primera. S.l.: UNED. ISBN 978-84-362-6563-7.

SANZ TEJEDOR, A., 2023. Química Orgánica Industrial. [en línea]. [consulta: 8 octubre 2023]. Disponible en: <https://www.eii.uva.es/organica/qoi/tema-03.php>.

SCHRIJVERS, D.L., LOUBET, P. y SONNEMANN, G., 2016. Developing a systematic framework for consistent allocation in LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment* [en línea], vol. 21, no. 7, [consulta: 23 julio 2023]. ISSN 0948-3349, 1614-7502. DOI 10.1007/s11367-016-1063-3. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/s11367-016-1063-3>.

SIMAPRO, 2023. SimaPro | LCA software for informed changemakers. *SimaPro* [en línea]. [consulta: 19 julio 2023]. Disponible en: <https://simapro.com/>.

System Models - ecoinvent. [en línea], 2020. [consulta: 24 julio 2023]. Disponible en: <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/system-models/>.

VALLEJO, A., 2004. *Utilización del Análisis del ciclo de vida en la evaluación del impacto ambiental del cultivo bajo invernadero mediterráneo*. [en línea]. 2004. S.l.: Universitat Politècnica de Catalunya. Disponible en: <http://hdl.handle.net/2117/94137>.

VÁZQUEZ, A., 2005. Análisis de ciclo de vida aplicado a sistemas de ablandamiento del agua. ,

WEIDEMA, B., 2003. *Life-cycle-assessment.pdf*. 2003. S.l.: s.n.

WERNET, G., BAUER, C., STEUBING, B., REINHARD, J., MORENO-RUIZ, E. y WEIDEMA, B., 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment* [en línea], vol. 21, no. 9, [consulta: 23 julio 2023]. ISSN 0948-3349, 1614-7502. DOI 10.1007/s11367-016-1087-8. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/s11367-016-1087-8>.

WILLIAMS, E. y EIKENAAR, S., 2022. Finding your way in multifunctional processes and recycling. *PRé Sustainability* [en línea]. [consulta: 19 julio 2023]. Disponible en: <https://pre-sustainability.com/articles/finding-your-way-in-allocation-methods-multifunctional-processes-recycling/>.

WULCA, 2023. What is AWARE (Available WATER REMaining)? *WULCA* [en línea]. [consulta: 8 octubre 2023]. Disponible en: <https://wulca-waterlca.org/aware/what-is-aware/>.

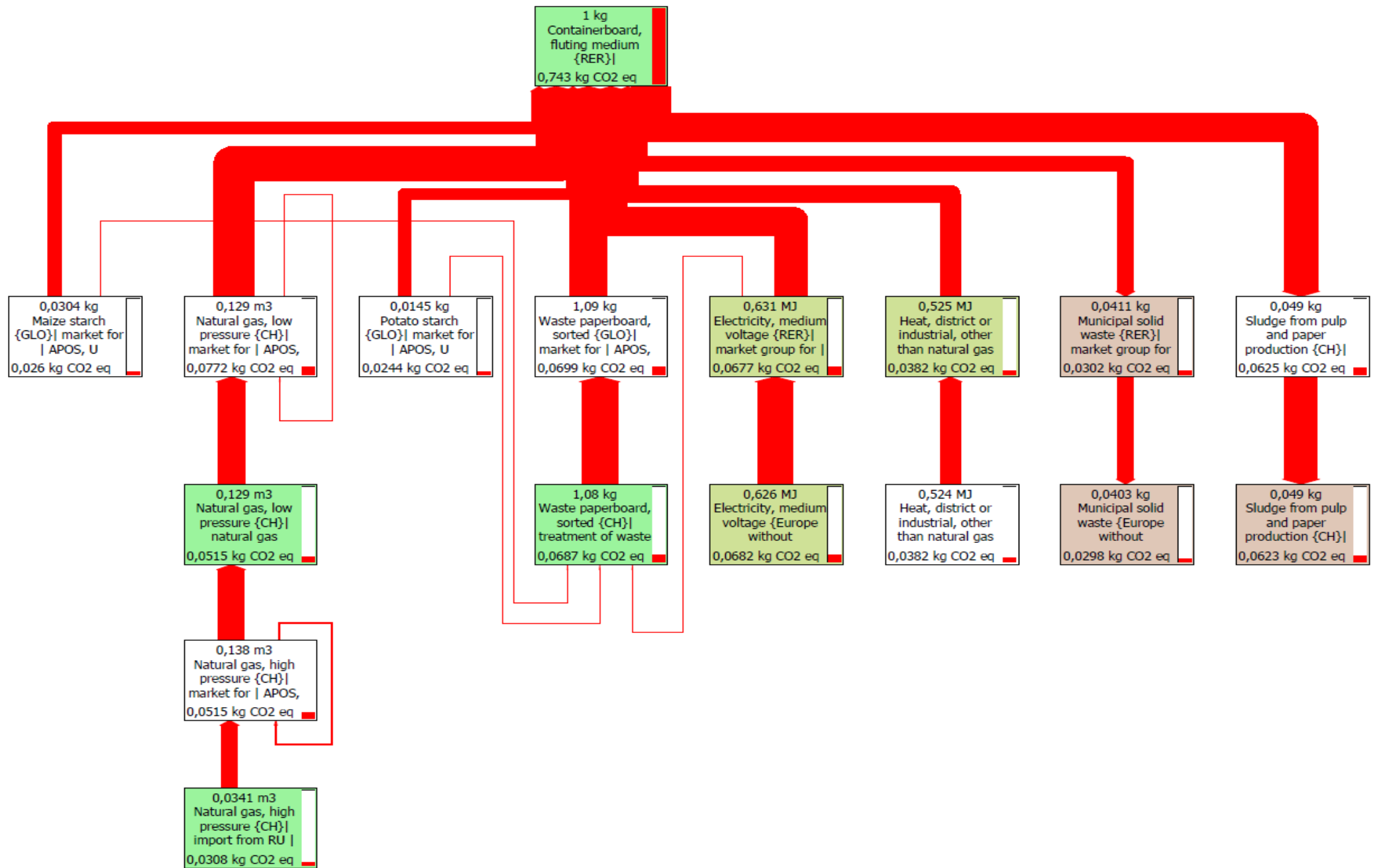
## 7 ANEXOS

---

**Red de Metodología Consecuencial para Cambio Climático (kg CO<sub>2</sub>e/kg de producto)**

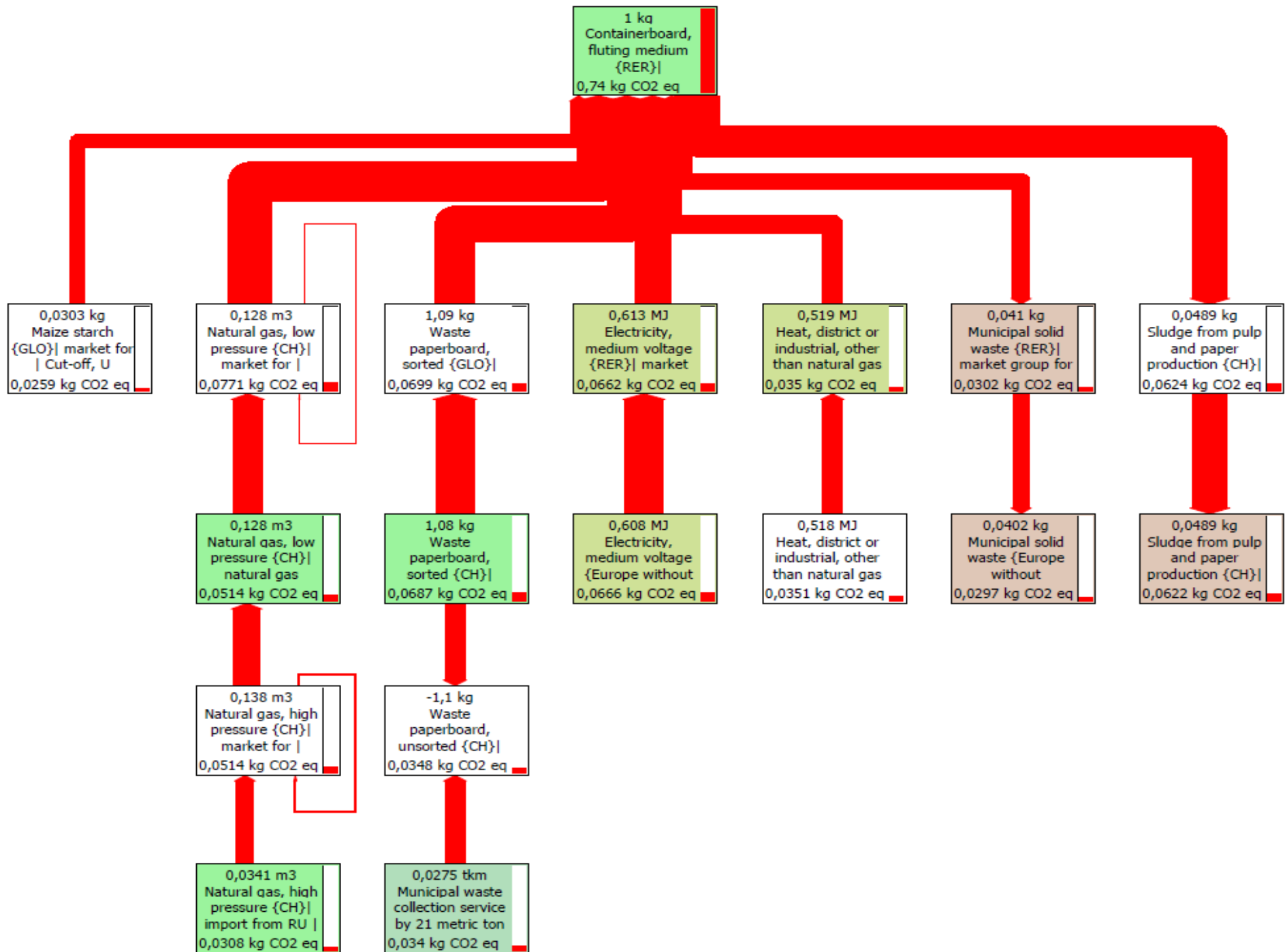


**Red de Metodología APOS para Cambio Climático (kg CO<sub>2e</sub>q/ kg de producto)**





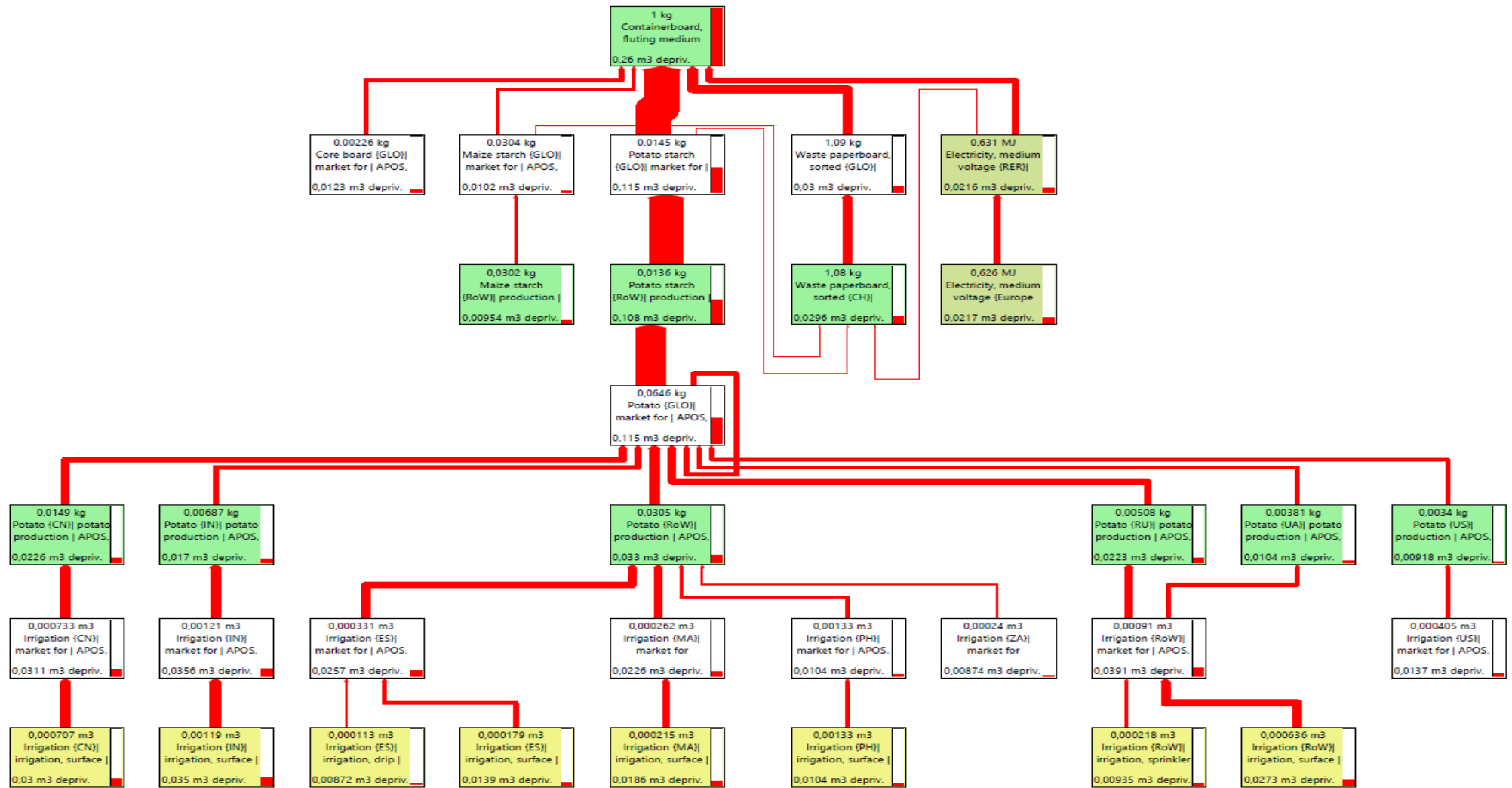
**Red de Metodología Cut-Off para Cambio Climático (kg CO<sub>2e</sub>q/ kg de producto)**



**Red de Metodología Consecuencial para Uso del agua (m<sup>3</sup> eq de agua privada / kg de producto)**



**Red de Metodología APOS para Uso del agua (m<sup>3</sup> eq de agua privada / kg de producto)**



**Red de Metodología Cut-Off para Uso del agua (m<sup>3</sup> eq de agua privada / kg de producto)**

