Escuela de Caminos
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
UPC BARCELONATECH

TRABAJO FINAL DE MASTER

Economía circular en el sector porcino: Evaluación de ciclo de vida de la producción de carne de cerdo

Trabajo realizado por:
Fredd Oliver Sanchez Gutierrez

Dirigido por:
Dra. Gemma Cervantes Torre-Marín

Máster en:
Ingeniería Ambiental

Barcelona, 27 de junio de 2023

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

Resumen

La industria porcina en Cataluña tiene un papel destacado y representativo en el sector porcino español. Más allá de los beneficios económicos, las prácticas convencionales en la industria porcina también implican una serie de impactos ambientales que deben abordarse, entre ellos la pérdida de alimentos en diferentes etapas. Dentro de la cadena de suministro de la carne, los mataderos contribuyen en gran medida a la pérdida de alimentos y, con el aumento de la población, la industrialización y la urbanización, la gestión de los subproductos animales de estas instalaciones se convierte en un gran desafío en el marco de la economía circular.

En este contexto, se evaluó el desempeño ambiental de la producción de carne de cerdo en Cataluña, utilizando la metodología de análisis del ciclo de vida (ACV) con datos reales de un matadero, teniendo en cuenta una unidad funcional de 1 kg de carne de cerdo saliente.

Los resultados de la evaluación ambiental mostraron un impacto al cambio climático (CC) de 8,38 kg CO2-eq por kg de carne de cerdo. La Eutrofización de agua dulce (EA) y Eutrofización marina se estimaron en 1,79 g P-eq y 9,59 g N-eq por kg de carne de cerdo respectivamente, mientras que la Acidificación terrestre (AT) mostró un valor de 87,4 g SO2-eq por kg de carne de cerdo.

El análisis de los resultados mostró al suministros de materia prima (cerdo para sacrificio) como el proceso de mayor contribución a la carga ambiental en casi todas las categorías de impacto evaluadas (con valores que van del 89% al 99% según la categoría). Esto se asoció principalmente a los requerimientos de alimentación (piensos) y las implicancias de la crianza porcina en las granjas, dado que, de acuerdo a la literatura los principales impactos derivados de la producción de carne independientemente del tipo de carne están relacionados con las actividades agropecuarias.

Además, se encontró que el suministro eléctrico tuvo la segunda mayor influencia en las categorías de impacto evaluadas con un aporte superior al 11% en la categoría de radiación ionizante (RI), así como una contribución importante en la categorías de impacto de CC (0,5%). Seguido de las emisiones derivadas del requerimiento de agentes de limpieza, el cual dio una contribución destacable en eutrofización de agua dulce. Estos resultados se encontraron en línea con otros estudios europeos de producción de carne de cerdo. Por otro lado, las contribuciones relacionadas con los residuos de matadero fueron menos significativas en relación a los impactos ambientales totales, siendo el 0.3% en términos de Cambio climático (CC) total e insignificante en las demás categorías analizadas, donde los huesos y grasa, sangre y purín fueron los residuos de mayor contribución al resultado.

En respuesta a estos resultados, se propusieron estrategias de cierre de ciclo basados en los principios de la economía circular y ecología industrial, permitiendo al sector optimizar los flujos de materia. Si bien los mataderos valorizan la mayor parte de los subproductos, identificamos que existen soluciones innovadoras en términos de valorización que ofrecen un alto valor agregado para el aprovechamiento más eficiente. En este marco, se formularon 30 diferentes valorizaciones para 21 partes y residuos del cerdo derivados del matadero, los que se ubican en áreas tan variadas como la alimentación, PETfood, farmacéutica, biotecnología, biomédica, química y energética.

Palabras clave: Producción porcina, carne de cerdo, matadero, ACV, economía circular.

Abstract

The pig industry in Catalonia has a prominent and representative role in the Spanish pig sector. Beyond the economic benefits, conventional practices in the pork industry also entail a number of environmental impacts that need to be addressed, including loss of feed at different stages. Within the meat supply chain, slaughterhouses are a major contributor to food loss, and with increasing population, industrialization, and urbanization, the management of animal by-products from these facilities becomes a major concern. challenge within the framework of the circular economy.

In this context, the environmental performance of pork production in Catalonia was evaluated, using the life cycle analysis (LCA) methodology with real data from a slaughterhouse, taking into account a functional unit of 1 kg of pork meat. outgoing pig.

The results of the environmental assessment showed an impact on climate change (CC) of 8.38 kg CO2-eq per kg of pork. Freshwater Eutrophication (EA) and Marine Eutrophication were estimated at 1.79 g P-eq and 9.59 g N-eq per kg of pork respectively, while Terrestrial Acidification (AT) gave a value of 87 .4 g SO2-eq per kg of pork.

The analysis of the results showed the supply of raw material (pig for slaughter) as the process with the greatest contribution to the environmental load in almost all the impact categories evaluated (with values ranging from 89% to 99% depending on the category). This was mainly associated with feeding requirements (feed) and the implications of pig rearing on farms, given that, according to the literature, the main impacts derived from meat production, regardless of the type of meat, are related to activities. agricultural.

In addition, it was found that the electrical supply had the second largest influence in the impact categories evaluated with a contribution greater than 11% in the ionizing radiation (IR) category, as well as a significant contribution in the DC impact categories (0 ,5%). Followed by the emissions derived from the requirement of cleaning agents, which gave a notable contribution in freshwater eutrophication. These results were found in line with other European studies of pork production. On the other hand, the contributions related to slaughterhouse waste were less significant in relation to the total environmental impacts, being 0.3% in terms of total Climate Change (CC) and insignificant in the other categories analyzed, where bones and fat, blood and slurry were the residues with the greatest contribution to the result.

In response to these results, cycle closure strategies were proposed based on the principles of circular economy and industrial ecology, allowing the sector to optimize material flows. Although slaughterhouses value most of the by-products, we have identified that there are innovative solutions in terms of recovery that offer high added value for more efficient use. Within this framework, 30 different valuations were formulated for 21 parts and pig waste derived from the slaughterhouse, which are located in areas as varied as food, PETfood, pharmaceutical, biotechnology, biomedical, chemical and energy.

Keywords: Pig production, pork meat, slaughterhouse, LCA, circular economy.

Resum

La indústria porcina a Catalunya té un paper destacat i representatiu al sector porcí espanyol. Més enllà dels beneficis econòmics, les pràctiques convencionals a la indústria porcina també impliquen una sèrie d'impactes ambientals que cal abordar, entre ells la pèrdua d'aliments en diferents etapes. Dins la cadena de subministrament de la carn, els escorxadors contribueixen en gran mesura a la pèrdua d'aliments i, amb l'augment de la població, la industrialització i la urbanització, la gestió dels subproductes animals d'aquestes instal·lacions es converteix en un gran desafiament en el marc de leconomia circular.

En aquest context, es va avaluar l'exercici ambiental de la producció de carn de porc a Catalunya, utilitzant la metodologia d'anàlisi del cicle de vida (ACV) amb dades reals d'un escorxador, tenint en compte una unitat funcional d'1 kg de carn de porc sortint.

Els resultats de l'avaluació ambiental van mostrar un impacte al canvi climàtic (CC) de 8,38 kg CO2-eq per kg de carn de porc. L'Eutrofització d'aigua dolça (EA) i Eutrofització marina es van estimar en 1,79 g P-eq i 9,59 g N-eq per kg de carn de porc respectivament, mentre que l'Acidificació terrestre (AT) va donar un valor de 87 ,4 g SO2-eq per kg de carn de porc.

L'anàlisi dels resultats va mostrar al subministrament de matèria primera (porc per a sacrifici) com el procés de major contribució a la càrrega ambiental en gairebé totes les categories d'impacte avaluades (amb valors que van del 89% al 99% segons la categoria). Això es va associar principalment als requeriments d'alimentació (pinsos) i les implicacions de la criança porcina a les granges, atès que, d'acord amb la literatura, els principals impactes derivats de la producció de carn independentment del tipus de carn estan relacionats amb les activitats. agropecuàries.

A més, es va trobar que el subministrament elèctric va tenir la segona major influència en les categories d'impacte avaluades amb una aportació superior a l'11% a la categoria de radiació ionitzant (RI), així com una contribució important a les categories d'impacte de CC (0 ,5%). Seguit de les emissions derivades del requeriment dagents de neteja, el qual va donar una contribució destacable en eutrofització daigua dolça. Aquests resultats es van trobar en línia amb altres estudis europeus de producció de carn de porc. D'altra banda, les contribucions relacionades amb els residus d'escorxador van ser menys significatives en relació amb els impactes ambientals totals, sent el 0.3% en termes de Canvi climàtic (CC) total i insignificant en les altres categories analitzades, on els ossos i el greix, sang i purí van ser els residus de més contribució al resultat.

En resposta a aquests resultats, es van proposar estratègies de tancament de cicle basats en els principis de l'economia circular i l'ecologia industrial, permetent al sector optimitzar els fluxos de matèria. Si bé els escorxadors valoren la major part dels subproductes, identifiquem que hi ha solucions innovadores en termes de valorització que ofereixen un alt valor agregat per a l'aprofitament més eficient. En aquest marc, es van formular 30 diferents valoritzacions per a 21 parts i residus del porc derivats de l'escorxador, els que s'ubiquen en àrees tan variades com l'alimentació, PETfood, farmacèutica, biotecnologia, biomèdica, química i energètica.

Paraules clau: Producció porcina, carn de porc, escorxador, ACV, economia circular.

Contenido

Resumen **2**

Abstract **3**

Resum **4**

Índice de figuras **7**

Índice de tablas **8**

Símbolos y acrónimos **9**

Agradecimientos **10**

1. Introducción **11**

1.1. Justificación *11*

1.2. Preguntas de investigación *11*

1.3. Objetivos del estudio *12*

1.4. Alcance del estudio *12*

2. Antecedentes **12**

2.1. Ecología industrial *12*

2.2. Economía Circular *13*

2.2.1. Contribución de la economía circular al desarrollo sostenible 14

2.2.2. Economía circular en una perspectiva de ciclo de vida para el sector alimentario 15

2.3. El sistema de producción de carne de cerdo *15*

2.3.1. El sector porcino en el mundo 15

2.3.2. El sector porcino en España 16

2.3.3. El sector porcino en Cataluña 16

2.3.4. Repercusiones ambientales del sector 17

2.3.5. Proceso productivo de un matadero 17

2.3.6. Marco normativo para la valorización del sector cárnico 19

2.3.7. Valorización de subproductos 19

2.4. El ACV como herramienta de medición *20*

2.4.1. Marco metodológico 20

2.4.2. Métodos de evaluación de impacto 25

2.4.3. Software para el ACV 26

2.5. Estado del arte de estudios previos de ACV en la producción porcina *27*

3. Metodología **29**

3.1. Revisión de antecedentes *29*

3.2. Trabajo de campo *30*

3.3. Elaboración del diagrama de flujo de los mataderos tipo *30*

3.4. Recopilación de la valorización de residuos *31*

3.5. Análisis de ciclo de vida *31*

3.5.1. Definición de objetivo y alcance 31

3.5.2. Análisis del inventario de ciclo de vida 32

3.5.3. Evaluación del impacto 32

3.5.4. Interpretación de resultados 32

3.6. Propuesta de estrategias para el cierre del ciclo 32

4. Resultados 33

4.1. Resultados del análisis de un matadero de cerdos tipo 33
4.1.1. Diagrama de flujo de proceso productivo 33
4.1.2. Diagrama de sinergias 35

4.2. Análisis de ciclo de vida 38
4.2.1. Objetivo y alcance del ACV 38
4.2.2. Análisis del inventario de ciclo de vida 40
4.2.1. Evaluación e interpretación del impacto ambiental 42
4.2.2. Discusión 46

4.3. Propuesta de estrategias para el cierre de ciclo 49
4.3.1. Estudio de posibles valorizaciones de residuos 49
4.3.2. Propuestas de nuevas posibilidades de valorización 53
4.3.3. Discusión 58

5. Conclusiones 60

6. Bibliografía 62

7. Anexos 69

Índice de figuras

Figura 1. Porcentaje de producción de carne de cerdo en la UE durante el año 2021 (fuente: Eurostat) 16

Figura 2. Evolución del sacrificio de ganado porcino y del peso de la canal en Cataluña durante el período 2016 -2021 (fuente: DACC). 17

Figura 3. marco metodológico de un ACV según ISO 14040 21

Figura 4. Esquema de las etapas de EICV según la norma ISO 14040.....23

Figura 5. Esquema de las categorías de impacto medio e impacto final (UNEP, 2011).....25

Figura 6. Número acumulado de estudios de ACV centrados en la producción porcina. Fuente: Andretta et al., 2021. 27

Figura 7. Codigo de colores para el diagrama de sinergias. Fuente: Lule y Cervantes (2010) 30

Figura 8. Flujo de proceso de operaciones unitarias de un matadero tipo 33

Figura 9. Diagrama de sinergias existentes del matadero de cerdos tipo.....36

Figura 10. Ubicación del sistema de producción de carne de de cerdo (Cataluña, España). 38

Figura 11. Definición y límites del sistema de producción estudiado incluyendo los principales procesos involucrados.....39

Figura 12. Aportes (en %) de los procesos involucrados en la producción de carne de cerdo en un matadero tipo a las categorías de impacto. Siglas de las categorías de impacto: CC = cambio climático; RI = radiación ionizante; AT = acidificación terrestre; EA = eutrofización de agua dulce; EM = eutrofización marina; ECT = Ecotoxididad terrestre; ECA = Ecotoxididad de agua dulce; ECM = Ecotoxididad marina; TH-C = toxicidad humana cancerígena; TH-NC = toxicidad humana no cancerígena; RF = agotamiento de recursos fósiles; CA = agotamiento de agua. 43

Figura 13. Aportes (en %) de los procesos involucrados en la produccion de carne de cerdo en un matadero tipo a las categorias de impacto, excluyendo la materia prima (cerdo para sacrificio). Siglas de las categorías de impacto: CC = cambio climático; RI = radiación ionizante; AT = acidificación terrestre; EA = eutrofización de agua dulce; EM = eutrofización marina; ECT = Ecotoxididad terrestre; ECA = Ecotoxididad de agua dulce; ECM = Ecotoxididad marina; TH-C = toxicidad humana cancerígena; TH-NC = toxicidad humana no cancerígena; RF = agotamiento de recursos fósiles; CA = agotamiento de agua. 44

Figura 14. Sinergias propuestas para el proceso de valorizacion de residuos de matadero de cerdos tipo ..56

Índice de tablas

Tabla 1. *Resumen de la clasificación de los subproductos animales y productos derivados.* 19

Tabla 2. *Principales categorías de impacto ambiental contempladas por la SETAC (Sociedad de Toxicología y Química Ambiental).* 23

Tabla 3. *Características de algunos métodos de ACV.* 26

Tabla 4. *Características de algunos softwares de ACV.* 27

Tabla 5. *Resumen de entradas y salidas del proceso productivo de un matadero tipo.* 34

Tabla 6*. Listado de empresas de valorización en las que van a parar algunos de los subproductos del matadero de cerdos visitado.* 35

Tabla 7. *Inventario de datos resumidos del sistema de producción de carne de cerdo en un matadero por unidad funcional (1 kg de carne de cerdo saliente).* 41

Tabla 8. *Resultados de la evaluación de impacto por UF (1 kg de carne de cerdo saliente) asociado a la producción de carne de porcino en un matadero tipo.* 42

Tabla 9. *Comparación de resultados de la evaluación de impacto asociados a matadero en la producción de carne de porcino en diferentes paises europeos.* 47

Tabla 10. *Resumen de las aplicaciones más comunes de los residuos derivados de la producción de carne de cerdo* 49

Tabla 11. *Resumen de las aplicaciones más comunes de los residuos derivados de la producción de carne de cerdo (Continuación)* 50

Tabla 12*. Principales flujos residuales, su manejo actual y propuesta de nuevos procesos de valorización de matadero de cerdos tipo* 53

Tabla 13. *Principales flujos residuales, su manejo actual y propuesta de nuevos procesos de valorización de matadero de cerdos tipo (continuación)* 54

Símbolos y acrónimos

ACV	Análisis de Ciclo de Vida
CV	Ciclo de Vida
COT	Carbono Orgánico Total
DS	Desarrollo Sostenible
DACC	Departament d'Acció Climàtica, Alimentació i Agenda Rural
DQO	Demanda Química de Oxígeno
EI	Ecología Industrial
EC	Economía Circular
EE	Economía Ecológica
EICV	Evaluación de Impactos del Ciclo de Vida
FEM	Fundación Ellen Macarthur
ICV	Inventario de Ciclo de Vida
PCG	Potencial de Calentamiento Global
PA	Potencial de Acidificación
PE	Potencial de Eutrofización
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
UE	Unión Europea

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a Dios y mi familia, por acompañarme en esta etapa de mi vida y apoyarme en cada una de las decisiones tomadas. Especialmente a mi madre Martha y hermana Zulma, por creer en mí y ser mi mayor motivación. Sin ellos, la educación, los valores transmitidos y sus consejos no podría haber llegado hasta aquí.

Agradecer a Patel S.A.U, y concretamente a Jordi Torres del departamento de calidad, por haber accedido a realizar una visita guiada y facilitarme la información que ha sido esencial para realizar este proyecto. También a la Universidad Politécnica de Cataluña por darme las herramientas y el recurso computacional indispensable para el desarrollo y la consecución de este proyecto.

Mi más sincero agradecimiento a mi tutora Gemma Cervantes por su apoyo constante, sus enseñanzas, su tiempo y dedicación en este proyecto. Siempre estaré agradecido por la confianza que ha depositado en mí y por haberme dado la oportunidad de aprender y profundizar más en un ámbito que me apasiona como es el ACV.

Quiero agradecer también a mi novia Edita, por su motivación constante, su alegría y estar ahí desde el inicio de este proyecto. De igual modo, agradecer a mis amigos, por valorarme y tener paciencia suficiente para aguantar en momentos de estrés. Durante esta etapa he conocido a compañeros y hecho amigos que han hecho el transcurso del máster más ameno y han ayudado a que esta tesis sea hoy una realidad.

Finalmente, es justo expresar mi agradecimiento a PRONABEC, por haberme brindado la oportunidad de cumplir mi sueño de estudiar en una ciudad tan vanguardista como Barcelona.

1. Introducción

1.1. Justificación

Las tasas actuales de crecimiento demográfico y de consumo amenazan la capacidad de carga del planeta. Las Naciones Unidas estiman el crecimiento de la población mundial en 11.200 millones de personas para el año 2100, por lo que la demanda de carne seguirá incrementando con el transcurso de los años. Esto provoca la necesidad de una mayor oferta por parte de las empresas ganaderas para satisfacer la demanda, lo que conlleva un aumento en la producción y explotación de animales de granja, entre ellos el porcino. Lo que, a su vez, provoca que la concentración de la producción y el mayor aumento de las explotaciones porcinas acreciente el problema medioambiental, entre ellos, la generación de desechos a lo largo de la cadena de suministro. Por lo tanto, prevenir la pérdida de alimentos de origen animal es una forma más impactante de lograr una economía más eficiente en el uso de los recursos.

La producción de carne de cerdo se caracteriza por un impacto desfavorable sobre el medio ambiente, siendo el segundo mayor contribuyente de las emisiones de GEI del sector ganadero, lo que destaca la necesidad de evaluar los impactos ambientales relacionados con la cadena de suministro de carne de cerdo.

La cadena de suministro de la carne genera desperdicio y pérdida de alimentos en diferentes etapas. Sin embargo, se produce una cantidad considerable durante la etapa de sacrificio, donde el animal se procesa en partes comestibles y no comestibles, lo que da como resultado muchos subproductos animales. Los mataderos contribuyen en gran medida al problema general de la pérdida de alimentos y, con el aumento de la población, la industrialización y la urbanización, la gestión de los subproductos animales de estas instalaciones se convierte en un gran desafío.

En este proyecto se llevará a cabo un análisis exhaustivo del proceso de producción de la carne de cerdo a través de la literatura y de la información extraída en la visita a mataderos. Con esta información se realizará un análisis de ciclo de vida (ACV) para detallar y conocer los impactos a la salud humana y la salud de los ecosistemas como consecuencia del desarrollo de la producción porcina. De igual modo, se propondrán estrategias para cerrar el ciclo de la producción porcina, en línea de la economía circular, permitiendo al sector optimizar los flujos de materia.

Los resultados del análisis realizado servirán a los desarrolladores del proceso a definir e implementar estrategias de mejora sobre el proceso de producción con la finalidad de disminuir su impacto ambiental. Así mismo, la información compilada, los diagrama realizados y la descripción metodológica de la realización del ACV servirá como material de consulta para estudiantes, productores porcinos y público interesado en el impacto ambiental para potencializar la industria de carne de cerdo con el propósito de impedir consecuencias que afectan marcadamente la salud humana y animal, apuntando a una producción porcina armoniosa, trascendente y se transforme en una experiencia sostenible y razonable, dentro del marco del pacto verde europeo.

1.2. Preguntas de investigación

la presente investigación pretende responder las siguientes preguntas:

- ¿Cuál es el impacto ambiental de la producción de carne de cerdo en Cataluña?
- ¿Existe valorización de los subproductos generados?
- ¿En qué medida la valorización de subproductos reduce la carga ambiental de la producción porcina?
- ¿Es posible cerrar el ciclo de producción porcina?

1.3. Objetivos del estudio

Objetivo general

Evaluar el impacto ambiental potencial de la producción de carne de cerdo en Cataluña, utilizando como herramienta el análisis de ciclo de vida (ACV) a fin de aportar estrategias de producción sostenible en el marco de la economía circular.

Objetivos específicos

1. Analizar de forma detallada el proceso de producción de carne de cerdo en un matadero tipo.
2. Identificar el sistema y flujos de producción de carne de cerdo en un matadero tipo en Cataluña, con énfasis en los subproductos generados y valorizados.
3. Conocer el impacto ambiental potencial de la producción de carne de cerdo a través de ACV y comparar con los impactos al valorizar los subproductos del proceso productivo.
4. Formular estrategias que permitan cerrar el ciclo de producción porcina a fin de contribuir a la economía circular.

1.4. Alcance del estudio

- La evaluación de ciclo de vida desarrollada en este proyecto, estará aplicada a la producción de carne de cerdo en Cataluña, España.
- Este estudio se enfocará directamente en el proceso productivo de un matadero tipo.
- Esta investigación cumplirá con los lineamientos del enfoque de ACV descrito en la norma ISO 14040.
- La propuesta de estrategias de mejora, serán planteamientos desarrollados bajo los métodos y/o enfoques utilizados en la ecología industrial y los principios de la economía circular.

2. Antecedentes

2.1. Ecología industrial

La Ecología industrial (EI) es un enfoque alternativo en lo que respecta al diseño de productos y procesos y la implementación de estrategias de producción sostenible. Es un concepto en el que el sistema industrial no es visto de forma aislada, sino que es visto en conjunto con los sistemas que le rodean. La EI pretende optimizar el ciclo de materia, desde las materias primas hasta el material terminado, los componentes, los productos, los subproductos y la eliminación final (Jelinski et al., 1992).

Los principios del EI podrían definirse de la siguiente manera:

1. Todas las operaciones industriales (privadas y públicas de producción, servicios e infraestructuras) se reflejan en los ecosistemas “naturales”, no humanos, como modelo.
2. La dinámica y los principios de los ecosistemas ofrecen un importante recurso de información para el diseño y gestión de los sistemas industriales.
3. Conseguir una elevada eficiencia energética y de materia en la producción, uso, reciclaje y servicios puede generar una ventaja competitiva y beneficios económicos.
4. La última fuente de valor económico es que el planeta y sus ecosistemas locales se mantengan a largo plazo, sin la cual el éxito empresarial actual no tiene sentido.

La EI sugiere utilizar el diseño de ecosistemas para guiar el rediseño de los sistemas industriales. El objetivo es conseguir un mejor encaje entre la ejecución industrial y las restricciones ecológicas. La aplicación más amplia del EI consiste en describir los complejos de fabricación como "ecosistemas industriales". Esta idea propone una red cooperativa de interacción entre empresas de modo que los subproductos de una instalación se conviertan en materia prima para otra. De esta forma, el diseño de estrategias de producción más limpias, va más allá de la planta de producción o la empresa individual y entra en el ámbito de las relaciones entre empresas, también conocido como simbiosis industrial (Cervantes et al., 2011; Baldassarre et al., 2019).

Los métodos y enfoques utilizados en la ecología industrial incluyen:

- Análisis de flujo de materiales: la cuantificación de flujos de masa y energía en sistemas que van desde plantas industriales hasta la economía global.
- Evaluación del ciclo de vida: el análisis sistémico de los flujos ambientales y los impactos relacionados que surgen a lo largo de los ciclos de vida de los productos y servicios, desde la extracción de materias primas hasta la eliminación al final de su vida útil.
- Análisis de insumo-producto ambientalmente extendido: un método para cuantificar las huellas ambientales basado en los intercambios entre sectores económicos y con el medio ambiente.
- Simbiosis industrial: el estudio del intercambio de desechos como recurso entre instalaciones industriales cercanas, similar a las relaciones físicas sinérgicas entre especies biológicas.

La ecología industrial ha contribuido a varias ideas sobre los sistemas económicos que tienen como objetivo mejorar la eficiencia de los recursos, es decir, minimizar los residuos y maximizar los servicios prestados mediante el uso de recursos (Erkman, 1997; El-Haggar, 2007). Estas ideas han culminado en el concepto de economía circular, que se generalizó en la década de 2010. Hoy en día, la ecología industrial proporciona metodologías, herramientas y enfoques científicamente rigurosos para comprender y aplicar prácticas de economía circular (ISIE, 2013).

Todos estos indicios muestran que la EC fue precedida por diferentes escuelas de pensamiento y sus orígenes parecen estar arraigados principalmente en los campos de la EC y el EE (Gibbs & Deutz, 2007; Bruel et al., 2019).

2.2. Economía Circular

A lo largo de la evolución y la diversificación, nuestra economía industrial no ha ido más allá de las características fundamentales establecidas al principio de todo de la industrialización: un modelo lineal de consumo de recursos que sigue el patrón 'extraer-producir-desechar'. A pesar de la modernización industrial, el sistema productivo sigue basándose en el consumo y no en el uso restaurativo de estos recursos, lo que conduce a la degradación ambiental y a la sobreexplotación de los recursos naturales, reduciendo la capacidad reproductiva de la biosfera (Lieder & Rashid, 2016).

Por tanto, la búsqueda y necesidad de un modelo industrial que pueda desvincular el camino lineal de producción y consumo, ha aumentado el interés en los conceptos asociados con la Economía Circular (EC). Aunque todavía es una construcción teórica, el término EC denota una economía industrial que es restaurativa por intención y diseño. En la EC, los productos son diseñados para facilitar su reutilización, desmontaje, reconstrucción, reciclaje y la recuperación de materiales; de modo que, retenga el valor máximo de los productos, materiales y recursos durante el mayor tiempo posible en un circuito cerrado (Merli et al., 2018). La EC hace referencia a la economía industrial que es restaurativa de forma intencional, que depende de las energías renovables;

minimiza, controla o elimina el uso de sustancias químicas tóxicas y erradica la producción de residuos a través del diseño. Como lo señalaron tanto los profesionales (Ellen Macarthur Foundation, 2021) como los académicos (Ghisellini et al., 2016), la EC tiene como objetivo reducir la carga ambiental y mejorar el bienestar de los humanos, es decir, lograr un mejor equilibrio y armonía entre la economía, el medio ambiente y la sociedad.

Según la Fundación Ellen Macarthur (FEM), la EC se basa en 3 principios fundamentales impulsados en el diseño:

- **Eliminar los desechos y la contaminación.** Los residuos no existen cuando los componentes biológicos y técnicos de un producto están diseñados con la intención de encajar en el ciclo biológico o técnico de materiales, para poder ser desmontados y reformados. Con un enfoque en el diseño, podemos eliminar el concepto de desperdicio. En una economía circular muchos productos podrían circular manteniéndose, compartiendo, reutilizando, reparando, reacondicionando, remanufacturando y, como último recurso, reciclando. Los alimentos y otros materiales biológicos que son seguros para regresar a la naturaleza pueden regenerar la tierra, impulsando la producción de nuevos alimentos y materiales.

- **Hacer circular productos y materiales (a su nivel más alto).** Esto significa mantener los materiales en uso, ya sea como producto o, cuando ya no se puedan usar, como componentes o materias primas. De esta manera, nada se convierte en desperdicio y se conserva el valor intrínseco de los productos y materiales.

- **Regenerar la naturaleza.** Al pasar de economía de lineal a circular, cambiamos el enfoque de extracción a regeneración. En lugar de degradar continuamente la naturaleza, construimos capital natural. Empleamos prácticas agrícolas que permiten que la naturaleza reconstruya los suelos y aumente la biodiversidad, y devuelva materiales biológicos a la tierra.

Con todo esto podemos ver que todavía estamos en los inicios del camino hacia la circularidad, y asumiendo que podemos identificar nuevas grandes opciones para establecer sistemas circulares, debemos creer que es posible pasar de esta fase inicial a un nivel sustancialmente superior. Eliminar los subproductos de la cadena industrial a través de cerrar el ciclo permite reducir los costes de producción y la dependencia en los recursos, al mismo tiempo que minimiza las cargas al medio ambiente y estimula la economía. Los beneficios no sólo son operacionales sino también estratégicos; no sólo para la industria, también para los consumidores; no sólo a nivel de eficiencia, sino también a nivel de innovación y crecimiento. El potencial identificado representa tan sólo una pequeña parte de lo que se podría alcanzar si los modelos circulares de negocios se aplicarán a gran escala (Jurgilevich et al., 2016; Geissdoerfer et al., 2017).

2.2.1. Contribución de la economía circular al desarrollo sostenible

De forma similar, el concepto de EC atrae cada vez más la atención de gobiernos, formuladores de políticas, académicos, empresas y ciudadanos como un opción oportuna, pertinente y práctica para cumplir con las metas del desarrollo sostenible (DS). De hecho, (Schroeder et al., 2019) mostró que la implementación de enfoques de EC se puede aplicar como una "caja de herramientas" para lograr una cantidad considerable de objetivos de DS, entre ellos las metas del ODS 6 (Agua limpia y saneamiento), ODS 7 (Energía limpia y asequible), ODS 8 (Trabajo decente y crecimiento económico), ODS 12 (Producción y consumo responsables) y ODS15 (Vida en la Tierra). En definitiva, el paradigma de EC está siendo ampliamente explorado por las instituciones como un posible camino para aumentar la sostenibilidad de nuestro sistema económico

(Nattassha et al., 2020). Para algunos investigadores más optimistas, el objetivo final de un EC es un DS (Corona et al., 2019; Saidani et al., 2019).

2.2.2. Economía circular en una perspectiva de ciclo de vida para el sector alimentario

El crecimiento de la población y el incremento de la demanda de alimentos, el uso de los recursos de manera ineficiente y la distribución de alimentos, los impactos ambientales y las elevadas tasas de desperdicio alimentario a todos los niveles del sistema alimentario necesitan una transición hacia prácticas más sostenibles. La producción actual de alimentos y los hábitos de consumo son insostenibles. Se estima que alrededor del 30% de los alimentos producidos a nivel mundial se pierden o desperdician a lo largo de la cadena de suministro de alimentos (Oliveira et al., 2021). Frente a este escenario, la EC ofrece herramientas para hacer más sostenible el sistema alimentario occidental.

La EC utiliza teorías y principios del EI. Los objetivos del EI son cerrar el ciclo de materiales y sustancias y reducir tanto el consumo de recursos como los vertidos al medio. La aplicación EC en el sistema alimentario implica reducción de la cantidad de residuos generados, la conversión de residuos en bioproductos, nuevos materiales o productos para prolongar la vida útil. generando nuevos retornos económicos o reducción de costos y en todo caso reduciendo el daño ambiental u optimizando el uso o los recursos volviendo al proceso original (Nattassha et al., 2020; Stillitano et al., 2021).

El ciclo de nutrientes relacionado con el sistema alimenticio se puede cerrar. El ciclo de materia relacionado con la reutilización de los alimentos, subproductos y residuos, se puede cerrar parcialmente. Las medidas circulares deben implementarse al nivel de producción y de consumo y, finalmente, a la gestión de los subproductos. El reto es realizar estos cambios a gran escala y para poder hacerlo se necesitan cambios integrales y sistémicos, lo que implica tanto al sector público como privado. Para ello hace falta mucha colaboración entre empresas alimentarias, productores, vendedores, gobernantes, gestores de residuos y otros actores del sistema alimentario.

De igual modo, la aplicación de la EC en el sector alimentario requiere de métodos de evaluación de la sostenibilidad y, entre ellos, los enfoques de ciclo de vida (CV), son particularmente apreciados como una herramienta sólida, basada en la ciencia y útil para medir y validar los supuestos de EC, ayudar a la viabilidad de su implementación al recibir retroalimentación para mejorar y, finalmente, para comunicar estrategias de innovación (Peña et al., 2021). La evaluación del ciclo de vida (ACV), en particular, es una herramienta muy adecuada para evaluar los impactos de sostenibilidad de las estrategias de EC de manera operativa e integral, o rastrear adecuadamente su desempeño si se coloca dentro de un marco adecuado (Harris et al., 2021).

2.3. El sistema de producción de carne de cerdo

2.3.1. El sector porcino en el mundo

El consumo de carne aumenta continuamente a nivel mundial a consecuencia de la alta demanda como fuente principal de proteínas y micronutrientes en los países de renta baja, se prevé que la producción aumente un 40% respecto al consumo actual en 2050. Entre los principales tipos de carne, el cerdo es la principal variedad de carne producida en Europa, siendo el segundo mayor productor del mundo después de China. La carne de cerdo es la más consumida a nivel mundial, con 109,8 millones de toneladas consumidas en 2020, este hecho ha provocado que, económicamente se alce como el principal subsector ganadero del planeta (FAO, 2021). Sin embargo, la producción de carne de cerdo también es el segundo contribuyente de emisiones de GEI del sector ganadero después de la carne de vacuno, con alrededor del 9% de las emisiones

totales (I. Noya et al., 2017). Esto, hace pensar que el aumento de la población y la creciente demanda de carne de cerdo, darán lugar al incremento de los problemas ambientales correspondientes (Winkler et al., 2016).

2.3.2. El sector porcino en España

El sector porcino español es uno de los más importantes del mundo. La industria porcina representa el 37% del total de la producción ganadera y el 14% del total de la producción agrícola. Siendo de esta manera el sector de mayor desarrollo y relevancia. El marcado desarrollo del sector porcino español se ve claramente reflejado en la porción que constituye dentro del censo total europeo, donde, la producción de carne de cerdo en España representa algo más de una quinta parte (22.1% o 5.2 millones de toneladas) del total de la Unión Europea (UE) para el año 2021 (Eurostat, 2022).

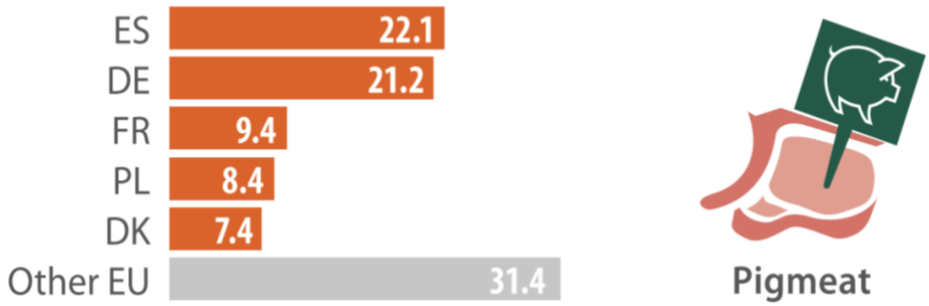


Figura 1. Porcentaje de producción *de carne de cerdo en la UE durante el año 2021 (fuente: Eurostat)*

2.3.3. El sector porcino en Cataluña

La producción de cerdo en Cataluña es una de las industrias más potentes en términos de beneficios económicos del sector porcino español. Específicamente, Cataluña es la Comunidad Autónoma con una mayor cantidad de producción de carne (40,16% del total), con una producción de 2.080.549 miles de toneladas y el número de animales sacrificados aumenta exponencialmente año tras año tal como muestra la figura 2 (DACC, 2022). Sin embargo, la industria porcina demanda grandes cantidades de recursos naturales (agua y energía) y genera grandes flujos de residuos. Por eso las prácticas convencionales de la cadena de producción de cerdo son responsables de gran parte del estrés, en cuanto a la capacidad de carga, de los ecosistemas catalanes (Isabel Noya et al., 2017, González-García et al., 2015).

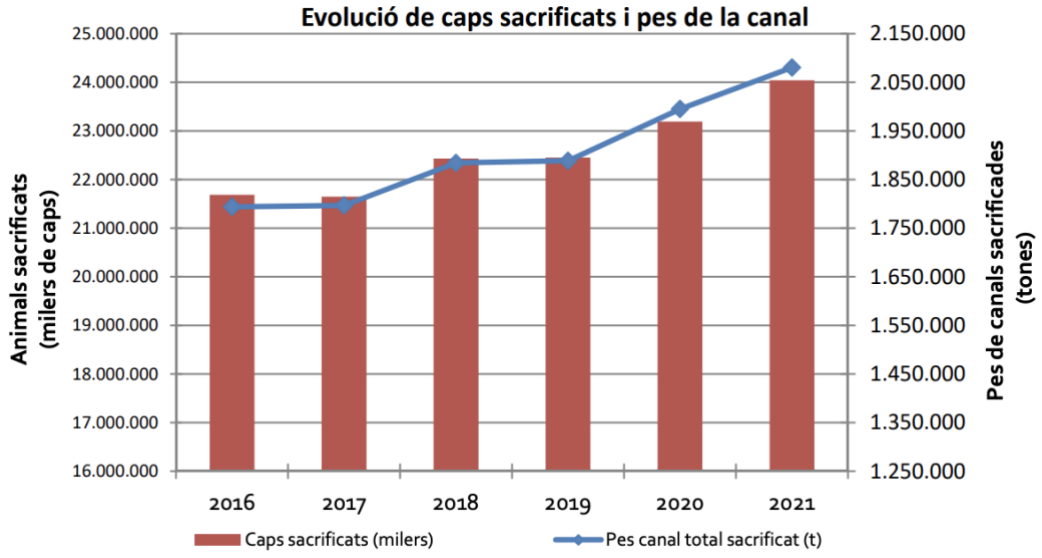


Figura 2. Evolución del sacrificio de ganado porcino y del peso de la canal en Cataluña durante el período 2016 -2021 (fuente: DACC).

2.3.4. Repercusiones ambientales del sector

La producción y el consumo de carne están asociados con la generación de presiones e impactos ambientales significativos, y la ineficiencia de los recursos (Ferronato et al., 2021). La industria alimentaria es uno de los sectores industriales más grandes del mundo y, por lo tanto, es un gran consumidor de energía. Los sistemas de producción ganadera ejercen una alta presión ambiental y contribuyen a la emisión de gases de efecto invernadero , la contaminación del agua, la degradación del suelo y la pérdida de biodiversidad (Dorca-Preda et al., 2022). Se estima que la producción de carne de cerdo, la carne más consumida a nivel mundial, emite 668 millones de toneladas de CO2-eq de gases de efecto invernadero cada año (McAuliffe et al., 2017).

De modo que, los principales desafíos ecológicos asociados con la producción porcina pasan por su gran dependencia de los insumos para la producción de alimentos, energía y agua, una mayor producción de metano, amoníaco y otras emisiones derivadas de la mala gestión del estiércol, el almacenamiento y la gestión de residuos (Ndue & Pál, 2022). Estudios recientes confirman que la alimentación es la mayor fuente de impacto ambiental asociada con los sistemas de producción porcina (Andretta et al., 2021). Esto subraya la necesidad de evaluar los impactos ambientales y los parámetros que influyen en la cadena de suministro de carne de cerdo

En los últimos años, las industrias porcinas han avanzado en la reducción de sus impactos sobre el medio ambiente. No obstante, todavía queda mucho por mejorar, una evaluación ambiental crítica puede contribuir a una producción animal más ecológica proponiendo y probando soluciones que hagan que estos sistemas de producción sean más respetuosos con el medio ambiente, permitiendo cumplir la estrategia Farm to Fork y la neutralidad de carbono en el marco del Acuerdo Verde de la UE (Andretta et al., 2022; Ndue & Pál, 2022).

2.3.5. Proceso productivo de un matadero

Un matadero es un establecimiento industrial legalmente autorizado dedicado al sacrificio de aquellos animales destinados a la alimentación humana. Para entender la naturaleza de los subproductos que se generan y que nosotros estudiaremos en el marco de la EC, a continuación, se exponen las diferentes etapas de un matadero porcino.

1. *Recepción:* La recepción se produce cuando los animales vivos, que han sido trasladados desde la granja, llegan al matadero.
2. *Inspección ante mortem:* La inspección ante mortem es el examen que se realiza a los animales vivos que deben ser sacrificados para comprobar su estado de salud y su normalidad fisiológica o, por el contrario, si presentan alguna anomalía que pudiera ser determinante para que las carnes obtenidas no fueran aptas para el consumo.
3. *Estabulación:* La estabulación es el tiempo que pasa desde la inspección ante fallecidos hasta el momento del sacrificio. Los animales se dejan reposar en los corrales.
4. *Baño ante mortem:* Cuando los animales se sacan del corral pasan por un sistema de duchado para eliminar la suciedad más superficial.
5. *Insensibilización:* Los animales deben ser insensibilizados para entrar en estado de inconsciencia antes del sacrificio, con el fin de evitar cualquier dolor o sufrimiento innecesario. La insensibilización puede realizarse de diversas maneras como son la descarga eléctrica o el CO2.
6. *Degollado:* Una vez insensibilizado el animal se degolla y se deja desangrar. En los cerdos el desangrado suele realizarse por punción y corte en la entrada del pecho.
7. *Escaldado:* El proceso de escaldado consiste en poner al animal en contacto con agua o vapor de agua a una temperatura de unos 65 °C durante unos minutos con la intención de que el pelo se ablande.
8. *Depilado:* Una vez escaldado el animal, se eliminan los pelos y la capa queratinizada de la epidermis con máquinas depiladoras, que constan de unos cilindros giratorios con rascadores metálicos que ayudan a eliminar la mayor parte del pelo y de la epidermis del animal.
9. *Flagelado:* El flagelado se lleva a cabo después del depilado para acabar de arrancar pelos que no habían quedado depilados.
10. *Flameado:* La etapa de flameado constituye una operación complementaria a la de escaldado, depilado y flagelado, ya que estas operaciones no suelen eliminar completamente el pelo. El flameado etapa alimentada por quemadores alimentados por gas, asegura la desaparición de todos los pelos restantes incluidos aquellos que quedan en zonas donde las etapas anteriores no llegan.
11. *Duchado:* El animal a continuación es duchado con agua a presión para separar el pelo del cuerpo.
12. *Cortado de las uñas:* Las uñas de los cerdos se cortan y se separan del animal.
13. *Corte y vaciado del recto:* El recto junto con el contenido intestinal se extrae con una maquinaria específica.
14. *Apertura abdominal:* es la etapa donde se realiza el corte longitudinal del abdomen de los cerdos mediante maquinaria específica para facilitar el eviscerado.
15. *Eviscerado:* La evisceración consiste en extraer las vísceras abdominales y torácicas del animal.
16. *Seccion del canal:* la sección o esquinado consiste en la division de la canal en dos medias canales mediante maquina específica.
17. *Inspección veterinaria:* Las canales seccionados sin vísceras pasan una inspección veterinaria "post-mortem" antes del despiece. Esta inspección se realiza para verificar si la carne es adecuada para el consumo humano.
18. *Pulido de canal:* el canal inspeccionado es revisado y limpiado por ultima vez antes de pasar a la camara de refrigeración.
19. *Refrigeración:* el canal pulido es depositado en la cámara de refrigeración un dia antes del despiece.
20. *Despiece:* El despiece del cerdo consiste en la partición de la canal del cerdo en diferentes piezas de carne, en funcion de lo que se quiere obtener.
21. *Almacenamiento:* las piezas de carne hasta que se expiden, se mantienen en refrigeración en las diferentes cámaras de refrigeración o congelación.
22. *Expedición:* Los productos de carne se cargan en los vehículos y son enviadas a los clientes.

2.3.6. Marco normativo para la valorización del sector cárnico

La industria de los residuos animales comprende toda aquella materia prima que no está destinada directamente al consumo humano. Los usos y rutas de eliminación permitidas se rigen por el Reglamento (EC) 1069/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo de 21 de octubre de 2009 por el que se establecen normas sanitarias relativas a subproductos animales no destinados al consumo humano y su correspondiente Reglamento (EC) 142/2011, en lo que se refiere a la implementación. Todos los miembros de la Unión Europea están obligados a cumplir con esta regulación (Valta et al., 2015).

A la hora de la valorización de subproductos animales es de especial importancia la clasificación que hace el Reglamento Europeo en tres categorías específicas que reflejan su nivel de peligrosidad para la salud pública y la salud animal. De esta forma, la gestión y la valorización, están sujetas a las normas aplicables a la categoría específica de subproductos animales de la que se derivan. Un resumen de los subproductos que incluye cada categoría se encuentra en la Tabla 1.

Tabla 1. *Resumen de la clasificación de los subproductos animales y productos derivados.*

Categoría	Descripción
1	Los materiales, animales y partes de animales que sean sospechosos de estar infectados por una EET o enfermedad transmisible a humanos o a otros animales, los animales que no son animales de granja o salvajes, animales de experimentación, animales y partes de animales que contengan MER y, los productos derivados de animales a los que se les haya administrado sustancias prohibidas o contengan subproductos medioambientales.
2	El estiércol y el contenido del tubo digestivo, todos los materiales de origen animal recogidos en la depuradora de las aguas residuales y aquellos animales que mueran sin ser sacrificados para el consumo humano.
3	Todos aquellos materiales, animales y partes de animales que no se destinen a consumo humano por motivos comerciales

De esta forma se puede sintetizar que el material de C1 solo es apto para eliminación, el de C2 puede tener varios usos, pero en ningún caso puede ir a alimentación animal ni humana y, por último, el material de C3 no es apto para consumo humano, pero sí para consumo animal y otros usos.

2.3.7. Valorización de subproductos

El sector agroalimentario es uno de los sectores clave donde es necesario actuar para asegurar la transición hacia un modelo de desarrollo más sostenible y en línea con los principios de la EC (Poponi et al., 2022). La industria produce una gran cantidad de residuos, que además de ser un problema de pérdida de valor, también generan problemas de gestión, tanto a nivel económico como ambiental. Muchos de estos residuos tienen mucho potencial para ser reutilizados en otros sistemas de producción o incrementar su valor por medio de tratamientos y procesos de valorización. No obstante, estudios recientes revelan que la falta de tecnología e innovación, la falta de una estimación sólida sobre el desperdicio de alimentos, la falta de diseño y optimización de la cadena de suministro (CS), y la falta de beneficios económicos y el alto costo de inversión son las barreras más importantes que afectan la valorización de subproductos (Gedam et al., 2021).

2.3.7.1. Valorización de subproductos de matadero

Aunque los procesos en los mataderos pueden variar dependiendo del tipo de animal que se mata (animales grandes o aves de corral), las acciones que se llevan a cabo en los mataderos están asociadas a problemas ambientales de gran envergadura, incluyendo el consumo de significativos volúmenes de agua, la generación de agua residual altamente contaminada con materia biodegradable y la generación de subproductos animales (Ragasri & Sabumon, 2023). Los métodos de tratamiento de las aguas residuales y de procesado de los subproductos varían geográficamente y también a lo largo del tiempo dependiendo de las restricciones legales y requerimientos, factores económicos y el progreso tecnológico del país.

Hace varios años, muchos de los que ahora son subproductos, proporcionaban una gran fuente de ingresos a los mataderos. Sin embargo, la última crisis relacionada con los brotes de fiebre aftosa, la diseminación de la encefalopatía espongiforme transmisible, como la encefalopatía espongiforme bovina y la aparición de dioxinas en los piensos alimenticios, han mostrado las consecuencias del uso impropio de los subproductos animales y de la salud animal.

Por tanto, la industria cárnica intenta encontrar nuevas soluciones para recuperar estos subproductos que, debido a las preocupaciones en materia de seguridad alimentaria, son cada vez menos. Después del procesado, las materias primas pueden tener diversas aplicaciones, como piensos, cosmética, productos médicos, oleo químicos, productos técnicos, fertilizantes y otras muchas (Shirsath & Henchion, 2021). Muchos de los subproductos animales utilizados y tirados provienen de animales sanos que han sido desollados en mataderos y que podrían ser aptos para el consumo humano porque han pasado las revisiones ante y post mortem (Mirabella et al., 2014; Valta et al., 2015).

Actualmente, las valorizaciones más recurrentes que se llevan a cabo a partir de subproductos de mataderos son, entre otros, la fusión de grasas, algunos procesados de la sangre (péptidos bioactivos), producción de gelatina, incineración, producción de biogás, Pet food y el aprovechamiento de subproductos por parte de la industria farmacéutica (Mora et al., 2018; Du et al., 2018). Otras investigaciones más ambiciosas, proponen el uso de subproductos animales para la generación de electricidad, biodiesel e hidrógeno (Santagata et al., 2017; Chowdhury et al., 2022).

2.4. El ACV como herramienta de medición

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta metodológica, ampliamente aceptada y comúnmente aplicado, que sirve para medir el impacto ambiental de un producto, proceso o actividad a lo largo de todo su ciclo de vida (desde que se obtienen las materias primas hasta su fin de vida).

El ACV se basa en la recopilación y análisis de las entradas y salidas (inputs/outputs) del sistema para obtener unos resultados cuantitativos que muestren sus impactos ambientales potenciales, con el objetivo de poder determinar estrategias para la reducción de los mismos y/o comparaciones de desempeño ambiental de los productos o servicios con funciones similares.

2.4.1. Marco metodológico

El ACV establece un método claro para el análisis, que incluye cuatro pasos principales que son: 1) la definición de objetivos y alcance, 2) el desarrollo del Inventario del ciclo de vida (ICV) que considera la colección de datos o insumos que entran en el proceso, 3) la evaluación del impacto

del ciclo de vida, que implica entender la relevancia de cada flujo de materia y energía en el proceso, y 4) la interpretación.

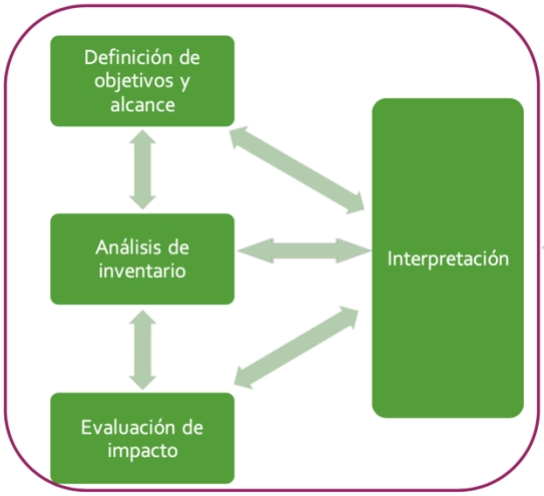


Figura 3. marco metodológico de un ACV según ISO 14040

En las siguientes líneas se presentan las generalidades de las fases metodológicas del ACV de acuerdo a la ISO 14040 y el manual de Ihobe (2009).

2.4.1.1. Definición de objetivos y alcance

Esta parte del método comprende la descripción de la aplicación prevista del estudio de ACV, las razones para realizarlo, el público previsto y si se pretende utilizar los resultados en aseveraciones comparativas.

Por un lado, la definición del objetivo debe ser clara y coherente con la aplicación prevista en el estudio, es decir, los requisitos en el reporte del estudio (razones para realizar el estudio, el uso de los resultados y el destinatario del estudio), ya que la trasparencia en el reporte es esencial en cualquier tipo de ACV. Por su parte, en la definición del alcance se establecen la extensión del estudio, esto es, qué se incluye en el sistema de estudio y con qué detalle se usarán los métodos de evaluación. Lo que implica, de acuerdo a la norma ISO 14040 la caracterización de:

- Sistema a estudiar y sus funciones (funciones del sistema)
- Selección de la unidad funcional
- Establecimiento de los límites del sistema
- Procedimientos de asignación de cargas ambientales
- Tipos de impacto a evaluar, la metodología de evaluación y la interpretación.
- Requisitos que deben cumplir los datos del inventario
- Supuestos considerados y limitaciones
- Requisitos de calidad de los datos

Dicho lo anterior, conforme a la norma ISO 14040 se describe los siguientes términos:

- **Unidad funcional.** Hace referencia al desempeño cuantificado de un sistema del producto para su uso como unidad de referencia. Pueden ser de tipo físico (100 unidades de producto) pero también de tipo funcional (kg necesarios de producto para realizar x función). Las de tipo físico son más intuitivas y cómodas de utilizar, pero las funcionales son más adecuadas para comparar dos productos similares.

- **Límites del sistema.** Conjunto de criterios que especifican cuáles de los procesos unitarios son parte de un sistema del producto. Establece por tanto qué datos son considerados como relevantes y cuales no (generalmente porque su baja contribución implica impactos poco significativos).

- **Asignación.** Distribución de los flujos de entrada o de salida de un proceso o un sistema del producto entre el sistema del producto bajo estudio y uno o más sistemas del producto diferentes. Generalmente, esta separación se puede hacer en función del peso de los productos, o de su valor económico. Esto conlleva obviamente un incremento en la complejidad del proceso, por lo que se recomienda evitar la asignación y ampliar los límites del sistema siempre que sea posible, de manera que se incluyan los procesos o productos que antes quedaban fuera.

Una vez que se ha definido el objetivo y alcance con base en todos los conceptos mencionados anteriormente, el siguiente paso es la obtención de todos los datos del sistema con base en la unidad funcional, compilados en un inventario de ciclo de vida.

2.4.1.2. Análisis de Inventario de Ciclo de vida (ICV)

El análisis del inventario implica la recopilación de los datos y los procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas pertinentes del sistema en estudio, lo cual conlleva el uso de recursos (materias primas y energía), las emisiones a la atmósfera, suelo y aguas y la generación de residuos. La definición de las entradas y salidas está condicionada por los límites del sistema.

Generalmente en el ICV se consume considerable tiempo, quizás más que en cualquier otra fase del estudio, ya que la calidad y el manejo de los datos están estrechamente vinculados con la veracidad del resultado final. La ejecución de un ICV implica:

- Un desarrollo previo de diagramas de flujo, tan detallados como se especifique en el alcance del estudio. Para una mejor organización, la división en subsistemas se recomienda, y los inventarios de cada “caja negra” se deben realizar bajo las mismas pautas para asegurar la homogeneidad del ICV.
- Plan de recolección de datos, donde se incluye la proposición de metas de calidad de los datos como pueden ser la precisión, representatividad o repetitividad. Se identifican bases de datos disponibles y elaboran hojas de recolección de datos, útiles para recabar la información en campo.
- Una vez recogida, la información se organiza y se ajustan los límites del sistema, definidos en la etapa metodológica anterior, considerando las faltas de información, por ejemplo. En seguida se realizan los balances de materia y energía necesarios para obtener flujos faltantes que no pudieron recopilarse directamente de fuentes primarias. Posteriormente los datos se validan, se relacionan a la unidad funcional y finalmente, si es aplicable, se hace la asignación de cargas.

En síntesis, la construcción del ICV es un proceso recurrente, lo que permite ajustarlo cuantas veces sea necesario hasta concluirlo satisfactoriamente. Los datos del inventario deben validarse para posteriormente vincularlos a la unidad funcional y proceder entonces al sumatorio de las variables comunes.

2.4.1.3. Evaluación del impacto de ciclo de vida

La Evaluación de Impactos del Ciclo de Vida (EICV), es la fase del ACV dirigida a conocer y evaluar la magnitud y la significancia de los impactos ambientales potenciales del sistema en estudio. En

esta fase se emplea un método de evaluación para transformar los datos recogidos en el ICV, en resultados de carácter ambiental. Es decir, este proceso implica la asociación de los datos de inventario con las categorías o indicadores de impactos ambientales específicos.

De acuerdo con la norma ISO 14040:2006, esta fase está compuesta por 3 etapas obligatorias (definición de categorías, clasificación y caracterización) y otras opcionales (normalización y ponderación), tan como se muestra en la siguiente figura:

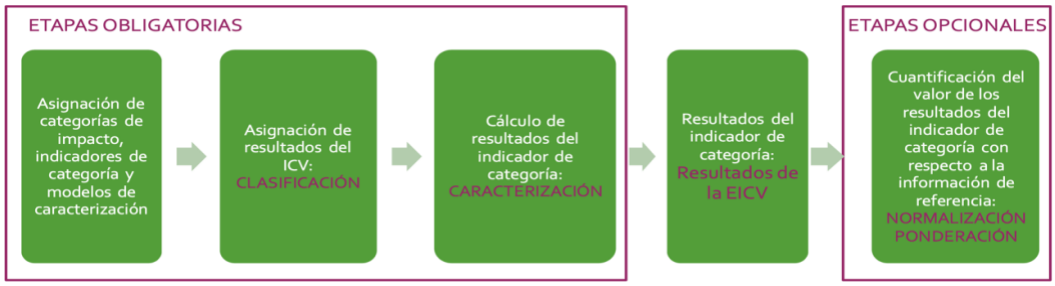


Figura 4. Esquema de las etapas de EICV según la norma ISO 14040

La aplicación total o parcial de cada uno de estos elementos o fases se realiza dependiendo del objetivo y alcance del estudio. Veamos a continuación los aspectos más reseñables de sus principales etapas.

a) Categorías de impacto

Las categorías de impacto se seleccionan con la finalidad de describir los impactos causados por el producto y el sistema de producción en estudio. Estas categorías representan los impactos ambientales de interés a los cuales se quieren asignar los resultados del EICV.

Existen multitud de categorías de impacto ambiental, y la selección de unas u otras en el ACV que se esté llevando a cabo dependerá del objetivo del estudio, público objetivo y nivel de exactitud de los resultados requeridos. A modo orientativo en la siguiente figura, se indican las principales categorías de impacto ambiental:

Tabla 2. *Principales categorías de impacto ambiental contempladas por la SETAC (Sociedad de Toxicología y Química Ambiental).*

Categoría de impacto		Unidad de referencia	Factor de caracterización
Calentamiento global	Aumento de la temperatura de la atmósfera terrestre	Kg. Eq CO_2	Potencial de Calentamiento Global (PCG)
Eutrofización	Crecimiento desproporcionado de algas en detrimento de otras especies acuáticas	Kg. Eq. de NO_3	Potencial de Eutrofización (PE)
Acidificación	Pérdida de la capacidad neutralizante del suelo y agua.	Kg. Eq SO_2	Potencial de Acidificación (PA)
Consumo de recursos energéticos	Energía consumida en la obtención de las materias primas, fabricación, distribución, uso y fin de vida del elemento analizado.	MJ	Cantidad Consumida

Reducción de la capa de ozono	Efectos negativos sobre la capacidad de protección frente a las radiaciones ultravioletas solares de la capa de ozono atmosférica.	Kg. Eq. CFC-11	Potencial de Agotamiento de la Capa de Ozono (PAO)
Consumo de materias primas	Consumo de materiales extraídos de la naturaleza.	Tm	Cantidad Consumida
Oxidación fotoquímica	Formación de los precursores que dan lugar a la contaminación fotoquímica.	Kg. Eq. C_2H_4	Potencial de Formación de oxidantes fotoquímicos (PFOF)

b) Clasificación

En esta etapa, los datos procedentes del inventario son clasificados en aquellas categorías de impacto ambiental a las que contribuyen. El objetivo de esta etapa es asignar cada dato del inventario (tanto entradas como salidas del sistema) a las categorías de impacto seleccionadas en la etapa anterior. Es un paso que se basa en análisis científicos reportados sobre procesos ambientales.

c) Caracterización

Una vez que cada sustancia del ICV se ha asignada a una o más categorías de impacto ambiental a través de la clasificación; El valor de cada sustancia de una categoría es comparado respecto a la sustancia de referencia de dicha categoría. Para esto, se considera un factor de caracterización de cada sustancia, que representa la contribución de una sustancia a una categoría de impacto. Cada sustancia es multiplicada por su factor de caracterización, obteniéndose finalmente valores con una misma unidad, de manera que sumándolos todos se obtiene la contribución total de impactos a una categoría.

d) Normalización y ponderación

Además de los pasos obligatorios a realizar en la EICV, existen pasos opcionales que pueden darse dependiendo del objetivo y alcance previsto. Estos son los siguientes:

- **Normalización:** Conversión de los resultados de la caracterización a unidades globales neutras, dividiendo cada uno por un factor de normalización. A través de los cuales se representa el grado de contribución de cada categoría de impacto sobre el problema medioambiental local.
- **Ponderación:** Conversión de los resultados de los valores caracterizados a una unidad común y sumable para obtener una puntuación única total del impacto ambiental del sistema.

2.4.1.4. Interpretación

En la última fase de la metodología, que es la interpretación, los resultados del análisis del inventario o de la evaluación de impacto, o de ambos, se analizan en relación con el objetivo y el alcance establecido inicialmente. No obstante, la interpretación, es una acción ejecutable en cualquier momento del ACV, lo que ayuda a realizar los ajustes necesarios del estudio en tiempo real.

Los aspectos que se deben abordar en esta fase son:

- Identificación de los aspectos ambientales relevantes,
- Evaluación de la metodología y los resultados en relación a completitud, sensibilidad y consistencia, y
- Conclusiones y recomendaciones.

2.4.2. Métodos de evaluación de impacto

La fase de evaluación del impacto puede llevarse a cabo por distintos métodos de cálculo que difieren principalmente en cuanto a la cantidad y el tipo o la clase de categorías de impacto consideradas.

Además de la división de las categorías por alcance geográfico, estas se pueden clasificar según la orientación del impacto. Una diferencia importante entre los diferentes métodos de evaluación de impactos reside en la opción de analizar el efecto último del impacto ambiental, "endpoint", o bien, considerar los efectos intermedios, "midpoits". Las categorías de impacto ambiental intermedias se hallan más cercanas a la intervención ambiental, permitiendo, en general, modelos de cálculo que se ajustan mejor a dicha intervención. Estás proporcionan información más detallada sobre la manera en que se afecta o se podría afectar al medio ambiente. Por su parte, las categorías de impacto finales afectan directamente a la sociedad, pero como su metodología de cuantificación del impacto está basada en métodos principalmente cualitativos y de opinión de expertos, no existe consenso sobre ellas y por tanto es más común utilizar categorías intermedias.

En la siguiente figura se presenta el esquema general de los indicadores de punto medio y punto final (Midpoints/Endpoints).

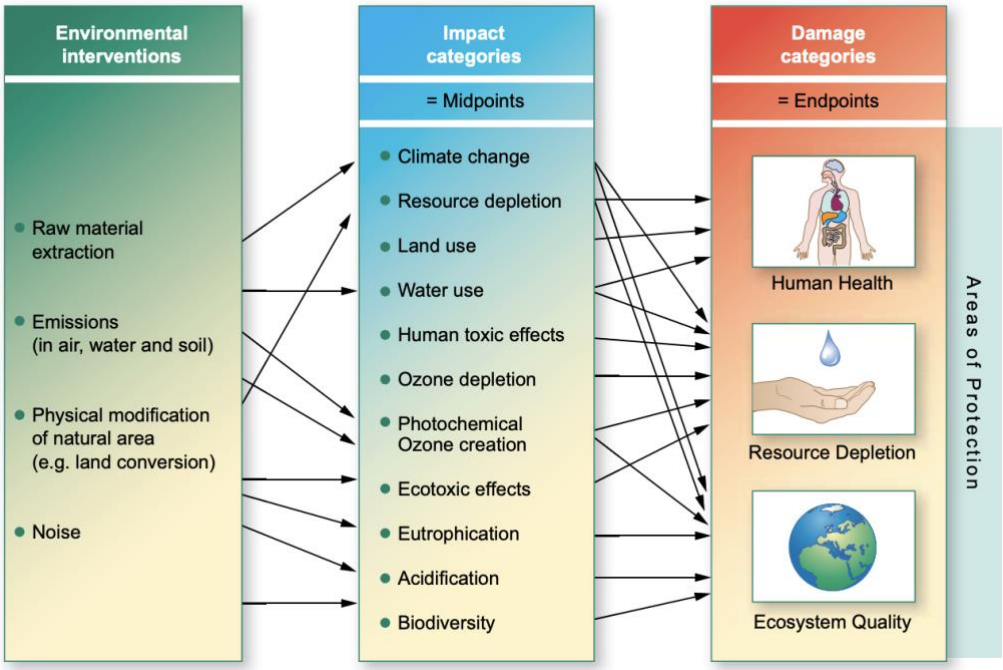


Figura 5. Esquema de las categorías de impacto medio e impacto final (UNEP, 2011).

En la siguiente Tabla se presentan algunos de los métodos existentes y sus características generales con base en (Ihobe, 2009). Se observa que los métodos Eco indicador 99 y EDP están orientados únicamente al cálculo de indicadores de punto final. El método Impact 2002+ tiene

factores tanto de punto medio como de punto final, y el resto de los métodos son utilizados en el cálculo de indicadores de punto medio.

Tabla 3. *Características de algunos métodos de ACV.*

Método	Enfoque de categoría de impacto
Eco-indicador 99	Su enfoque está orientado a daños y no a impactos. Los daños son de tres tipos: a la salud, al ecosistema y a los recursos.
CML 2001	Su enfoque está orientado a factores de impacto o problemas.
Impact 2002+	Combina los enfoques de impacto y daño. Considera 14 categorías de punto medio y cuatro categorías de daño. Resulta de una combinación entre las metodologías IMPACT 2002, Eco-indicador 99, CML 2001 e IPCC.
Recipe	ReCiPe se desarrolló para combinar las ventajas de los métodos CML 2001 y Eco- Indicador 99. La ventaja del método CML es su solidez científica, mientras que la ventaja del Eco-indicador 99 es su facilidad de interpretación.
IPCC	El enfoque está orientado a impactos en una sola categoría, la de calentamiento global. Considera tres horizontes de tiempo de vida de los GEI.
EDIP 2003	Enfoque orientado a impactos. Usa factores de punto medio y es un método utilizado en la "Declaración Ambiental de Productos".

Los resultados de un ACV pueden estar influenciados por distintos factores concernientes al método de evaluación. Uno que es importante es la falta de datos de modelación del impacto de algunas substancias, que es común en todos los métodos. En un estudio que comparó los resultados del impacto mediante cuatro método distintos (CML, Eco Indicador 99, EPS 2000 y EDIP 1997) se encontraron diferencias significativas en los indicadores ponderados; sin embargo con respecto a indicadores de caracterización en las categorías de cambio climático, agotamiento de la capa de ozono, acidificación y eutrofización se obtuvieron resultados similares, por lo que se concluyó que la elección de cualquiera de estos métodos para a evaluación de estas categorías de impacta no es de mayor importancia.

2.4.3. Software para el ACV

Dado que el desarrollo del ACV puede llegar a ser muy complejo por el tamaño de un proceso de producción que puede implicar tantos otros procesos como sea posible imaginar, se han desarrollado herramientas informáticas que facilitan el cálculo.

El uso de un programa informático simplifica en gran medida el llevar a cabo un estudio de ACV dado que contiene las bases de datos de muchos productos o insumos utilizados en diversos procesos industriales. Así, la carga ambiental de cada insumo se puede asociar de forma automática al proceso que se esté analizando. La mayoría de estos programas incluyen bases de datos que pueden variar en extensión y calidad de dichos datos realizar los cálculos de la fase de evaluación según el método que se seleccione. Algunos programas también incorporan metodologías de evaluación de incertidumbre y de sensibilidad.

Algunos ejemplos de software en el mercado son GaBi, Simapro que es de uso muy extendido por su fácil manejo y Umberto. A continuación, se indican de manera esquemática varias de las herramientas de ACV disponibles.

Tabla 4. *Características de algunos softwares de ACV.*

Software	Desarrollador	País	Características
Simapro	PRE-Consultants	Países Bajos	- Disponibles protocolos para la realización guiada de ACVs. - Posibilidad de modificación en cualquier momento de todos los parámetros del ciclo de vida del producto. - Permite análisis tipo: LCA: Life Cycle Assessment y LCC: Life Cycle Cost. - Posibilita la redacción de informes de acuerdo con la normativa ISO de ACV. - Posibilidad de análisis de: incertidumbre de los datos, escenarios de fin de vida, análisis de sensibilidad y Monte Carlo. - Permite exportar la información tanto en formato Ecospold y en Excel.
Gabi	la universidad de Stuttgart en colaboración con PE EUROPE GMBH	Alemania	- Disponibilidad de elaborar informe en el propio programa, que actualiza automáticamente los datos y es exportable a PDF. - Más complejo de utilizar, requiere comprender la base de datos y el proceso a estudiar.
Umberto	ifu Hamburg GMBH	Alemania	- Herramienta genérica - Manejo intuitivo - Diseño de diagramas muy flexible y cuidado - Formato exportable a Ecospold y Excel

2.5. Estado del arte de estudios previos de ACV en la producción porcina

La disponibilidad de publicaciones que utilizan ACV para evaluar los impactos ambientales de los sistemas de producción porcina ha aumentado a lo largo de los años (Figura 3). Los primeros estudios publicados referentes a la producción porcina se remontan al año 2005 (Basset-Mens & Van Der Werf, 2005). Sin embargo, el mayor número de estudios centrados en la producción porcina evolucionó mucho en los años siguientes, principalmente después de 2014 (Andretta et al., 2021).

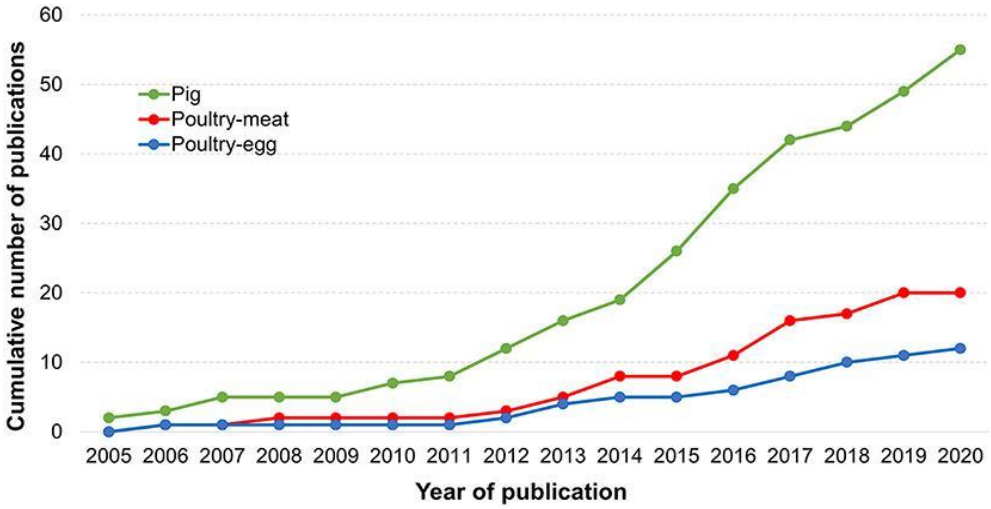


Figura 6. Número acumulado de estudios de ACV centrados en la producción porcina. Fuente: Andretta et al., 2021.

A continuación, se describen brevemente los resultados obtenidos de los estudios de ACV del proceso de producción porcina considerado por algunos autores:

Reckmann, y otros (2013) realizaron una evaluación ambiental de la carne de cerdo producida en el norte de Alemania en 2010/2011, utilizando el enfoque ACV atribucional, teniendo en cuenta una unidad funcional de 1 kg de carne de cerdo (peso al sacrificio) a la puerta del matadero. Los límites del sistema (producción porcina en Alemania) fueron la producción de alimentos, el alojamiento de cerdos y el sacrificio y producción de carne de cerdo. Mientras que las categorías de impacto se expresaron como potencial de calentamiento global (GWP), potencial de eutrofización (EP) y potencial de acidificación (AP). El estudio identificó la producción de piensos como el principal contribuyente a las categorías de impacto GWP y EP. Seguido de la etapa de alojamiento de los cerdos. El proceso de matanza representó sólo del 1 al 12 % de las emisiones totales.

González-García, y otros (2015) realizaron una evaluación ambiental detallada de la producción de carne de cerdo en Portugal, mediante un enfoque de evaluación del ciclo de vida desde la cuna hasta la puerta del matadero. El sistema en estudio (cadena de producción porcina de Portugal en condiciones intensivas) se dividió en tres subsistemas: producción de cultivos y alimentos (S1), producción de carne de cerdo (S2) y sacrificio (S3), teniendo en cuenta 1 kg de carne de cerdo (peso en canal) como unidad funcional. Los resultados de la evaluación mostraron que S1 fue el subsistema más influyente en el perfil ambiental principalmente debido a las actividades agrícolas involucradas en la producción de componentes de alimentos, en cambio, las contribuciones relacionadas con el sacrificio fueron insignificantes independientemente de la categoría evaluada.

Winkler, y otros (2016) estudiaron los impactos ambientales que ocurren a lo largo de la cadena productiva de la carne de cerdo austriaca, utilizando el método de evaluación del ciclo de vida (LCA) expresado en términos de potencial de calentamiento global (GWP), acidificación y eutrofización del suelo, para un kg de cerdo austriaco fresco (peso en canal) como unidad funcional. El sistema en estudio (cadena de producción de carne de cerdo austriaca) se dividió en cinco subsistemas: agricultura, incluida la producción de alimentos, matadero, comercio, consumo y transporte. Los resultados del análisis demostraron que la carga ambiental de la carne fresca de cerdo está asociada principalmente con la etapa agrícola. Las cargas ambientales asociadas con otras etapas, como el comercio, el transporte o el matadero, tienen un impacto relativamente menor.

Noya, y otros (2017) evaluaron los impactos ambientales de la cadena productiva tradicional del cerdo en Cataluña a través de un enfoque de ACV de la cuna a la puerta, teniendo en cuenta 1 kg de carne de cerdo cortada (fresca o congelada) como UF para la evaluación. Los límites del sistema (cadena de producción porcina en la región de Cataluña) se dividió en cuatro subsistemas principales: producción de forraje (S1), explotación ganadera (S2), matadero (S3) y despiece de cerdo (S4). Los resultados de la evaluación mostraron que tanto la producción de forraje como las actividades de transporte fueron identificadas como las etapas críticas del sistema. Bajo esta premisa, se propusieron esquemas alternativos basados en la filosofía de la EC para explorar los beneficios potenciales de este nuevo enfoque en relación con el caso base. Los resultados comparativos evidenciaron las ventajas ambientales de transitar hacia sistemas productivos de ciclo cerrado en relación a la situación base (sistema lineal tradicional). Las acciones de mejora centradas en las actividades de transporte demostraron tener la mayor influencia ventajosa, seguidas de la valorización eficiente tanto de coproductos como de residuos.

Dorca-Preda, y otros (2021) realizaron un análisis detallado del impacto ambiental de la carne de cerdo danesa de un periodo de 10 años (2005 a 2016), basado en conjuntos de datos representativos de granjas porcinas y datos específicos de mataderos. Utilizaron un enfoque de evaluación del ciclo de vida desde la cuna hasta la puerta del matadero, teniendo en cuenta

categorías de impacto como el Cambio Climático (CC), el Potencial de Eutrofización (EP), el Potencial de Acidificación (AP), el Agotamiento Abiótico (combustibles fósiles) (AD), la Ocupación de la Tierra (LO) y Los daños a la Biodiversidad (BD); expresaron tres unidades funcionales (peso vivo, peso de la canal y 'carne' para consumo humano). Los límites del sistema (producción porcina danesa) fueron la producción animal, el proceso de matanza (matadero), manejo de subproductos y producción de insumos como alimento y energía. El estudio concluye que el impacto ambiental de la carne de cerdo danesa disminuyó en relación con todas las categorías de impacto ambiental, pero especialmente para CC (-31 %), EP (-26 %) y AD (-45 %). La disminución fue el resultado de cambios biológicos y tecnológicos identificados en la producción porcina danesa. Además, a nivel de mataderos identificaron que el mejor aprovechamiento de los subproductos contribuyó a una reducción de más del 50% en el impacto del matadero.

Cabe referir, que en la mayoría de los estudios se utilizó un alcance descrito como de la puerta de la cuna a la granja, lo que significa que en estos proyectos se consideraron todas las fases comprendidas desde el cultivo (insumos y productos para la alimentación) hasta la fase de crías de animales (Pirlo et al., 2016; Lamnatou et al., 2016; Noya et al., 2017; Bava et al., 2017). En cambio, los impactos asociados con el sacrificio (matadero) y el procesamiento tienen menor consideración en las publicaciones científicas (Andretta et al., 2021).

Por otro lado, los resultados de la evaluación de los diferentes estudios se expresaron con mayor frecuencia en las siguientes categorías de impacto: cambio climático, la eutrofización , la acidificación , la ocupación de la tierra (o uso de la tierra) y el uso de energía no renovable.

En cuanto a las conclusiones derivadas de los estudios, la producción de alimentos, es decir, los ingredientes de los alimentos, son responsables de la mayor parte del impacto de la producción de carne porcina (Reckmann et al., 2012) (Arrieta & González, 2019) (Sporchia et al., 2021)(Liu et al., 2021)(Dorca-Preda et al., 2022). Las granjas son responsables de la parte del impacto restante (Reyes et al., 2019), seguidas principalmente por el procesamiento de carne en los mataderos (Six et al., 2017). Para este último, se propusieron diferentes alternativas para la valorización de los subproductos animales derivados del matadero (González-García et al., 2015) (Winkler et al., 2016).

En definitiva, se han publicado varios estudios sobre el impacto ambiental de la producción porcina, pero solo unos pocos han incluido el proceso en los mataderos en sus trabajos. Se deben realizar más estudios para comprender mejor su impacto ambiental en la producción moderna de carne de cerdo. De acuerdo a Fraval, y otros (2018), la presión sobre el medio ambiente, crea una necesidad continua de realizar LCA para informar la toma de decisiones. Los escenarios de hoy deberán revisarse y ampliarse para adaptarse a contextos futuros y un alcance geográfico más amplio.

3. Metodología

La metodología empleada para lograr los objetivos anteriormente descritos se basa en lo siguiente:

3.1. Revisión de antecedentes

Se realizó una revisión de la literatura mediante la consulta en informes y artículos científicos, revistas y libros especializados, y en las bases de datos gubernamentales, como el Instituto Nacional de Estadística y de Eurostat. Para contrastar y complementar los resultados obtenidos

en las bases de datos, se revisaron otros Trabajos de Fin de Grado, Trabajos de Fin de Máster y Tesis Doctorales obtenidas de repositorios digitales.

3.2. Trabajo de campo

En segundo lugar, se realizaron visitas de campo, entrevistas y toma de datos experimentales en diferentes mataderos próximos a Barcelona para conocer el proceso de producción, así como, su situación en relación a los residuos que se generan.

Para esto, se dispuso de una hoja de recopilación de datos con cuatro apartados principales: 1) información de identificación del grupo o institución que proporcionó los datos y fecha en que se recaba la información, 2) descripción del proceso unitario, 3) características del producto obtenido, y 4) datos de proceso, que incluyan entradas de recursos y salidas de residuos, emisiones y productos. Las entradas de recursos correspondieron a las materias primas utilizadas, el agua y energía consumidas.

Asimismo, se entrevistaron empresas de valorización de residuos de mataderos donde el matadero visitado envía parte de sus subproductos, para tomar datos de campo que permitan construir los diagramas de flujos y las tablas de los residuos que se generan.

3.3. Elaboración del diagrama de flujo de los mataderos tipo

Una vez definido el estado de arte y recopilado los datos de campo, se construyó los siguientes diagramas:

- Diagrama de flujo del proceso productivo: El diagrama de operaciones unitarias que muestre de forma ordenada las diferentes etapas del proceso productivo de un matadero de cerdos, las entradas y salidas, incluyendo materias primas, agua, productos, subproductos, residuos y energía.

- Diagrama de sinergias: En el diagrama de sinergias a partir del diagrama de proceso se representan los flujos de entrada y salida, con mayor énfasis en las valorizaciones y usos existentes para todos los flujos residuales del matadero tipo.

La representación gráfica de los diagramas se realizó mediante el software Diagram.net. Asimismo, la representación del diagrama de sinergias se usó el código de colores del Grupo de Investigación en Ecología Industrial mostrado en la Figura 7.

Descripción	Flujo	Código del color Modo del color: RGB	Flujo residual
Materias primas		Rojo: 0;Verde: 176;Azul: 80	
Productos		Rojo: 204;Verde: 0;Azul: 255	
Intercambio interno del proceso		Rojo: 0;Verde: 0;Azul: 0	
Energía		Rojo: 255;Verde: 0;Azul: 0	
Agua		Rojo: 0;Verde: 112;Azul: 192	
Residuos		Rojo: 127;Verde: 96;Azul: 0	
Propuestas/alternativas de nuevas sinergias		Rojo: 255;Verde: 153;Azul: 0	

Figura 7. Codigo de colores para el diagrama de sinergias. Fuente: Lule y Cervantes (2010)

3.4. Recopilación de la valorización de residuos

A partir de las entrevistas y visitas realizadas, y del análisis exhaustivo de la literatura existente se recopiló información sobre las alternativas que existen a la hora de valorar los diferentes residuos de un matadero de cerdos.

3.5. Análisis de ciclo de vida

Una vez definido el estado de arte, para evaluar el impacto ambiental, se aplica la metodología del ACV al proceso de producción de carne de cerdo, siguiendo los pasos descritos en la norma UNE-EN ISO 14040:2006 y UNE-EN ISO 14044:2006 sobre principios y marco de referencia del ACV. Con base en estas normas se desarrollarán los siguientes puntos:

3.5.1. Definición de objetivo y alcance

De acuerdo a lo señalado en la ISO 14040, 2006, el objetivo del ACV se define especificando la aplicación prevista para el estudio, las razones para realizarlo, el público a quienes se previó comunicar los resultados y el hecho de si los resultados obtenidos se utilizarían en divulgaciones científicas.

En la definición del alcance se describirán los siguientes puntos:

- ***Unidad Funcional (UF)***

La unidad funcional del estudio se estableció en base a la función principal del proceso de producción.

- ***Descripción del sistema y límites del sistema.***

Se hizo una descripción detallada del proceso de producción de carne de cerdo en un matadero tipo a partir del diagrama de flujo del proceso productivo descrito anteriormente. Por lo tanto, se tuvo en cuenta todos los procesos que se realizan en el matadero desde el ingreso de materia prima, hasta la salida del producto. Se identificaron entradas y salidas de materia prima, agua, productos, subproductos, residuos y energía.

Los límites del sistema se definieron conforme a las especificaciones de la norma ISO 14040, 2006 (ISO, 2006a). De acuerdo a lo señalado por la norma, se consideró si el estudio comprendería los siguientes puntos:

- Adquisición de materias primas.
- entradas y salidas en la secuencia principal de fabricación / transformación
- distribución/ transportación
- producción y uso de combustibles, electricidad y calor
- uso y mantenimiento de productos
- disposición final de residuos del proceso y de productos;
- Valorización de residuos

Cabe enfatizar que, se evaluaron los impactos de la valorización de residuos, aunque este tipo de actividades queda excluido de los límites del sistema en el escenario base.

- ***Enfoque de asignación***

De acuerdo a las recomendaciones de la normativa ISO, se evitó la asignación a través de la expansión del sistema.

- ***Suposiciones y limitaciones***

Se definieron las suposiciones y limitaciones del estudio de acuerdo a lo especificado en la norma ISO 14040, 2006.

3.5.2. Análisis del inventario de ciclo de vida

En este estudio, los datos primarios del inventario del sistema se obtuvieron a partir de la entrevista y visitas de campo a diferentes mataderos representativos próximos a la ciudad de Vic, Barcelona, en la región Cataluña, España; ya que los datos reales reducen incertidumbres y aseguran resultados ambientales representativos. A partir de ello se identificaron todos los flujos de energía y materiales apreciables, mediante el software MS Excel. Estos datos primarios se completaron con datos secundarios tomados de la base de datos ecoinvent® para completar el inventario de fondo.

Los datos de inventario correspondientes a los procesos de valorización se toman de las visitas y entrevistas a empresas de valorización.

3.5.3. Evaluación del impacto

En esta etapa, se llevó a cabo la clasificación y la caracterización del estudio a partir de los datos del inventario de ciclo de vida. Cabe referir que no se tiene previsto incorporar la normalización ni la ponderación, ya que estos elementos opcionales no proporcionan información robusta adicional para los objetivos del estudio (ISO, 2006a).

Los resultados de la evaluación de este estudio se expresaron en las siguientes categorías de impacto: el cambio climático (CC), la acidificación terrestre (AT), la eutrofización de agua dulce (EA), la eutrofización marina (EM), el agotamiento del agua (CA) y el agotamiento de recursos fósiles (RF) y radiación ionizante (RI). Ya que fueron identificados como los de principal interés para el sector porcino de acuerdo con estudios previos relacionados (Reckmann et al., 2012).

Para el cálculo de los resultados de todas las categorías mencionadas, se consideraron los factores de caracterización reportados por el método ReCiPe Midpoint (H) (Goedkopp et al., 2016). Todos los cálculos para procesar los inventarios se ejecutaron en el software SimaPro 9.5.

3.5.4. Interpretación de resultados

En este último paso de estudio de ACV, se evaluaron los resultados del análisis de inventario y de la evaluación de impacto para facilitar conclusiones en función del Objetivo y el Alcance del estudio. También se describieron las limitaciones identificadas en relación a los datos y los métodos de cálculo utilizados. El objetivo de la Interpretación estuvo dirigido a llegar a conclusiones y propuestas de mejora para el cierre del ciclo del matadero tipo.

3.6. Propuesta de estrategias para el cierre del ciclo

Finalmente, con la información recopilada del matadero, los resultados del ACV y de la literatura, se formularon nuevas alternativas de valorización y de mayor valor añadido respecto a las

actualmente existentes. Se propuso una tabla de posibilidades para la valorización de los diferentes residuos de un matadero de cerdos tipo, como una opción de cierre de ciclo en el marco de la economía circular.

4. Resultados

4.1. Resultados del análisis de un matadero de cerdos tipo

Conforme a los métodos descritos anteriormente en este apartado del estudio se muestra y analiza el proceso productivo de un matadero tipo.

4.1.1. Diagrama de flujo de proceso productivo

El proceso productivo de un matadero de cerdos tipo, como el que se ha visitado en el marco de este estudio, consta de 22 operaciones unitarias, como se puede observar en el diagrama de operaciones unitarias de la siguiente figura:

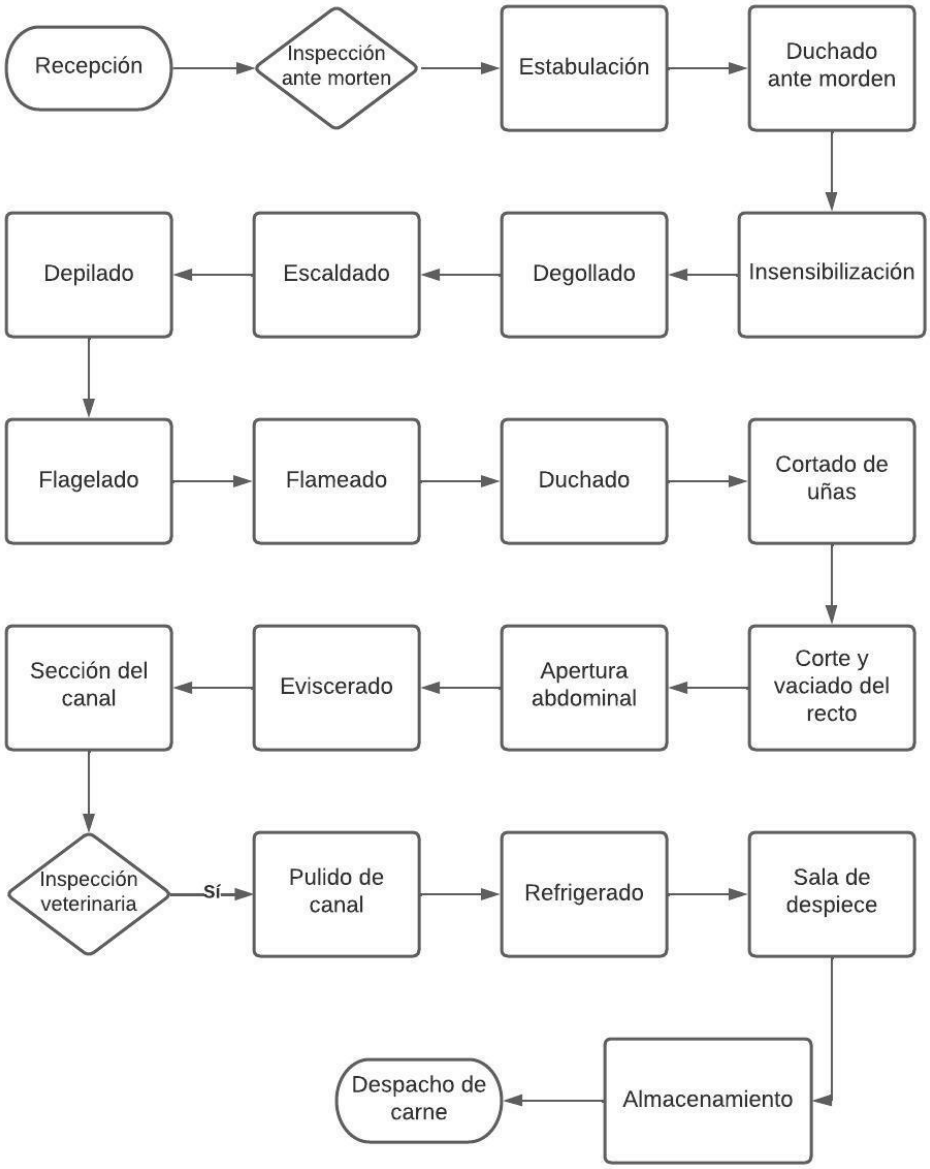


Figura 8. Flujo de proceso de operaciones unitarias de un matadero tipo

Entre las que se encuentran la recepción, inspección ante mortem, estabulación, duchado ante mortem, insensibilización, degollado, escaldado, depilado, flagelado, flameado, duchado, cortado de uñas, corte y vaciado del recto, apertura abdominal, eviscerado, sección del canal, inspección veterinaria, pulido de canal, refrigerado, despiezado, almacenamiento y despacho de carne.

Por otro lado en la tabla 5 se detalla el proceso productivo del matadero tipo teniendo en cuenta las entradas (inputs) y las salidas (outputs). Siendo los más representativos los ingresos de agua y energía al proceso, así como el flujo de residuos generados en cada proceso.

Tabla 5. *Resumen de entradas y salidas del proceso productivo de un matadero tipo.*

ENTRADA	**PROCESO UNITARIO**	**SALIDA**
	Recepción	Purín
		Agua residual
	Inspeccion ante morten	Cadaveres
		Purin
Energía eléctrica	Estabulación	Cadaveres
		Purín
		Agua residual
Agua	Duchado ante morten	Agua residual
Agentes de limpieza		
Energía eléctrica	Insensibilización	
CO2		
Energía eléctrica	Degollado	Sangre
Gas natural	Escaldado	Agua residual
Agua		
Energía eléctrica	Depilado	pelo
Agua		Agua residual
Energía eléctrica	Flagelado	Agua residual
Agua		
Gas natural	Flameado	Emisiones
Agua	Duchado	Agua residual
Energía eléctrica	Cortado de uñas	Pezuñas
Energia eléctrica	Corte y vaciado del recto	Recto
Energía eléctrica	Apertura abdominal	Sangre
Energía eléctrica	Eviserado	Grasa de matadero (mucosa)
		Vísceras blancas (tripas)
Energía eléctrica	Sección de canal	sangre
Energía eléctrica	Inspección veterinaria	decomisos
Energía eléctrica	Pulido de canal	Grasa de matadero
Energía eléctrica	Refrigerado	Agua residual
Energía eléctrica	Sala de despiece	huesos y grasa de despiece
Energía eléctrica	Almacenamiento	

4.1.2. Diagrama de sinergias

A continuación, teniendo en cuenta la información del apartado anterior, se presenta la síntesis global en lo que se refiere a los insumos (entradas) y flujos de los subproductos que salen del matadero de cerdos visitado.

En la Tabla 6, se describen las empresas externas a las que el matadero visitado envía actualmente algunos de los subproductos generados para que sean valorizados.

***Tabla 6**. Listado de empresas de valorización en las que van a parar algunos de los subproductos del matadero de cerdos visitado.*

TIPO DE ENTIDAD	UBICACIÓN	ACTIVIDAD	RESIDUOS USADOS
Planta de compostaje y abonos	Centelles (Barcelona)	Producción de abonos para agricultura y sustratos para jardinería	Purín y lodos de depuradora
Empresa de bioenergía	Lleida	Producción de energía (biogás)	Purines
Empresa productora de harina de carne	Lleida	Producción de harinas de carne (combustible ecológico para cementeras), fertilizantes y grasas que se utilizan para producir biodiesel	animales muertos, tripas y decomisos (Categoría 1 y 2)
Planta de compostaje	Barcelona	Planta de compostaje que realiza el tratamiento de los residuos orgánicos provenientes de empresas del sector alimentario	lodos de depuradora
Planta de biogás	Lleida	Producción de energía (biogás) a partir de la gestión y tratamiento de residuos y/o subproductos	lodos de depuradora
Fabrica de productos para la alimentación animal	Girona	Grasas y proteínas animales para nutrición animal, acuicultura, petfood, fertilizantes e industria química	Grasa de matadero, huesos, uñas, pelo, y visceras blancas (Categoria 3)
Planta de producción de proteina animal	Huesca	Producción de proteínas para la industria de la alimentación animal (piensos, alimentos para mascotas y alimentos para acuicultura).	Sangre (Categoria 3)

Las empresas externas señaladas (tabla 6) se encuentran ubicadas dentro de Cataluña, España, siendo Lleida y Barcelona las de mayor interacción con el matadero.

En el diagrama de sinergias del matadero de cerdos se muestran las entradas en las que se encuentran la materia prima, energía y agua que se usa en la elaboración del producto. Asi como sus respectivas generaciones de residuos por cada proceso unitario, puesto que es el ámbito de interés del presente proyecto.

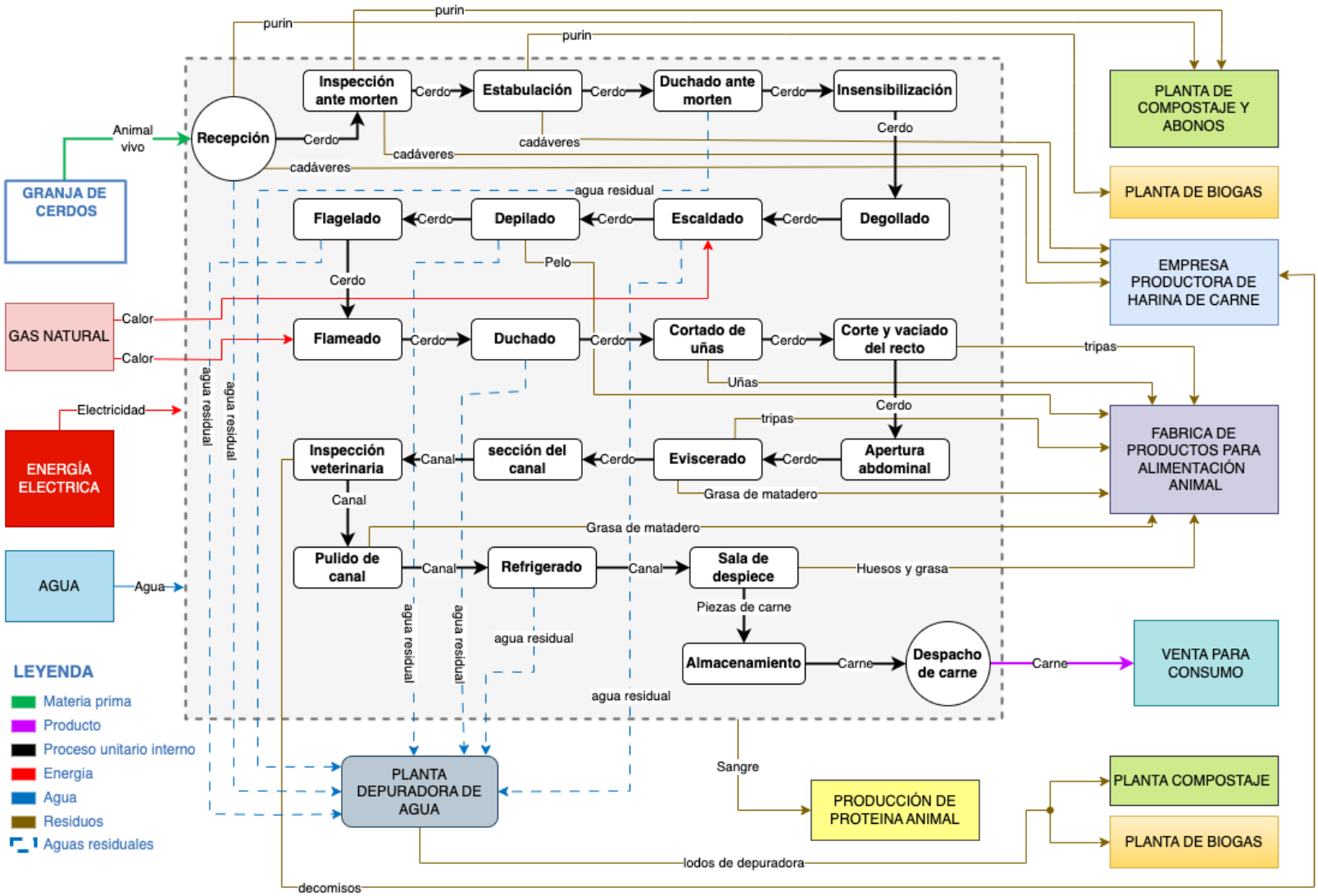


Figura 9. Diagrama de sinergias existentes del matadero de cerdos tipo

La información condensada acerca de la materia prima (animal vivo), energía y agua que el matadero usa en la elaboración de su producto, así como sus respectivas generaciones de residuos y productos se describen en la Figura 9.

En la Figura 9 se muestran las sinergias existentes entre los diferentes procesos unitarios del matadero visitado con las empresas externas relacionadas, empezando por la recepción, la inspección ante mortem y la estabulación, se obtienen los mismos cuatro subproductos: cadáveres, purín, fangos y agua residual. Los cadáveres de los animales que mueren antes de entrar en el matadero se utilizan para la producción de abono y biogás. El purín, que consiste en la orina de los cerdos más o menos diluida en agua residual y mezclada con heces, se utiliza también para producir abonos. Los fangos, que son suciedad de los animales mezclada con heces y también lodos de depuradora, se destinan a la producción de biogás. Por último, el agua residual entra en la depuradora propia del matadero y se obtiene agua tratada.

A continuación vienen las etapas previas al eviscerado. En el baño ante mortem el residuo es agua residual que va a parar a la depuradora del matadero y se obtiene agua tratada. En la etapa de degollado se obtiene la sangre que, en este caso, se utiliza para producir subproductos de la sangre y también se envía a centros de recuperación. En el depilado se obtiene pelo que se utiliza para la producción de fertilizantes de alta calidad. En el duchado y escaldado, el subproducto obtenido es agua residual, que pasa por la depuradora del matadero y da agua tratada. En el corte de uñas se obtienen las uñas que se utilizan para la producción de alimento animal. Por último, antes del eviscerado, existe el corte y vaciado del recto, etapa en la que se obtiene como subproducto el contenido intestinal, utilizado para la producción de biogás, mientras que en la apertura abdominal se obtiene sangre.

La etapa de eviscerado es en la que más subproductos se obtienen en el proceso productivo de un matadero. Las glándulas, las vísceras blancas que no se destinan a consumo humano, los pulmones, la tráquea, la grasa, la vejiga, la próstata y la tela intestinal se utilizan para producir abonos y biogás. Por lo que se refiere a la mucosa intestinal (grasa de matadero) son enviados para la producción de alimentos para animales.

En la sección del canal se obtiene sangre, mientras que la etapa de inspección veterinaria tiene como subproductos los cadáveres decomisados por el veterinario junto con las vísceras que corresponden a estos cadáveres decomisados. Los decomisos se utilizan en la producción de abonos y biogás.

En el pulido de canal se obtiene grasa de matadero que se utiliza en la producción de abono y biogás. En la etapa de refrigerado se genera agua residual que se envía a la depuradora propia del matadero para obtener agua tratada.

Por último, en el despiece se obtienen huesos y grasa de despiece que son usados en la producción de alimentación animal.

4.2. Análisis de ciclo de vida

4.2.1. Objetivo y alcance del ACV

4.2.1.1. Objetivo

El objetivo definido de este ACV es calcular el impacto ambiental potencial del proceso de producción de carne porcina en Cataluña bajo prácticas convencionales de un matadero tipo, con la finalidad de saber desde una perspectiva ambiental qué etapas e insumos del proceso de producción conllevan a una mayor carga ambiental.

La razón para realizar este estudio es que actualmente no se tiene documentado el impacto ambiental del proceso de producción de carne de cerdo que se realiza en un matadero tipo. Por tal motivo, se prevé que los resultados de este ACV sean comunicados a los desarrolladores del proceso de producción con la finalidad de disminuir su impacto ambiental. De igual modo, se pretende utilizar los resultados para proponer estrategias y/o sinergias para el cierre del ciclo productivo. Este trabajo se desarrolla con fines académicos.

4.2.1.2. Alcance

- ***Unidad Funcional (UF) y función del sistema***

La función del sistema es producir carne de cerdo como alimento para el consumo. La función primaria es satisfacer la necesidad de proteínas del cuerpo humano. En consecuencia, la unidad funcional se establece como 1 kg de carne de cerdo a la salida del matadero.

Esta elección corresponde a razón de que las UF basadas en la masa prevalecen sobre otras opciones en la mayoría de las LCA revisadas para el sector porcino, especialmente en términos de kg (Nguyen et al., 2011; Reckmann et al., 2013; Noya et al., 2017).

- ***Descripción del sistema y límites del sistema.***

El sistema en estudio corresponde a la producción de carne de cerdo en Barcelona, Cataluña bajo prácticas y/o procesos unitarios convencionales de un matadero tipo.

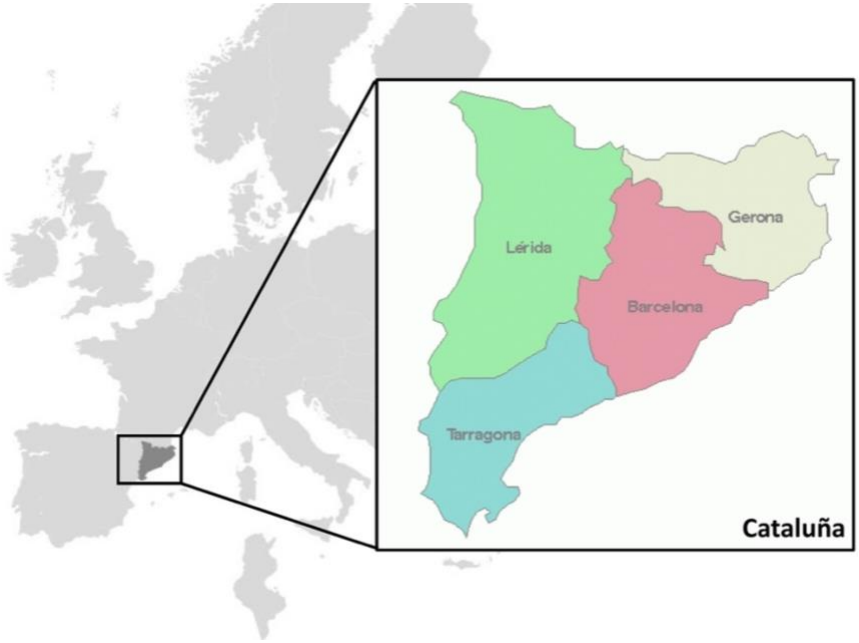


Figura 10. Ubicación del sistema de producción de carne de de cerdo (Cataluña, España).

Los límites del sistema están definidos como una perspectiva de la puerta a la puerta por los procesos unitarios identificados que se muestran en la Figura 11. Por lo tanto, el estudio considera todos los procesos que se realizan en el matadero desde el transporte de la materia prima (incluidos los cerdos), sacrificio, despiece, hasta la salida del producto del matadero: carne de cerdo. Así, se consideraron los impactos ambientales relacionados con el consumo de materia prima, agua, energía, la generación de residuos, emisiones y aguas residuales en todo el procesos productivo, entre los que se encuentran: la recepción, inspección ante mortem, estabulación, baño ante mortem, aturdimiento, degollado, escaldado, depilado, flagelado, flameado, duchado, corte de uñas, corte y vaciado del recto, apertura abdominal, eviscerado, sección del canal, inspección veterinaria, despiezado, refrigerado y almacenamiento.

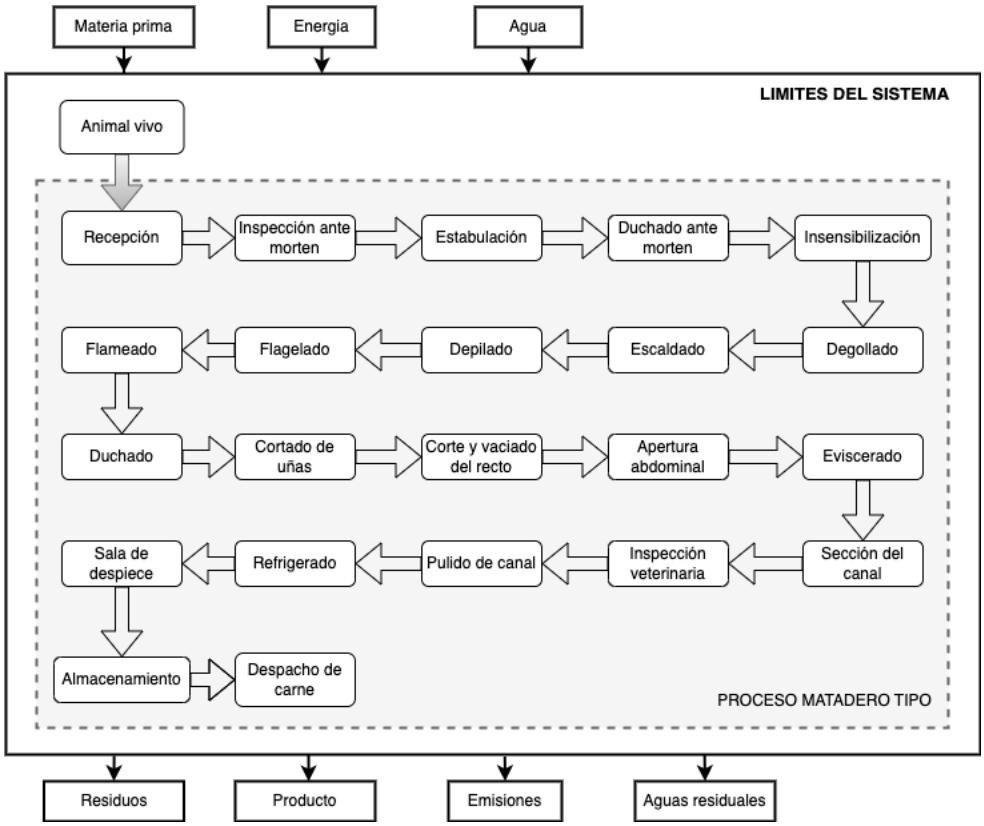


Figura 11. Definición y límites del sistema de producción estudiado incluyendo los principales procesos involucrados.

Se consideran fuera del sistema, las etapas o los impactos correspondientes al envasado de carne de cerdo, la venta al por menor, el consumo y la disposición final de alimentos, ya que no han reportado contribuciones notables al perfil ambiental global en estudios previos relacionados con sistemas de producción de carne de cerdo (Nguyen et al., 2011; González-García et al., 2015). Tampoco se considera la producción de bienes de capital (maquinaria y equipos utilizados en el proceso de producción), ni las infraestructuras, conforme a lo recomendado por la British Standards Institución (British Standard Institution, 2008).

De manera similar, los subproductos animales del sistema se consideran como residuos biodegradables de acuerdo con Reckmann et al. (2013) y su posterior valorización ha sido excluida de los límites del sistema de matadero tipo (escenario base). La reutilización de subproductos animales se ha considerado en un análisis de sensibilidad en el que se han propuesto y discutido alternativas de mejora.

- ***Requisitos de la calidad de los datos***

Este estudio ha contado con la participación de mataderos representativos del sector de la producción de carne de cerdo en Cataluña, las mismas que se visitaron y entrevistaron para la obteción de datos. Teniendo en cuenta los datos anuales del sistema de contabilidad empresarial en relación a las diferentes etapas de la cadena productiva, se elaboró un inventario global para el producto de salida. Como resultado se obtuvo un inventario de datos primarios completos de nivel 1, conforme a los principios de orientación global para la evaluación del ciclo de vida (UNEP, 2011).

Asimismo, los datos no recopilados en la visita de campo (nivel 1), son completados con datos de Ecoinvent 3.9.1 y de estudios similares revisados del ambito centroeuropeo, considerados como datos secundarios del nivel 2.

- ***Limitaciones y suposiciones***

Como parte de los criterios para delimitar el sistema en estudio, se supone que el producto final del matadero tipo es carne fresca, resultado del cerdo sacrificado y despiezado, sin considerar otros pasos de procesamiento a las ya descritas en la Figura 11. Por otro lado, también se asume que la materia prima (cerdos vivos) procede de un rango de distancia de transporte promedio de 500 km a la ubicación del matadero.

Por otro lado, una limitación es el hecho de que las bases de datos del software utilizados para complementar la información primaria es del ámbito europeo y por tanto el impacto potencial asociado a la producción de carne de cerdo puede no corresponder totalmente a la realidad de Cataluña.

4.2.2. Análisis del inventario de ciclo de vida

La relevancia de un estudio de ACV está directamente relacionada con la calidad de los datos del inventario. En este sentido, para asegurar la calidad de los datos y reducir incertidumbres, se ha priorizado el uso de datos reales, minimizando la información procedente de bases de datos y otras referencias bibliográficas que no comparten condiciones de operación similares.

En este estudio, los datos de inventario para el sistema que intervienen en la cadena productiva, son datos primarios, que se obtuvieron mediante encuesta y visita a las instalaciones de los mataderos de cerdos catalanes representativos. Todos estos datos primarios corresponden al año 2022. La Tabla 7 muestra una descripción detallada de los datos del inventario primario más representativos para el sistema de producción de carne de cerdo bajo análisis, donde figura el consumo de recursos (agua, energía, productos de limpieza), la producción de emisiones al aire y agua, asi como la gestión de residuos de matadero. Los datos de inventario global detallados en la Tabla 7 se reportan por unidad funcional (1 kg de carne de cerdo saliente).

Tabla 7. *Inventario de datos resumidos del sistema de producción de carne de* cerdo en un matadero *por unidad funcional (1 kg de carne de* cerdo *saliente).*

Entradas/Salidas	**valor**	**Unidad**
Entradas		
Cerdo (Peso vivo)	1.28	kg
Agua	1.97	L
Electricidad	0.18	kWh
Gas natural	4.88	g
Gas propano	0.20	g
Productos de limpieza	0.92	g
Transporte-camión	640	kgkm
Salidas		
Carne de cerdo	1	kg
Aguas residuales tratadas	1.96	L
Residuos de matadero		
sangre	30.43	g
huesos y grasa	75.94	g
purines	16.33	g
animales muertos	0.77	g
Tripas	0.18	g
decomisos	5.68	g
Lodos de depuradora	24.88	g
Emisiones al aire		
Dióxido de carbono (CO2)	12.94	g
Monóxido de carbono (CO)	2.32	mg
Metano (CH4)	0.32	mg
Óxido de nitrogeno (NOx)	15.53	mg
Emisiones al agua		
DQO	140.85	mg
Nitrogeno total	21.52	mg
Cloruros	2310.27	mg
COT	46.95	mg

Cabe destacar que el cerdo para sacrificio (peso vivo), mostrado en la tabla 7, se obtiene a partir de un peso en canal (al sacrificio) de unos 94 kg a partir del peso vivo de un cerdo en el momento del sacrificio, que es de 120 kg. Asimismo, teniendo en cuenta la ubicación de granjas y mataderos se ha considerado que los cerdos para sacrificio al final del periodo de engorde, fueron transportados 500 km desde la granja hasta el matadero (unidad de sacrificio). De esta manera fue posible representar circunstancias típicas de la región Cataluña.

4.2.1. Evaluación e interpretación del impacto ambiental

4.2.1.1. Resultados ambientales generales

La Tabla 8 informa los resultados de desempeño ambiental en las categorías de impacto seleccionadas para la producción de carne de cerdo de un matadero tipo (1 kg de carne de cerdo saliente), los mismos que se analizan a continuación.

Tabla 8. *Resultados de la evaluación de impacto por UF (1 kg de carne de cerdo saliente) asociado a la producción de carne de porcino en un matadero tipo.*

Categorías de impacto	**Unidades**	**Resultados ambientales (UF)**
Cambio climático (CC)	kg CO2 eq	8,384
Radiación ionizante (RI)	kBq Co-60 eq	3,29E-05
Formación de ozono, Salud humana (FOS)	kg NOx eq	0,014
Formación de partículas finas (PF)	kg PM2.5 eq	0,019
Formación de ozono, Ecosistemas terrestres (FOE)	kg NOx eq	0,014
Acidificación terrestre (AT)	g SO2 eq	87,43
Eutrofización de agua dulce (EA)	g P eq	1,79
Eutrofización marina (EM)	g N eq	9,59
Ecotoxicidad terrestre (ECT)	kg 1,4-DCB	11,989
Ecotoxicidad en agua dulce (ECA)	kg 1,4-DCB	0,192
Ecotoxicidad marina (ECM)	kg 1,4-DCB	0,133
Toxicidad humana cancerígena (TH-C)	kg 1,4-DCB	0,092
Toxicidad humana no cancerígena (TH-NC)	kg 1,4-DCB	1,786
Escasez de recursos fósiles (RF)	kg oil eq	0,981
Consumo de agua (CA)	m3	0,391

La producción de carne de cerdo asociado a un matadero tipo resultó en un impacto al cambio climático (CC) de 8,38 kg CO2-eq por kg de carne de cerdo. La Eutrofización de agua dulce (EA) y Eutrofización marina se estimó en 1,79 g P-eq y 9,59 g N-eq por kg de carne de cerdo respectivamente, mientras que la Acidificación terrestre (AT) mostró un valor de 87,4 g SO2-eq por kg de carne de cerdo. Los resultados más detallados para las diferentes categorías de impacto se describen en la figura 12.

La figura 12 muestra la distribución de los resultados ambientales por cada proceso contribuyente en las categoría de impacto más relevantes (CC, RI, AT, EA, EM, ECT, ECA, ECM, TH-C, TH.NC, CA, RF). De esta forma, es posible conocer la contribución de cada entrada y salida del proceso de matadero tipo sobre el producto final. Para facilitar el análisis, los procesos se agruparon en diferentes factores contribuyentes: materias primas, agentes de limpieza, agua, uso de energía (electricidad, gas natural y propano), aguas residuales y gestión de residuos de matadero. Dado que el producto final mostró una contribución menor (menos del 1%) en todas las categorías de impacto, por tanto, no se representan en la figura.

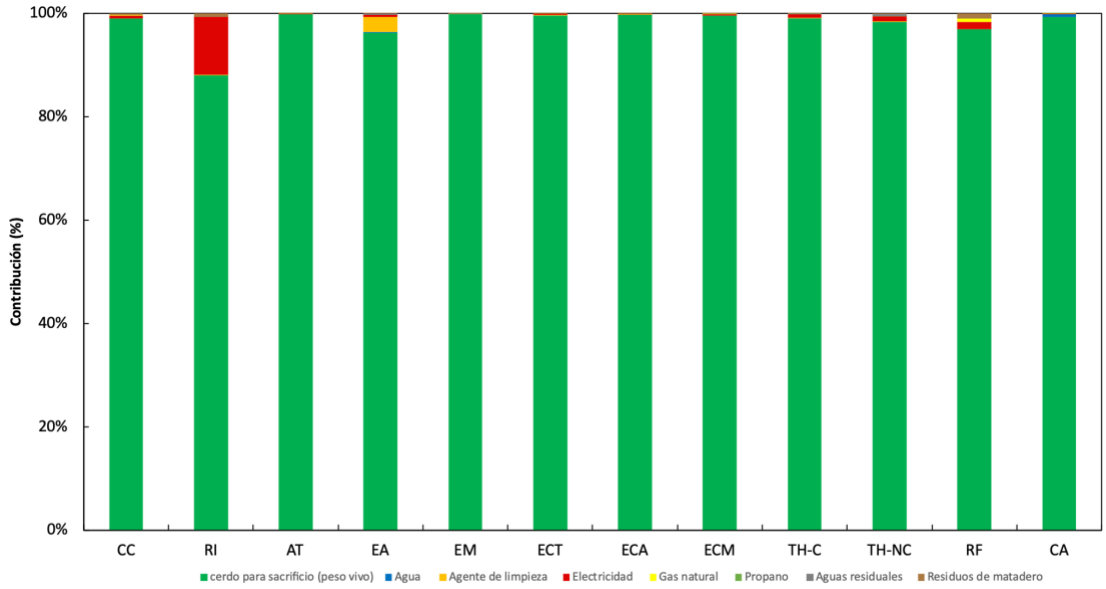


Figura 12. Aportes (en %) de los procesos involucrados en la producción de carne de cerdo en un matadero tipo a las categorías de impacto. Siglas de las categorías de impacto: CC = cambio climático; RI = radiación ionizante; AT = acidificación terrestre; EA = eutrofización de agua dulce; EM = eutrofización marina; ECT = Ecotoxididad terrestre; ECA = Ecotoxididad de agua dulce; ECM = Ecotoxididad marina; TH-C = toxicidad humana cancerígena; TH-NC = toxicidad humana no cancerígena; RF = agotamiento de recursos fósiles; CA = agotamiento de agua.

De acuerdo con los resultados, la materia prima que ingresa al matadero (cerdo para sacrificio, peso vivo) es la responsable de mayor proporción del impacto total en cada una de las categorías de impacto seleccionadas (97,7%), seguidas principalmente por el requerimiento de energía eléctrica (0,98%) y agentes de limpieza (0,08%). Los residuos de matadero (sangre, huesos y grasa, purines, cerdo muerto, tripas y decomisos) muestran contribuciones de impacto menos significativos al perfil ambiental total.

Ahora bien, dado que la producción de cerdo para sacrificio está fuera del control y alcance de los gestores del matadero, con la finalidad de facilitar el análisis y ampliar el panorama de los resultados se ha prestado especial atención a otros procesos que podrían afectar directamente a las actividades productivas dentro del matadero tipo. En ese sentido la figura 13 muestra las contribuciones de los procesos involucrados en la producción de carne de cerdo en un matadero tipo, excluyendo la materia prima (cerdo para sacrificio).

De acuerdo con los aportes reportados en la figura 13, la producción de los requerimientos de electricidad en el matadero tipo es un factor significativo con un aporte superior al 11% en la categoría de radiación ionizante (RI), así como una contribución importante en otras categorías de impacto como CC, AT, ECT, ECA, ECM, TH-C, TH-NC. Destacan también los requerimientos de agentes de limpieza el cual muestra una contribución destacable en eutrofización de agua dulce (EA) y en menor medida en relación a eutrofización marina (EM), esto en razón a las emisiones derivadas de sus procesos de producción.

Los requerimientos de agua del grifo es importante como se esperaba en consumo de agua (CA). Por su parte, la producción de gas natural requerido como combustible y calor en el proceso productivo (escaldado y flameado) del matadero tipo es un punto significativo en términos de agotamiento de recursos fósiles (RF) y en menor medida en cambio climático (CC). Mientras que los requerimientos de propano muestran contribuciones de impacto insignificantes.

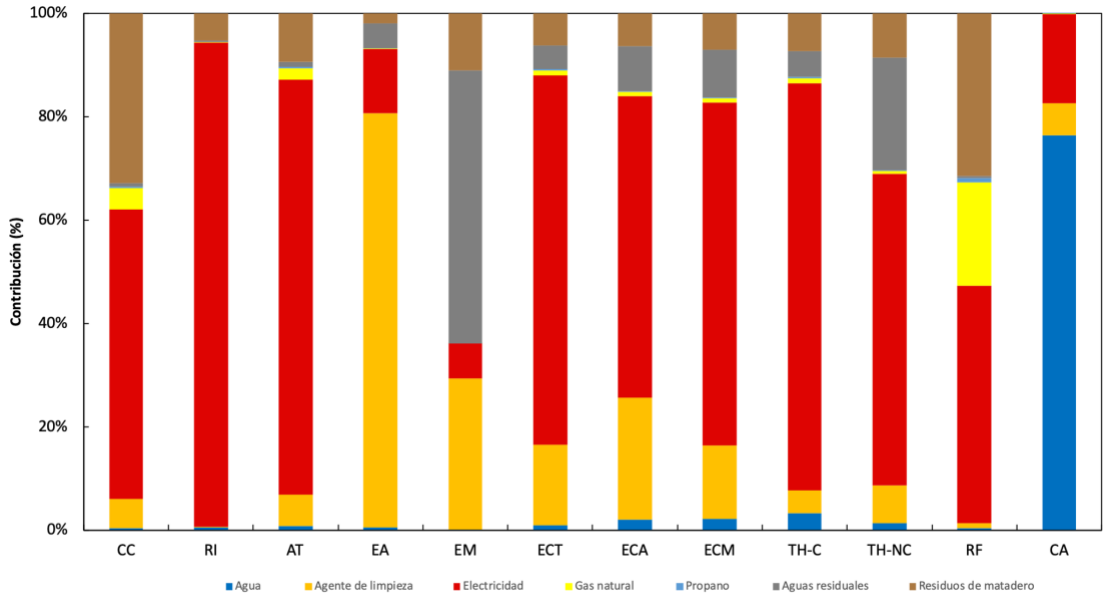


Figura 13. Aportes (en %) de los procesos involucrados en la produccion de carne de cerdo en un matadero tipo a las categorias de impacto, excluyendo la materia prima (cerdo para sacrificio). Siglas de las categorías de impacto: CC = cambio climático; RI = radiación ionizante; AT = acidificación terrestre; EA = eutrofización de agua dulce; EM = eutrofización marina; ECT = Ecotoxididad terrestre; ECA = Ecotoxididad de agua dulce; ECM = Ecotoxididad marina; TH-C = toxicidad humana cancerígena; TH-NC = toxicidad humana no cancerígena; RF = agotamiento de recursos fósiles; CA = agotamiento de agua.

Por otro lado, las aguas residuales producidas en el matadero son enviadas a una EDAR, cuyo funcionamiento se ha considerado dentro de los límites de este sistema. Sin embargo, este proceso presenta bajas contribuciones a los impactos totales evaluados, aunque es visible su impacto en en relación a eutrofización marina (EM).

Finalmente, los residuos de matadero (sangre, huesos y grasa, purines, cerdo muerto, tripas y decomisos) derivados del proceso productivo del matadero tipo, reportan una ligera contribución al perfil ambiental en términos de RF y CC, siendo insignificante en las demás categorías analizadas.

4.2.1.2. Resultados ambientales por categoría de impacto

- ***Cambio climático (CC)***

Los resultados en esta categoría de impacto se expresan en términos de kg CO2 eq, lo que representa un horizonte temporal de 100 años. El más influyente en CC es el sumnistro de materia prima que ingresa al matadero tipo, es decir, cerdo para sacrificio (peso vivo), que contribuye con el 98% del valor total. La producción de cerdo para sacrificio afecta considerablemente esta categoría de impacto, como se informó anteriormente. El requerimiento de electricidad resultó en 0,046 kg CO2 eq (0,5%), mientras que el requerimiento de residuos de matadero reflejan el 0.3% de la CC total, siendo huesos y grasa, sangre y purín los residuos de mayor contribución. Otros insumos como agentes de limpieza, agua, gas natural y aguas residuales son insignificantes. Los gases que más contribuyen al CC son el CO2, N2O y CH4, que representan el 57%, 32% y 11% de las emisiones totales de GEI, respectivamente.

- ***Radiación ionizante (RI)***

Esta categoría de radiación ionizante, es relativa a la emisión antropogénica de sustancia de referencia cobalto-60 al aire (radionúclidos). Los valores se informan en kBq Co-60 eq (Kilobecquerel de Cobalto-60 equivalente). Según los resultados, la mayor parte del impacto (88

%) se deriva del insumo principal, cerdo para sacrificio, mientras que el otro porcentaje representativo se deriva de los servicios de electricidad (es decir, el 11 %).

- ***Acidificación terrestre (AT)***

Esta categoría evalúa el cambio de acidez en el suelo debido a la emisiones al aire de sustancias acidificantes inorgánicas como sulfatos, nitratos y fosfatos. Los resultados se expresan en kg de SO2 equivalente. En esta categoría, el 99% de las emisiones acidificantes totales se derivan de la materia prima, cerdo para sacrificio. Las principales sustancias que contribuyen a la AT son NH3 (62%), NOx (20%) y SO2 (17%). La participación de los demás factores fue insignificante.

- ***Eutrofización de agua dulce (EA) y eutrofización marina (EM)***

La eutrofización consiste en el enriquecimiento del medio acuático en nutrientes como consecuencia de las actividades humanas, considerando aquellos nutrientes que limitan el rendimiento de la biomasa acuática, principalmente el fitoplancton. El crecimiento del fitoplancton depende de la disponibilidad de P y N. El método ReCiPe empleado en este estudio, considera dos tipos de eutrofización dependiendo si el enriquecimiento de nutrientes es a nivel de agua dulce (EA) o agua de mar (EM), ya que ambos presentan diferentes nutrientes limitantes. Así, el potencial de eutrofización en agua dulce y agua de mar se mide por el enriquecimiento en fósforo (kg P eq) y por el enriquecimiento en nitrógeno (kg N eq), respectivamente.

En ambas categorías, una vez más la producción de porcino para sacrificio es la actividad enteramente responsable de las sustancias contribuyentes (96% y 99% respectivamente para EA y EM). Las emisiones de PO_4^{-3} y P son responsables de los aportes al EA. Con respecto a EM, las emisiones de NO_3 es la principal sustancia que contribuye a esta categoría de impacto. Este resultado tiene sentido, dado que el caso de los cerdos, estos nutrientes son impulsados principalmente por la producción de alimento y orina (purin) (Kleanthous, 2009).

- ***Categorías relacionadas con la toxicidad***

En este estudio, se han considerado para la evaluación cinco categorías diferentes relacionadas con la toxicidad: toxicidad humana, subdividida en cancerígena (TH-C) y no cancerígena (TH-NC), ecotoxicidad terrestre (ECT), ecotoxicidad de agua dulce (ECA) y ecotoxicidad marina (ECM). Los resultados de la caracterización se presentan en kg de 1,4-diclorobenceno (BC) eq. En estas cinco categorías, el cerdo para sacrificio que ingresa al matadero tipo como materia prima, ha sido la actividad responsable de contribuir con las emisiones (~99%). La emisión de fósforo y metales pesados al agua y al suelo son las principales sustancias contribuyentes responsables de estos resultados.

- ***Agotamiento de agua (CA)***

Esta categoría de impacto expresa la cantidad de agua utilizada en el sistema en estudio. Esta categoría es particularmente interesante en los sistemas basados en el sector agroalimentario, ya que el agua es un recurso escaso y su extracción podría causar un daño significativo a los ecosistemas. En este caso, los aportes de la materia prima(porcino para sacrificio) similar a las categorias anteriores suman el 99% de los requerimientos totales de agua a través del sistema en estudio. Otras contribuciones menos importantes individualmente son los servicios de agua de red y electricidad.

- ***Escaces de recursos fósiles (RF)***

Esta categoría de impacto evalúa el requerimiento de recursos no renovables que contienen hidrocarburos. Los resultados en esta categoría se expresan en términos de kg eq de petróleo (equivale a 42 MJ), y refleja el requerimiento de recursos fósiles en el sistema en estudio. La producción de cerdo para sacrificio vuelve a ser el principal consumidor de combustibles fósiles, con una participación del 97%, seguido por el suministro de energía eléctrica (1,4%), la gestión de residuos de matadero (0,9%) y el requerimiento de gas natural (0,6%) . En cuanto al consumo de combustibles fósiles en el sistema de producción de carne de cerdo, el petróleo crudo y el gas natural figuran como los más relevantes.

4.2.2. Discusión

4.2.2.1. Metodología

La metodología ACV sirvió como una buena herramienta para estimar los impactos ambientales de la producción porcina en un matadero tipo. En este contexto, el presente estudio se centró en los procesos de entrada y salida que involucran la actividad de un matadero. Para proporcionar una imagen más holística de la sostenibilidad de la cadena de suministro de carne de cerdo, serían necesarias ampliar los límites del sistema a más fases anteriores al matadero. Las fases del proceso de la cadena de suministro de carne de cerdo adicionales a incluir en las consideraciones futuras serían, producción de piensos para alimentación porcina y producción animal en la granja.

En relación a las categorías de impacto, ya que los problemas ambientales del sector agroalimentario están cubiertos principalmente por la eutrofización y la acidificación conforme a la revisión de la literatura, elegimos estas categorías de impacto para evaluar la producción porcina de un matadero tipo en Cataluña. Se agregó el potencial de calentamiento global ya que refleja la emisión de gases de efecto invernadero, siendo además el más popular y fácil de comunicar.

4.2.2.2. Base de datos del inventario

La relevancia de un estudio de LCA está altamente relacionada con la calidad del análisis del inventario (Basset-Mens et al., 2007). Por lo tanto, se requiere la disponibilidad de una gran cantidad de datos que representen el sistema (Reckmann et al, 2013). El inventario del matadero tipo en este estudio incluyó datos más detallados en comparación con otros estudios europeos de LCA de carne de cerdo (Basset-Mens et al., 2007; Nguyen et al., 2011, González-García et al., 2017). Esto se originó en datos bien elaborados y detallados del propio matadero. Pero los datos fueron proporcionados por un solo procesador. De modo que, es posible que no sean representativos de las condiciones catalanas promedio. Valdría la pena obtener una base de datos más amplia para el proceso de matanza en Cataluña. Sin embargo, se tuvo la opinión de que los procedimientos de procesamiento de varias empresas de matanza en toda Cataluña no difieren significativamente. Dado que la evaluación representa la producción de carne de cerdo en un matadero tipo de la región, los datos recopilados al ser de una de las empresas de matanza más grandes de Cataluña (ubicada en el centro neurálgico de producción porcina de la región) deberían reflejar las condiciones de manera suficientemente adecuada.

4.2.2.3. Comparación con otros estudios publicados

En este apartado, los resultados ambientales obtenidos en este estudio se comparan con otros estudios publicados relacionados con la producción de carne de cerdo en diferentes países europeos en términos de cambio climático (o potencial de calentamiento global), acidificación y eutrofización para facilitar su comparación.

De acuerdo con los resultados informados anteriormente, la producción de animales (cerdos para sacrificio) es el proceso responsable de las mayores contribuciones a todas las categorías de impacto consideradas para la evaluación (valores que van del 89% al 99% según la categoría). Esto debido principalmente a los requerimientos de alimentación (piensos) y las implicancias de la crianza porcina en las granjas así como las emisiones derivadas de la gestión de los purines (Rougoor et al. 2015; Six et al., 2017;). Esto se anticipó de alguna manera, ya que de acuerdo a la literatura los principales impactos derivados de la producción de carne independientemente del tipo de carne (pollo, cerdo o res) están relacionados con las actividades agropecuarias (Gonzalez-García et al., 2015; Reckmann et al., 2012).

Así, dado que la producción de cerdo para sacrificio está fuera del control de los gestores del matadero, se ha prestado especial atención para la discusión a otros procesos que podrían afectar directamente a las actividades productivas dentro del matadero tipo. Como el suministro de electricidad y los requerimientos de agentes de limpieza que se identificaron como los de mayor porcentaje de contribución, lo que está en línea con los resultados presentados Gonzalez-García et al. (2015) y Noya et al. (2017).

Dejando de lado la producción de cerdo para sacrificio, y centrándonos en la influencia directa de los procesos del matadero encontramos que los resultados presentados en este estudio tal como se muestra en la Tabla 9 coincide en términos de cambio climático (0,9 kg CO2-eq) con los resultados reportados por Noya et al. (2017), quienes evaluarón el perfil ambiental relacionado con la cadena de producción porcina en la región de Cataluña a través de un enfoque LCA y incluyeron la contribución relativa del matadero a los impactos ambientales totales. Asimismo nuestros resultados se encuentran por debajo de la contribución del matadero en el ACV del sistema de producción de carne porcina informado por otros estudios que trabajaron con datos de producción en Alemania y Noruega respectivamente (Reckmann et al., 2013, Dorca-Preda et al., 2021).

Tabla 9. *Comparación de resultados de la evaluación de impacto asociados a matadero en la producción de carne de porcino en diferentes paises europeos.*

Referencia	**Cambio Climático (CC)** *kg CO2 eq*	**Eutrofización**		**Acidificación (AT)** *g SO2 eq*	***Pais***
		EA[a] *g P eq*	**EM**[a] *g N eq*		
Este estudio	0.096	0.067	0.026	0.223	España
Noya et at. (2017)	0.09	0.012	0.13	0.55	España
Reckmann et al. (2013)	0.21	1.9 PO_4^{3-} *eq*		0.3	Alemania
Dorca-Preda et al. (2021)	0.2 - 0.6	0.0 - 0.3 PO_4^{3-} *eq*		0.3 - 1.1	Noruega

[a]*Siglas de las categorías de impacto: EA = eutrofización de agua dulce; EM = eutrofización marina.*

En cuanto a la eutrofización de agua dulce (expresado en g P eq), los resultados correspondientes a nuestro estudio reporta valores altos, mientras que en eutrofización marina es más baja a lo reportado por Noya et al. (2017), lo cual tiene mucho sentido, ya que este estudio considera el vertido del agua tratada en la depuradora al río.

En el tema de acidificación terrestre, nuestro estudio reporta valores bajos en comparación a los resultados obtenidos por Reckmann et al. (2013), Noya et al. (2017) y Dorca-Preda et al. (2021), esto indica que los resultados correspondientes a nuestro estudio presentan ligeras diferencias con estos estudios.

Hay varias razones para las diferencias en los resultados. Según Reckman et al. (2013), el uso de diferentes métodos de caracterización puede afectar los resultados. En el caso del calentamiento global o cambio climático, si se utiliza el mismo horizonte temporal, no se reportan diferencias en los resultados. Sin embargo, otras categorías de impacto relacionadas con impactos ambientales a escala regional como la eutrofización y la acidificación pueden reportar diferencias en los resultados. El método ReCiPe (Goedkoop et al., 2016) considera dos tipos diferentes de eutrofización (de agua dulce y marina). Contrariamente a esto, el método CML (Guine et al., 2002) considera solo un impacto global de eutrofización. Esto significa que el uso de diferentes bases de datos introduce errores en las comparaciones y el método de cálculo, que también depende del país, es un factor significativo en estas diferencias.

Otro aspecto importante a considerar cuando se comparan los resultados ambientales entre diferentes sistemas de producción de carne de cerdo, a parte de la unidad funcional, es la definición de los límites del sistema. Existen algunos estudios en los que se han calculado los perfiles ambientales desde una perspectiva de la puerta de la cuna al matadero y los subproductos animales no siempre se consideran dentro de los límites del sistema (Nguyen et al., 2011; Reckmann et al., 2013; González-García et al., 2017, Noya et al., 2017).

De modo que, la inclusión o no de la gestión de residuos dentro de los límites del sistema, el diferente manejo del proceso de matanza, las diferencias en el régimen de producción porcina (orgánica, intensiva, etc.) y las distancias de transporte, así como los enfoques de asignación de los coproductos (asignación económica o expansión del sistema) también influyen en los resultados ambientales (Basset-Mens y van der Werf, 2005; González-García et al., 2017).

Finalmente, cabe señalar que el sistema productivo evaluado en el presente estudio responde al enfoque tradicional de economía lineal, en el que se pierde la conexión entre materias primas y desechos. Siendo oportuno, avanzar hacia sistemas productivos más sostenibles, donde los residuos se convierten en recursos para ser valorizados a través del reciclaje y la reutilización como sugiere el concepto de CE (Jurgilevich et al., 2016; Ellen MacArthur Fundación, 2013). En este sentido, resulta oportuno estimar en qué medida ciertas propuestas alternativas basadas en la implementación de la perspectiva de EC podrían beneficiar el perfil ambiental del sistema en relación con la situación actual. Así, se ha considerado la valorización de los principales subproductos del matadero, los mismos que se detallan en el siguiente apartado.

4.3. Propuesta de estrategias para el cierre de ciclo

4.3.1. Estudio de posibles valorizaciones de residuos

En este apartado, se resumen las propuestas alternativas de valorización de subproductos obtenidas a partir del análisis de la literatura.

El desafío práctico es minimizar los impactos adversos de los residuos derivados del sacrificio y producción de carne y, si es posible, transformarlos en productos valiosos. Por lo tanto, la investigación se centra en la creación de productos de valor añadido, así como nuevas aplicaciones industriales.

En la Tabla 10 y 11 se ha realizado un resumen de todas las aplicaciones más comunes de los subproductos en una variedad de campos, como alimentos, piensos, alimentos para mascotas, fertilizantes, medicina y/o biotecnología, productos farmacéuticos, productos químicos y generación de energía.

Tabla 10. *Resumen de las aplicaciones más comunes de los residuos derivados de la producción de carne de cerdo*

RESIDUO	PRODUCTO OBTENIDO	DESTINO	REFERENCIA
Sangre	Sueros y plasmas	Biotecnología	Mora et al. 2018
	Hierro		Alao et al. 2017
	Hemoglobina como péptido bioactivo		Martínez-Alvarez et al. 2015
	Plasmas específicos aislados para farmacia	Farmacia	Nollet y Toldrá 2011
	Aditivos, proteinas y sumplentos alimentarios	Industria alimentaria	Ofori y Hsieh 2011
	Proteína animal	alimentación animal	Toldrá et al., 2021
Huesos, tendones y cartílago	Colágeno	Biotecnología	Jridi et al. 2017
	Péptidos bioactivos	Biotecnología	López-Pedrouso et al., 2023
Huesos	fosfato	Industria química (fertilizante)	Cascarosa et al. 2012
Pelo de cerdo	Aminoácidos	Biotecnología	Aristoy y Toldrá 2011
	Queratina	Biotecnología	Li, He y Wang 2019
	Paneles aislantes	Industria de la Construcción	MESVAL, 2006
pezuñas de cerdo	Queratina	Biotecnología	Li, He y Wang 2019
Cartílago	sulfato de condroitina	Biotecnología	Toldrá, Mora y Reig 2022
Grasa	Ácidos grasos	Industria química	Mora et al. 2018
	Biodiesel	Industria química	Adewale et al. 2016

Tabla 11. *Resumen de las aplicaciones más comunes de los residuos derivados de la producción de carne de cerdo (Continuación)*

RESIDUO	PRODUCTO OBTENIDO	DESTINO	REFERENCIA
Tripas	Alimentos y proteínas para animales domesticos y de granja	alimentación animal	Nollet y Toldrá 2011
Tráquea	Sulfato de condroitina	Biotecnología	Toldrá et al., 2021
Páncreas	Insulina	Industria farmacéutica	Mora et al. 2018
mucosa intestinal	Insulina	Industria biomédica	Mora et al. 2018
	Heparina	Industria farmacéutica	Toldrá et al., 2021
Glandula pituitaria	Insulina	Industria biomédica	Toldrá et al., 2022
Bazo	Proteína animal	alimentación animal	Mora et al. 2018
Pulmones, Glándulas, próstata y tela intestinal	Abonos	Plan de compostaje	Alao et al. 2017
	Biogas	Planta de biogás	Valta et al. 2015
Restos de carne	fosfato	Industria química (fertilizante)	Cascarosa et al. 2012
Purines y lodos de depuradora	Abonos	Plan de compostaje	Valta et al. 2015
	Biogás	Planta de biogás	Valta et al. 2015

- ***Sangre***

La sangre contiene una gran cantidad de proteínas con un elevado nivel de digestibilidad, lo que hace que la sangre sea un subproducto muy aprovechable para distintos usos. No obstante, muchos mataderos no seleccionan la sangre y la vierten junto con el agua residual para su posterior tratamiento en las depuradoras. Si en esta etapa se realizara una recogida selectiva de la sangre se podría utilizar, sin tratamiento previo, para la producción de platos tradicionales hechos a base de sangre y, con tratamiento previo, se puede utilizar en la industria de la alimentación animal, asi como en la industria farmacéutica y alimenticia. Mediante diferentes pretratamientos (anticoagulación, centrifugación y posterior congelación), la sangre puede separarse en sus constituyentes esenciales, la fracción celular (células rojas, células blancas y plaquetas) y el plasma (Bah et al. 2016).

Las proteínas de la sangre, especialmente aquellas que se encuentran en el plasma, contienen propiedades tecnológicas relevantes como la gelificación; como agentes espumantes y emulsificantes que las hacen útiles en la industria alimentaria y de suplementos alimenticios. Algunas de las proteínas del plasma han demostrado una buena capacidad de reticulación de proteínas principales y de actividad inhibidora de proteasas. También se utilizan para enriquecer productos como la pasta o como aglutinante para la producción de procesados cárnicos (Mora et al. 2018; Ofori y Hsieh, 2011; Aspevik et al. 2017; Li, He y Wang 2019).

Por otra lado, la fracción celular restante del aprovechamiento del plasma, puede usarse en la industria cárnica como potenciador del color en salchichas. Una alternativa para evitar efectos sensoriales no deseados es la eliminación de la hemoglobina para producir globina, que también

se conoce como sangre decolorada, que tiene funciones tecnológicamente relevantes en lo que respecta a la sustitución de la grasa en los productos cárnicos (Nollet y Toldrá 2011).

Por último, la sangre tiene un contenido elevado de hierro, que puede ser utilizado en diferentes productos dirigidos a combatir la deficiencia de hierro, más comúnmente conocida como anemia (Alao et al. 2017).

- ***Huesos, tendones y cartílagos***

El colágeno, aparte de la piel, también se puede sacar de los huesos, tendones y cartílagos. Del colágeno se obtiene la gelatina mediante hidrólisis y se utiliza mucho en la industria alimentaria por la capacidad de formación de geles, útiles para la producción de postres, caramelos, productos de panadería, helados. Igualmente sirve como agente clarificante, estabilizador o como material de recubrimiento protector. Tanto la gelatina como el colágeno se utilizan también como ingredientes tensioactivos, pinturas, barnices, adhesivos, anticongelantes, limpiadores, pulidores y productos farmacéuticos. Cabe señalar que el colágeno contribuye en la conservación de características nutricionales y otros atributos de calidad de los productos cárnicos (Pearl, 2014; Etxabide et al. 2017; Gorlov et al. 2018).

Por otro lado, los cartílagos, huesos y tendones pueden ser usados para la obtención de péptidos bioactivos. Los péptidos, aparte de por generación endógena, pueden obtenerse industrialmente a partir de subproductos de proteína de la carne (órganos, colágeno y hemoglobina) por hidrólisis con proteasas comerciales específicas. La reacción enzimática puede tener lugar en un reactor alimentado por lotes o de manera continua utilizando un reactor de membrana de ultrafiltración. El producto obtenido se somete a fraccionamiento y purificación parcial mediante técnicas de filtrado o cromatografía. Cientos de péptidos son liberados, pero sólo aquellos conocidos como péptidos bioactivos son de interés, ya que son capaces de producir beneficios para la salud del consumidor a través de diferentes tipos de bioactividad como por ejemplo la actividad antihipertensiva, la actividad antioxidante o la actividad opioide, entre otros (López-Pedrouso et al., 2023; Lafarga y Hayes 2014; Gomez-Guillen et al. 2011; Ryder et al. 2016).

- ***Huesos***

Grandes cantidades de hueso se producen cada año mundialmente y en muchos casos se utilizan para procesamiento termoquímico que incluye pirólisis, combustión y gasificación. Las cenizas resultantes están compuestas básicamente de calcio y fosfato. Consecuentemente, este material puede convertirse en una fuente de fosfato de bajo coste, que a diferencia de los minerales naturales de fosfato, se libre de metales pesados, y por tanto constituye una alternativa efectiva para la producción de abonos (Coutand et al. 2008; Cascarosa et al. 2012).

- ***Pelo y pezuñas***

Por último, la queratina es una proteína filamentosa que se encuentra en el pelo, uñas y en las capas más externas de la epidermis de los vertebrados. La queratina puede extraerse y tiene diferentes características útiles como la biocompatibilidad, la proliferación de células, la biodegradabilidad, propiedades antibacterianas, estabilidad medioambiental, fuerza mecánica y bajo coste. Con estas características la queratina tiene distintas aplicaciones en biomedicina, como por ejemplo, materiales regenerativos, ingeniería de tejido, producción de hilos a base de queratina, etc. (Toldra et al, 2018; Aspevik et al. 2017; Li, He y Wang 2019; Selmane, Christophe y Gholamreza 2008).

- ***Tráquea***

El sulfato de condroitina, utilizado en bioingeniería médica para la regeneración de tejidos para la investigación, es un compuesto químico presente en las partes animales de naturaleza cartilaginosa como la tráquea y la cabeza (Toldrá et al., 2021)

- ***Páncreas y mucosa intestinal***

A partir del páncreas, y de la mucosa intestinal del cerdo, puede sintetizarse insulina humana. No es un proceso innovador, pero muchas veces el páncreas y la mucosa intestinal tienen un final con menor valor que su potencial intrínseco (Toldrá et al., 2022).

- ***Grasa***

Los ácidos grasos que se extraen de la grasa pueden utilizarse en una gran cantidad de procesos químicos como la producción de goma, la polimerización de plástico, suavizantes, lubricantes y plastificantes (Mora et al. 2018). También para la producción de Biodiesel. En los últimos años, los subproductos vegetales y grasas animales de bajo coste se han empezado a utilizar como materia prima para la producción de biodiesel, sustituyendo al diésel convencional por ésteres de metilo de ácidos grasos. El biodiesel puede ser una alternativa válida al diésel convencional sin comportar una modificación significativa de los mecanismos de los vehículos. Además tiene varias ventajas más como biodegradable, no es tóxico y tiene un perfil de emisión de combustión favorable que conduce a reducciones de dióxido de carbono, monóxido de carbono, partículas e hidrocarburos no quemados. La forma más habitual de producir biodiesel es mediante la transesterificación de las grasas con alcohol de bajo peso molecular para obtener una mezcla de ésteres de metilo ácido grasos y glicerol como producto secundario (Valta et al. 2015; Toldrá, Mora y Reig 2016; Baladincz y Hancsók 2015; Banković-Ilić et al. 2014).

- ***Tripas, bazo y restos de carne***

Una buena forma de reducir los efectos del impacto ambiental adverso generado por la acumulación de subproductos es la incorporación de los subproductos en otros procesos productivos. Los subproductos animales se utilizan tradicionalmente como materia prima para la producción de piensos e ingredientes para alimentos para mascotas porque contienen nutrientes importantes, incluidos aminoácidos esenciales, ácidos grasos, minerales y oligoelementos, vitaminas B y otras vitaminas liposolubles. Los subproductos mas usados son los restos de carne, tripas y bazo; también se utilizan para alimentación animal la harina de sangre y soluciones proteicas extraídas de ésta (Honikel 2011; Nollet y Toldrá 2011), (Mora et al., 2018) (Martínez-Alvarez et al. 2015)(Vandermeersch et al., 2014) (Toldrá et al. 2012; Pérez-Gálvez et al. 2011).

- ***Pulmones, glándulas, purines y lodos***

La producción de biogás a partir de derivados de matadero como pulmones, glándulas, próstata, purines y lodos de depuradora, mediante el proceso de digestión anaerobia es un área importante de investigación cuando se trata de la valorización de derivados de matadero, y es de mayor uso según la literatura analizada (Valta et al. 2015) (van Zyl & van Eeden, 2022).

4.3.2. Propuestas de nuevas posibilidades de valorización

Las propuestas de nuevas sinergias y de posibles procesos de valorización se pueden ver en la Tabla 12, 13 y en la Figura 14. En ella se resumen todas las valorizaciones posibles para los distintos residuos y las industrias de transformación que intervienen. En la tabla descrita se recopila toda la información que se ha ido obteniendo a lo largo de la realización de este estudio en lo que respecta a las valorizaciones de matadero de cerdos tipo.

***Tabla 12**. Principales flujos residuales, su manejo actual y propuesta de nuevos procesos de valorización de matadero de cerdos tipo*

RESIDUO	CAT. (*)	MANEJO ACTUAL	PROPUESTA DE PROCESO DE VALORIZACIÓN	INDUSTRIA DE TRANSFORMACIÓN
Cerdos muertos (Cadáveres)	2	Generación de biogás y compostaje	Obtención de colágeno (piel, tendones y cartilago)	Biotecnología
			Obtención de queratina (uñas)	Biotecnología
			Obtención de fosfato (carne y huesos)	Industria química
			Produccion de biodiesel (grasa)	Industria química
			Biodigestión (resto)	Planta de biogás
Purines	2	Generación de biogás y compostaje	Producción de abonos	Plan de compostaje
			Biodigestión	Planta de biogás
Lodos de depuradora	2	Generación de biogás y compostaje	Producción de abonos	Plan de compostaje
			Biodigestión	Planta de biogás
Tumores	2	Generación de biogás y compostaje	Producción de abonos	Plan de compostaje
			Biodigestión	Planta de biogás
Decomisos	2 o 3	Generación de biogás y compostaje	Producción de abonos	Plan de compostaje
			Biodigestión	Planta de biogás
Huesos	3	Fabricación de alimentos y proteínas para animales domesticos y de granja	Obtención de colágeno	Biotecnología
			Obtención de fosfato	Industria química (fertilizante)
Grasa de matadero	3	Fabricación de alimentos y proteínas para animales domesticos y de granja	Obtención de ácidos grasos	Biotecnología
			Producción de abonos	Plan de compostaje
			Biodigestión	Planta de biogás
Pelo de cerdo	3	Fabricación de alimentos y proteínas para animales domesticos y de granja	Elaboración de aminoácidos	Biotecnología
			Obtención de queratina	Biotecnología
			Paneles aislantes	Industria de la Construcción
			Producción de abonos	Plan de compostaje
pezuñas de cerdo	3	Elaboración de proteína animal	Obtención de queratina	Biotecnología

(*) Categoría establecida en la Normativa que regula los subproductos de mataderos (EC, 2009)

Tabla 13. *Principales flujos residuales, su manejo actual y propuesta de nuevos procesos de valorización de matadero de cerdos tipo (continuación)*

RESIDUO	CAT. (*)	MANEJO ACTUAL	PROPUESTA DE PROCESO DE VALORIZACIÓN	INDUSTRIA DE TRANSFORMACIÓN
Sangre	3	Elaboración de proteína animal	Obtención de sueros y plasmas	Biotecnología
			Obtención de hierro	
			Obtencion de hemoglobina como péptido bioactivo	
			Obtención de Plasmas específicos aislados para farmacia	Industria biomédica
			Elaboración de Aditivos, proteinas y conservas	Alimentación
Tripas	3	Fabricación de alimentos y proteínas para animales domesticos y de granja	Producción de abonos	Plan de compostaje
			Biodigestión	Planta de biogás
Tráquea	3	Generación de biogás y compostaje	Obtención de sulfato de condroitina	Biotecnología
			Producción de abonos	Plan de compostaje
			Biodigestión	Planta de biogás
Pancreas	3	Manejo según categoria 3	Obtención de insulina	Industria biomédica
mucosa intestinal	3	Manejo según categoria 3	Obtención de insulina	Industria biomédica
			Extracción de Heparina	Industria biomédica
Glandula pituitaria	3	Manejo según categoria 3	Obtención de insulina	Industria biomédica
bazo	3	Elaboración de proteina animal	Elaboración de proteina animal	alimentación animal
Pulmones	3	Generación de biogás y compostaje	Producción de abonos	Plan de compostaje
			Biodigestión	Planta de biogás
Glándulas, próstata y tela intestinal	3	Generación de biogás y compostaje	Producción de abonos	Plan de compostaje
			Biodigestión	Planta de biogás
Restos de carne	3	Elaboración de proteína animal	Obtención de fosfato	Industria química (fertilizante)

En primer lugar, los cerdos muertos (cadáveres) generados en las etapas iniciales del proceso del matadero tipo, es donde hay más opciones de valorización diferente, si tenemos en cuenta que no es necesario que los cadáveres se valoricen enteros, sino que se pueden separar las partes según se necesite por cada industria de transformación. En caso de que se opte por valorizar las diferentes partes de los cadáveres por separado, se puede obtener colágeno de la piel, tendones y cartílagos, de los huesos se puede obtener junto con la carne, fosfato por parte de la industria química. La grasa se puede utilizar como insumo para la producción de biodiesel y de los uñas se puede extraer queratina para uso químico. Finalmente del resto se puede obtener siempre biogás o abonos, y en caso de que se elija la opción de valorizar el cadáver entero, estas dos últimas son las opciones disponibles. Como puede observarse, todas las opciones propuestas consisten en la

producción de subproductos que no son destinados para uso humano y animal, ni alimentario, médico y cosmético. Este hecho se debe a que los cadáveres pertenecen a la Categoría 2 y por tanto no está permitido ningún uso que pueda poner en peligro la salud humana y animal.

Por otro lado, los lodos de depuradora, decomisos y purines generados en el matadero de cerdos tipo, se pueden aprovechar mediante la producción de abonos y la biodigestión en plantas de biogás.

En cambio, los huesos, aparte del manejo actual, puede usarse como insumo para la obtención de fosfato por la industria química para la producción de fertilizantes químicos, así como, colágeno junto al resto de carne por la industria biotecnológica.

En relación a la grasa de matadero, este se puede utilizar para la obtención de ácidos grasos que se aprovechan en la industria química en la producción de distintos materiales; también la grasa puede destinarse para la producción de abonos de alta calidad y la biodigestión. El pelo, aparte del uso más común que se le da en la producción de abonos de alta calidad, también puede emplearse para obtener paneles aislantes en la industria de la construcción por su función acústica y térmica. Otra salida, es la obtención de aminoácidos y queratina, al igual que las uñas, útil en la industria de la biotecnología y biomédica para múltiples usos como la producción de material regenerativo.

En el caso de la sangre obtenida en el proceso, según el tratamiento que se realice, puede utilizarse para diferentes finalidades. En el caso de la sangre recogida de forma adecuada directamente del animal, puede utilizarse para producir procesados de la sangre (proteínas, aditivos y conservas) del sector alimentario que en muchos lugares se utilizan a diario en la cocina tradicional. Igualmente, la sangre puede ir a parar a centros de Biotecnología como insumo para la obtención de hierro, sueros y plasma para el tratamiento de afecciones relacionadas con deficiencias de este compuesto. Una fracción de sangre puede usarse para la obtención de plasmas específicos aislados para la farmacia. De forma similar, las fracciones proteica y celular de la sangre pueden ser utilizadas en la industria alimentaria como sustitución de la grasa en productos cárnicos o como potenciadores de olor; además, puede continuar utilizándose en la industria PetFood como aditivos para animales domésticos y de granja, realizando funciones diferentes. Por último, se pueden extraer los péptidos bioactivos, como la hemoglobina, para utilizarse en aplicaciones biomédicas relacionadas con el cuidado de ciertas afecciones de la salud pública.

Por último, de los residuos obtenidos en la etapa de eviscerado (tripas, tráquea, pulmones, tumores, glándulas, próstata y tela intestinal), la mayoría de aplicaciones están relacionadas con la producción de abonos y la biodigestión. Sin embargo, podemos destacar algunos que tienen usos diferenciados y de gran valor agregado, aparte de los que acabamos de nombrar, como la tráquea, el páncreas, la mucosa intestinal y bazo. De la tráquea se puede obtener un compuesto llamado sulfato de condroitina, útil para la regeneración de tejidos en ingeniería biotecnológica y biomédica. El páncreas, la mucosa intestinal y la glándula pituitaria se emplean, de forma habitual, para la obtención de insulina, y aunque no es una valorización innovadora, hay que resaltar por el buen aprovechamiento que se hace del residuo; asimismo, a partir de la mucosa intestinal es posible extraer heparina. El bazo puede servir como proteína especial, que se aprovecha en la industria petfood en la producción de alimentación animal.

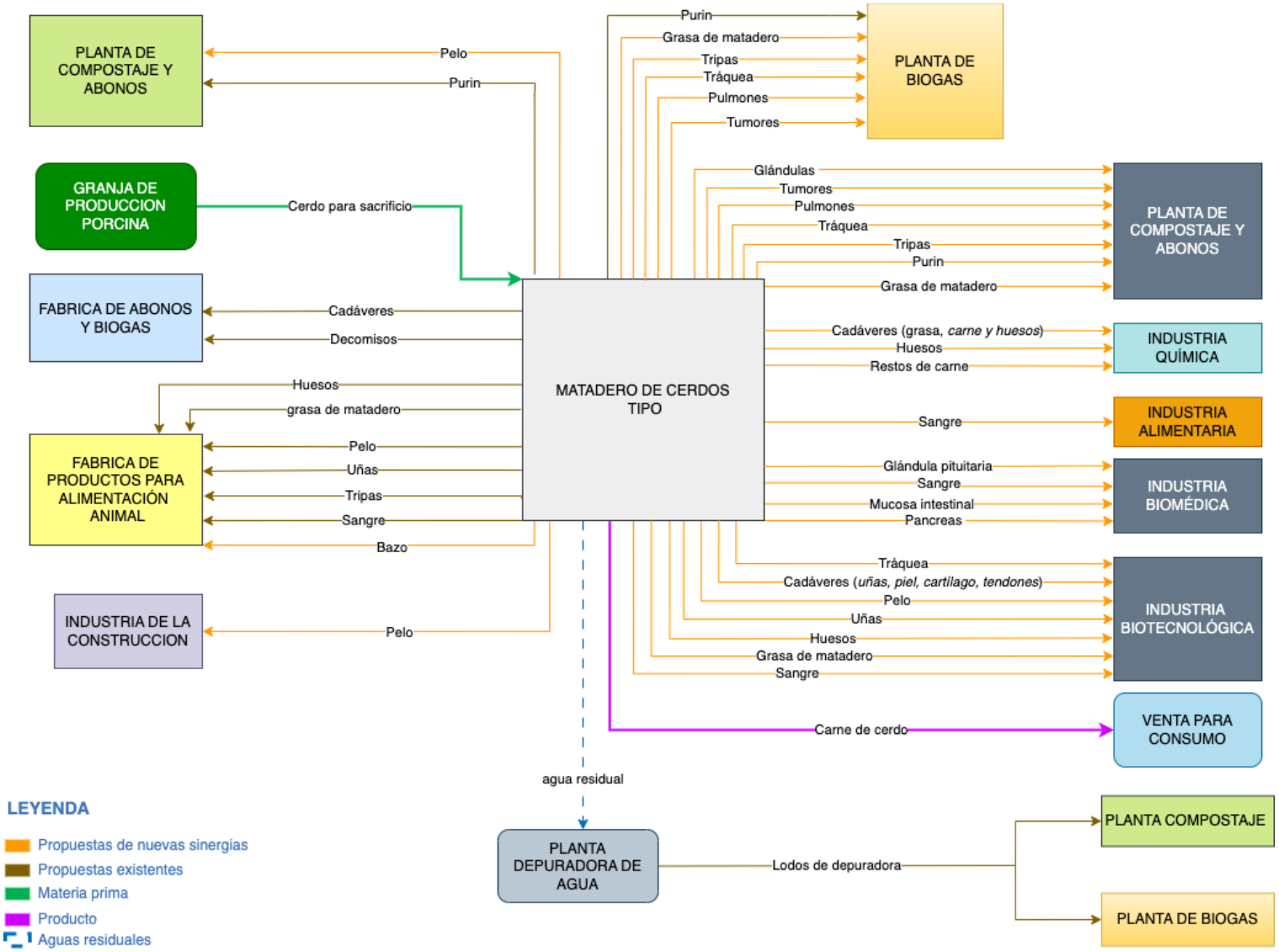


Figura 14. Sinergias propuestas para el proceso de valorizacion de residuos de matadero de cerdos tipo

En la Figura 14 se plasma la propuesta de cierre de ciclo de residuos de un matadero de cerdos tipo. Aunque, como hemos visto en la Tabla 12 y 13, las opciones para algunos de los residuos son muchos más que para otros; Por tanto, se ha visto necesario realizar y discutir una propuesta de cierre concreta teniendo en cuenta distintos razonamientos por los que es una opción viable. No se han realizado cambios, respecto al diagrama de subproductos del matadero visitado, en todas las valorizaciones propuestas. En algunos casos no existe alternativa y en otros casos la opción que ya se está llevando a cabo se ha creído la más óptima y la de mayor valor agregado.

En cuanto a las valorizaciones de los residuos tales como purín (incluido el contenido intestinal) y lodos de depuradora se han mantenido las valorizaciones que actualmente ya se llevan a cabo que es la producción de biogás, dado que, actualmente al ser subproductos de Categoría 2 no existen otras valorizaciones alternativas permitidas. La única aproximación posible es la referida a los cerdos muertos (cadáveres) antes del sacrificio, las cuales podrían no valorizarse enteros, sino que, se separaron en diferentes subproductos (huesos, cartílagos, grasa, carne, piel, etc.), es decir una valorización por separado siguiendo procesos más especializados y aptos para material de Categoría 2 como la producción de fosfatos de los huesos y utilizar la grasa en la industria de la biotecnología para la producción de algunos materiales derivados. Esta última propuesta es poco viable ya que el coste económico de tener que realizar este “despiece” sería elevado debido a tener que tener un espacio y personal dedicado a ello, salvo que se cuente con una empresa tercera que se encargue de dicha gestión.

Con respecto a los huesos, se propone su uso en la industria química para la producción de fosfato de bajo coste y libre de metales pesados como alternativa a la producción de fertilizante químico. Se propone esta valorización como alternativa a la producción de PetFood, que a pesar de ser una buena opción, ya existen otros subproductos que pueden utilizarse.

De forma similar, para la valorización del pelo y las uñas, se propone la obtención de queratina ya que no hay muchas fuentes naturales de las que se pueda extraer la queratina, otorgándole un valor añadido a estos residuos. Otra salida para el pelo, es la obtención de aminoácidos y la producción de paneles aislantes en la industria de la construcción a través de un proceso de trituración, compactación y aglutinación.

En el caso de la sangre la producción de procesados de la sangre y/o su uso como insumo en la biotecnología y farmacia son las valorizaciones más comunes y las que se proponen en este caso por el cierre de ciclo. Sin embargo, algunos mataderos no tienen sistemas de recogida de sangre adecuados y por tanto acaba con el agua residual en la depuradora. Por esto, un sistema de recogida de sangre adecuado para su valorización es sumamente importante.

Ahora bien, en el eviscerado se obtienen muchos subproductos distintos. En cuanto a las glándulas, las vísceras blancas no aptas para el consumo humano, los pulmones, la próstata y la tela intestinal no se han encontrado valorizaciones alternativas que pudieran añadir valor respecto a las opciones actuales que son la producción de abonos y la producción de biogás. Por otra parte, dos subproductos que ya se valorizan con alto valor son el páncreas, mucosa intestinal y glándula pituitaria que se emplean en la obtención de insulina. La producción de alimentos para animales de compañía es una buena opción para valorizar aquellos subproductos aptos para la alimentación animal y por tanto el bazo se destina a dicho fin, ya que es un elemento habitual y de alta demanda en este producto. La nueva propuesta que se plantea en esta etapa, pasa por la obtención de sulfato de condroitina a partir de la tráquea y la obtención de heparina a partir de la mucosa intestinal. Esta propuesta se hace, en primer lugar, debido a que la obtención de un compuesto químico utilizado en la industria biomédica es un aprovechamiento de alto valor agregado y por otra parte las alternativas para este subproducto son la producción de abonos y la

biodigestión, procesos en los que ya existen otros muchos subproductos, señalados anteriormente, que no tienen más alternativa.
En cuanto a la grasa y los restos de carne, la forma más interesante de valorizar es para la producción de PetFood . Aunque las grasas podría utilizarse para la extracción de ciertos compuestos como ácidos grasos por parte de la industria biotecnológica la misma que puede transformar en biodiesel, sin embargo, la salida más habitual que se encuentra es en la producción de PetFood, una opción suficientemente rentable a nivel económico y en la que la valorización es completa y por tanto se aprovecha toda la materia.

Por último, los decomisos y tumores son material de Categoría 2, aunque en algunos casos excepcionales si se ha decomisado por algún motivo que no existe peligro que afecte a la salud humana o animal, los decomisos pueden ser de Categoría 3. De modo que las opciones más seguras son la producción de abonos y la biodigestión.

4.3.3. Discusión

Cabe referir que, la Normativa que regula los subproductos de mataderos está bastante clara a la hora de indicar las rutas de eliminación y usos de los subproductos permitidas. Este hecho favorece la valorización puesto que da indicaciones de qué posibilidades tienen los subproductos de este tipo de industria cuando salen del proceso productivo del matadero. No obstante, la misma Normativa (EC, 2009) implicó un aumento de los costes de eliminación de subproductos y por tanto la necesidad de buscar aplicaciones en diferentes campos como piensos y alimentos para mascotas., energía, fertilizantes, químicos y farmacéuticos, tratando de darles valor agregado y compensar dichos costos.

Aparte de la normativa, existen una serie de factores importantes a considerar y que determinan la viabilidad de la valorización. En primer lugar, el factor económico, una industria donde el coste de valorización de subproducto le sea superior al de eliminarlo nunca elegirá la primera opción. Las valorizaciones no pueden generar pérdidas y este factor es primordial a la hora de proponer una valorización. El incentivo económico debe existir, ya que en la gestión de subproductos no existe ninguna normativa que obligue a valorizarlos. Para que económicamente sea viable una valorización debe haber mercado para suministrar los productos que salen de valorizar un subproducto. Si no existe suficiente demanda no tiene sentido realizar la valorización. Por otro lado, debe considerarse la existencia de la industria de transformación con infraestructuras y redes para la valorización de los subproductos. Si hay demanda e industria que lo lleve a cabo, es preciso saber si las cantidades de subproducto obtenidas son suficientes para cubrir la demanda y que el proceso de producción industrial sea viable tecnológicamente. Ahora bien, la elección de la tecnología dependerá de la composición del subproducto, su cantidad y la disponibilidad de los subproductos. Por último, debe existir la posibilidad de transporte de los subproductos desde el matadero hasta la industria de valorización de forma adecuada, permitiendo que el subproducto llegue en las condiciones óptimas para su transformación.

Dicho lo anterior, en la propuesta de valorizaciones de subproductos de matadero porcino para el cierre de ciclo se ha recogido un conjunto de posibles valorizaciones para los diferentes subproductos de las que han surgido algunas reflexiones. Durante el proceso de investigación se ha observado cómo las valorizaciones destinadas a producir alternativas a los combustibles fósiles toman gran fuerza. La producción de biogás y biodiesel son de las salidas más habituales y relevantes, en cantidad de subproductos destinados e industria disponible. Ya que la Unión Europea es el mayor productor de biodiésel del mundo con 202 plantas que produjeron 14 millones de toneladas de biodiésel solo en el 2019 (Bockey, 2019).

La industria cárnica, por definición, quiere evitar pérdidas económicas y maximizar los beneficios, de modo que aquellas valorizaciones que actualmente salen más rentables que otras, como la producción de PetFood y de abonos, ya se llevan a cabo de forma habitual y generalizada. Existen muchas empresas que producen ingredientes de alimentos y alimentos para mascotas a partir de coproductos derivados de la carne, se sabe que cerca de 1,67 millones de toneladas de proteína animal procesada se destinan a alimentos para mascotas, los cuales son ricos en todos los aminoácidos esenciales y tienen la ventaja de la ausencia de factores antinutricionales o proteínas alergénicas promoviendo el crecimiento y desarrollo animal (Toldrá et al., 2021).

Del conjunto de nuevas valorizaciones propuestas se pueden destacar algunas por tener características que las pueden hacer más interesantes, a distintos niveles, que el resto. En primer lugar, la propuesta de exportación internacional de algunos subproductos a otros lugares del mundo en los que se consideran productos de uso habitual. Esta propuesta es sumamente interesante desde el punto de vista que estos subproductos ya no llegan nunca a pasar a esta categoría, sino que se venden directamente como productos que no es necesario transformar y que el costo económico que se paga por ellos es más alto en el mercado de destino.

Por otro lado, la venta de los subproductos de matadero en la industria PetFood es interesante ya que valora los subproductos como ingredientes en la fórmula de los piensos y suplementos alimentarios que producen y por tanto no deben pasar un proceso de transformación grande y el precio también es más elevado que lo que se paga habitualmente para los subproductos por lo general. El hecho de que los subproductos no tengan que pasar por un proceso de gran transformación para ser utilizados en otros procesos productivos es importante desde el punto de vista de ahorro energético y de evitar pérdidas de materia. Además, se están investigando tecnologías más innovadoras para una mayor utilización de la sangre en la producción de ingredientes y alimentos para mascotas, lo que hace mayor el abanico de oportunidades de aprovechamiento.

Cabe destacar una propuesta relativamente innovadora y que podría ser una importante valorización si se llevara a cabo a escala industrial: la obtención de péptidos bioactivos varios y de algunos compuestos químicos, como el sulfato de condroitina y la heparina, pueden ser valorizaciones de alto valor añadido por los productos que se obtienen y este aspecto las hace muy interesantes. Sin embargo, el desconocimiento de la viabilidad del proceso a nivel económico y desarrollo productivo a nivel industrial, hace que sea una propuesta un tanto lejana a la hora de poder concluir si es una propuesta importante y ejecutable.

De igual modo, muchas de las valorizaciones que se proponen en este cierre de ciclo ya se llevan a cabo actualmente de forma habitual en mataderos de gran volumen del ámbito catalán. Estas propuestas que ya suelen hacerse, como los subproductos destinados a la industria PetFood, procesados de la sangre, biogás a partir de subproductos de C2, etc. no se han eliminado de la propuesta puesto que se han considerado la mejor vía de valorización para los subproductos en concreto. El hecho de que una propuesta esté totalmente implementada es importante desde el punto de vista que permite entender la viabilidad y la rentabilidad de estos procesos en el mercado. Para el resto de subproductos para los que no se ha mantenido la valorización que actualmente ya se lleva a cabo, se ha intentado escoger soluciones innovadoras de valorización que permitan aprovechar mejor a nivel de materia los residuos.

El principal inconveniente de la propuesta en general es que no se han encontrado valorizaciones alternativas para algunos subproductos que ahora se valorizan a través de procesos que ocasionan altas pérdidas de materia y energía, como pueden ser algunos subproductos que actualmente se están destinando a la producción de biogás y abonos. A diferencia de los procesos comerciales bien establecidos, las infraestructuras y redes para la valorización de subproductos aún no se han desarrollado. Por lo tanto, se necesitan innovaciones tecnológicas, para crear un alto valor

agregado con el menor impacto ambiental como transición a la bioeconomía de estos subproductos. También, es importante señalar que los mataderos a gran escala tienen más oportunidades de utilizar subproductos para biogás, procesamiento, alimentos para mascotas y medicinas. Por el contrario, los mataderos de pequeña escala tienen menos oportunidades de mejorar los subproductos.

La propuesta de cierre de ciclo para un matadero tipo que se presenta en este proyecto es viable dado que, en primer lugar, analiza las oportunidades para hacer que la producción de carne sea más sostenible. De igual modo, las propuestas planteadas son semejantes a las que se pueden encontrar en algunos mataderos establecidos.

El estudio efectuado en relación a las nuevas estrategias de valorizaciones ha sido a nivel de propuestas y no tanto a nivel de la viabilidad económica y científico-técnica de las mismas, a razón de que se encuentra fuera del alcance de este proyecto. Futuros trabajos deberían considerar el estudio de la viabilidad económica de las valorizaciones propuestas y de la localización de industrias de transformación, así como la investigación a nivel científico de nuevas valorizaciones que podrían ofrecer valor agregado en una variedad de aplicaciones y productos a través de tecnologías de bioprocesamiento hasta convertirlos en productos potencialmente comerciales.

5. Conclusiones

En este trabajo se determinó el impacto ambiental de la producción de carne de cerdo en un matadero tipo utilizando como herramienta el análisis de ciclo de vida.

Este estudio proporcionó un análisis detallado del impacto ambiental de la carne de cerdo en Cataluña basado en conjuntos de datos específicos de matadero, teniendo en cuenta una unidad funcional de 1 kg de carne de cerdo saliente.

La evaluación ambiental de la carne de cerdo producida en un matadero tipo de Cataluña, dio como resultado un impacto al cambio climático (CC) de 8,38 kg CO2-eq por kg de carne de cerdo. La Eutrofización de agua dulce (EA) y Eutrofización marina se estimaron en 1,79 g P-eq y 9,59 g N-eq por kg de carne de cerdo respectivamente, mientras que la Acidificación terrestre (AT) dio un valor de 87,4 g SO2-eq por kg de carne de cerdo.

Los resultados dieron a conocer que el proceso relacionado con la producción y suministros de materia prima (cerdo para sacrificio) es la que arrojó la mayor contribución a la carga ambiental en casi todas las categorías de impacto evaluadas (con valores que van del 89% al 99% según la categoría), siendo lo mas destacable su aporte en terminos de Cambio climático, Eutrofización (EA, EM) y Acidificación. Esto se asoció principalmente a los requerimientos de alimentación (piensos) y las implicancias de la crianza porcina en las granjas. Este resultado se anticipó de alguna manera, ya que de acuerdo a la literatura los principales impactos derivados de la producción de carne independientemente del tipo de carne están relacionados con las actividades agropecuarias.

Además se encontró, que el suministro eléctrico tuvo la segunda mayor influencia en las categorías de impacto evaluadas con un aporte superior al 11% en la categoría de radiación ionizante (RI), así como una contribución importante en otras categorías de impacto como CC (0,5%). Seguido de las emisiones derivadas del requerimiento de agentes de limpieza, el cual dio una contribución destacable en eutrofización de agua dulce (EA) y en menor medida en relación a eutrofización marina (EM). Estos resultados coincidieron con estudios LCA europeos similares relacionados con la producción de carne de cerdo.

Cuando se fragmentaron aún más los impactos de la actividad de matadero de cerdos tipo para identificar la influencia de los demás procesos, se encontró que la producción de gas natural requerido como combustible y calor en el proceso productivo (escaldado y flameado) del matadero tipo es un punto significativo en términos de agotamiento de recursos fósiles (RF) y en menor medida en cambio climático (CC). Mientras que las aguas residuales producidas en el matadero arrojaron bajas contribuciones a los impactos totales evaluados, aunque fue visible su impacto en relación a eutrofización marina (EM).

Por su parte, los residuos de matadero mostraron contribuciones de impacto menos significativos al perfil ambiental total, siendo el 0.3% en términos de Cambio climático (CC) total e insignificante en las demás categorías analizadas, donde los huesos y grasa, sangre y purín fueron los residuos de mayor contribución al resultado.

En respuesta a estos resultados, también se incluyeron en el marco de este estudio posibles estrategias de mejora en términos de valorización de los subproductos. Si bien los mataderos valorizan o venden la mayor parte de las partes/residuos del cerdo, identificamos que existen soluciones innovadoras de valorización que ofrecen un alto valor agregado al material con el menor impacto ambiental, como algunas de las propuestas en este proyecto en áreas tan variadas como la alimentación, piensos, alimentos para mascotas, farmacéutica, biotecnología, biomédica, química y energética.

Se propusieron 30 valorizaciones totales para 21 partes y residuos del cerdo, eligiendo valorizaciones de alto valor añadido que contribuyan a la economía circular en el sector cárnico, propuestas como: extracción de queratina, de insulina, de heparina, de sulfato de condroitina, de fosfatos, de hierro, de péptidos bioactivos, de proteínas de plasma, de fracción celular, de ácidos grasos, producción de paneles aislantes y elaboración de aditivos alimentarios y alimentación animal.

El presente estudio se centró en los procesos de entrada y salida que involucran la actividad de un matadero tipo. Para proporcionar una imagen más holística de la sostenibilidad de la cadena de suministro de carne de cerdo, serían necesarias ampliar los límites del sistema a más fases anteriores al matadero, tales como la producción de alimentación porcina y producción animal en granja.

Futuros trabajos deberían centrarse en el análisis de escenarios que compare las opciones de valorización de los subproductos de matadero utilizando los datos descritos en este documento, a fin de conocer la carga ambiental que supone su aprovechamiento. De igual modo, se debe encontrar nuevas alternativas a las valorizaciones actuales y que no han evolucionado en el tiempo a pesar del avance tecnológico.

6. Bibliografía

Alao, B. O., Falowo, A. B., Chulayo, A., & Muchenje, V. (2017). The Potential of Animal By-Products in Food Systems: Production, Prospects and Challenges. *Sustainability 2017, Vol. 9, Page 1089*, *9*(7), 1089. https://doi.org/10.3390/SU9071089

Andretta, I., Hickmann, F. M. W., Remus, A., Franceschi, C. H., Mariani, A. B., Orso, C., Kipper, M., Létourneau-Montminy, M. P., & Pomar, C. (2021). Environmental Impacts of Pig and Poultry Production: Insights From a Systematic Review. In *Frontiers in Veterinary Science* (Vol. 8, p. 1232). Frontiers Media S.A. https://doi.org/10.3389/fvets.2021.750733

Andretta, I., Remus, A., Garcia-Launay, F., Hauschild, L., & Kipper, M. (2022). Editorial: Strategies for Mitigating the Environmental Impacts of Pig and Poultry Production. In *Frontiers in Veterinary Science* (Vol. 9, p. 427). Frontiers Media S.A. https://doi.org/10.3389/fvets.2022.892340

Arrieta, E. M., & González, A. D. (2019). Energy and carbon footprints of chicken and pork from intensive production systems in Argentina. *Science of The Total Environment*, *673*, 20–28. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.04.002

Aspevik, T., Oterhals, Å., Rønning, S.B. et al. Valorization of Proteins from Co- and By-Products from the Fish and Meat Industry. Top Curr Chem (2017) (Z) 375, 53. https://doi.org/10.1007/s41061-017-0143-6

Bah, C.S.F., El-Din, A., Bekhit, A. et al. (2016). Composition and biological activities of slaughterhouse blood from red deer, sheep, pig and cattle. Journal of the Science of Food and Agriculture 96: 79– 89.

Baladincz, P. and Hancsók, J. (2015). Fuel from waste animal fats. Chemical Engineering Journal 282: 152– 160.

Baldassarre, B., Schepers, M., Bocken, N., Cuppen, E., Korevaar, G., & Calabretta, G. (2019). Industrial Symbiosis: towards a design process for eco-industrial clusters by integrating Circular Economy and Industrial Ecology perspectives. *Journal of Cleaner Production*, *216*, 446–460. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.091

Banković-Ilić, I.B., Stojković, I.J., Stamenković, O.S. et al. (2014). Waste animal fats as feed stocks for biodiesel production. Renewable and Sustainable Energy Reviews 32: 238– 254.

Basset-Mens, C., & Van Der Werf, H. M. G. (2005). Scenario-based environmental assessment of farming systems: The case of pig production in France. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, *105*(1–2), 127–144. https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.05.007

Bava, L., Zucali, M., Sandrucci, A., & Tamburini, A. (2017). Environmental impact of the typical heavy pig production in Italy. *Journal of Cleaner Production*, *140*, 685–691. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.029

British Standard Institution, B., 2008. Guide to PAS 2050. How to assess the carbon footprint of goods and services. In: BSI (Ed.), London, UK

Bruel, A., Kronenberg, J., Troussier, N., & Guillaume, B. (2019). Linking Industrial Ecology and Ecological Economics: A Theoretical and Empirical Foundation for the Circular Economy. *Journal of Industrial Ecology*, *23*(1), 12–21. https://doi.org/10.1111/jiec.12745

Bockey, D. (2019). The significance and perspective of biodiesel production – A European and global view. *OCL*, *26*, 40. https://doi.org/10.1051/OCL/2019042

Cascarosa, E., Gea, G., and Arauzo, J. (2012). Thermochemical processing of meat and bone meal: a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16: 942– 957.

Cervantes, G. (2011). Ecología Industrial: innovación y desarrollo sostenible en sistemas industriales. Revista Internacional Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo 6, 59-78.

Cervantes, G., Cuevas, G. (2021). Propuesta de valorización de residuos de rastros para contribuir a la economía circular. Reporte final del proyecto de la CONVOCATORIA DE

INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN TECNOLÓGICA 2020, Universidad de la Salle Bajio. México, junio 2021.

Chowdhury, M. W., Nabi, M. N., Arefin, M. A., Rashid, F., Islam, M. T., Gudimetla, P., & Muyeen, S. M. (2022). Recycling slaughterhouse wastes into potential energy and hydrogen sources: An approach for the future sustainable energy. In *Bioresource Technology Reports* (Vol. 19, p. 101133). Elsevier. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101133

Corona, B., Shen, L., Reike, D., Rosales Carreón, J., & Worrell, E. (2019). Towards sustainable development through the circular economy—A review and critical assessment on current circularity metrics. In *Resources, Conservation and Recycling* (Vol. 151, p. 104498). Elsevier. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104498

Coutand, M., Cyr, M., Deydier, D. et al. (2008). Characteristics of industrial and laboratory meat and bone meal ashes and their potential applications. Journal of Hazardous Materials 150: 522– 532.

DACC. (2022). *Informe Anual del Sector Porcí 2021*. https://agricultura.gencat.cat/

Dorca-Preda, T., Fantke, P., Mogensen, L., & Knudsen, M. T. (2022). Towards a more comprehensive life cycle assessment framework for assessing toxicity-related impacts for livestock products: The case of Danish pork. *Science of the Total Environment*, *815*, 152811. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152811

Dorca-Preda, T., Mogensen, L., Kristensen, T., & Knudsen, M. T. (2021). Environmental impact of Danish pork at slaughterhouse gate – a life cycle assessment following biological and technological changes over a 10-year period. *Livestock Science*, *251*, 104622. https://doi.org/10.1016/j.livsci.2021.104622

Du, C., Abdullah, J. J., Greetham, D., Fu, D., Yu, M., Ren, L., Li, S., & Lu, D. (2018). Valorization of food waste into biofertiliser and its field application. *Journal of Cleaner Production*, *187*, 273–284. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.03.211

EC. (2009). Regulation (EC) no 1069/2009 of the European Parliament and of the council of 21 October 2009 laying down health rules as regards animal by-products and derived products not intended for human consumption and repealing regulation (EC) no 1774/2002 (animal by-products regulation). L. 300

EC. (2011). Regulation (EU) No 142/2011 of 25 February 2011 implementing Regulation (EC) No 1069/2009 of the European Parliament and of the Council laying down health rules as regards animal by-products and derived products not intended for human consumption and implementing Council Directive 97/78/EC as regards certain samples and items exempt from veterinary checks at the border under that Directive Text with EEA relevance. L.54

El-Haggar, S. M. (2007). Sustainable Development and Industrial Ecology. In *Sustainable Industrial Design and Waste Management* (pp. 85–124). Academic Press. https://doi.org/10.1016/b978-012373623-9/50005-8

Ellen Macarthur Foundation. (2021). *What is a circular economy? | Ellen MacArthur Foundation*. Ellen Macarthur. https://ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview

Erkman, S. (1997). Industrial ecology: an historical view. *I. Cleaner Prod*, *5*(2), 1–2.

Eurostat. (2022). *Key figures on the European food chain - 2022 edition - Products Key Figures - Eurostat*. https://doi.org/10.2785/500223

Etxabide, A., Uranga, J., Guerrero, P., & de la Caba, K. (2017). Development of active gelatin films by means of valorisation of food processing waste: A review. *Food Hydrocolloids*, *68*, 192–198. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.08.021

FAO. (2021). The State of Food and Agriculture 2021. Making agrifood systems more resilient to shocks and stresses. In *FAO*. FAO. https://doi.org/https://doi.org/10.4060/cb4476en

Ferronato, G., Corrado, S., De Laurentiis, V., & Sala, S. (2021). The Italian meat production and consumption system assessed combining material flow analysis and life cycle

assessment. *Journal of Cleaner Production*, *321*, 128705. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128705

Fraval, S., van Middelaar, C. E., Ridoutt, B. G., & Opio, C. (2018). Life cycle assessment of food products. In *Encyclopedia of Food Security and Sustainability* (pp. 488–496). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.22221-X

Gedam, V. V., Raut, R. D., Lopes de Sousa Jabbour, A. B., Tanksale, A. N., & Narkhede, B. E. (2021). Circular economy practices in a developing economy: Barriers to be defeated. *Journal of Cleaner Production*, *311*, 127670. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.127670

Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, *143*, 757–768. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.12.048

Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, *114*, 11–32. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007

Gibbs, D., & Deutz, P. (2007). Reflections on implementing industrial ecology through eco-industrial park development. *Journal of Cleaner Production*, *15*(17), 1683–1695. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2007.02.003

Gómez-Guillén, M.C., Giménez, B., López-Caballero, M.E., and Montero, M.P. (2011). Functional and bioactive properties of collagen and gelatin from alternative sources: a review. Food Hydrocolloids 25: 1813– 1827.

González-García, S., Belo, S., Dias, A. C., Rodrigues, J. V., Costa, R. R. Da, Ferreira, A., Andrade, L. P. De, & Arroja, L. (2015). Life cycle assessment of pigmeat production: Portuguese case study and proposal of improvement options. *Journal of Cleaner Production*, *100*, 126–139. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.048

Goedkoop, M., Oele, M., Leijting, J., Ponsioen, T., Meijer, E., (2016). Introduction to LCA With SimaPro. PRé Consultants, the Netherlands.

Gorlov, I. F., Titov, E. I., Semenov, G. V., Slozhenkina, M. I., Sokolov, A. Y., Omarov, R. S., Goncharov, A. I., Zlobina, E. Y., Litvinova, E. V., & Karpenko, E. V. (2018). Collagen from porcine skin: A method of extraction and structural properties. *International Journal of Food Properties*, *21*(1), 1031–1042. https://doi.org/10.1080/10942912.2018.1466324

Guinée,J.B.,Gorrée,M.,Heijungs,R.,Huppes,G.,Kleijn,R.,deKoning,A.,van Oers, L., Wegener Sleeswijk, A., Suh, S., Udo de Haes, H.A., de Bruijn, H., van Duin, R., Huijbregts, M.A.J., Lindeijer, E., Roorda, A.A.H., van der Ven, B.L., Weidema, B.P. (Eds.), (2002). Handbook on Life Cycle Assessment; Operational Guide to the ISO Standards. Institute for Environmental Sciences, Leiden, The Netherlands.

Harris, S., Martin, M., & Diener, D. (2021). Circularity for circularity's sake? Scoping review of assessment methods for environmental performance in the circular economy. In *Sustainable Production and Consumption* (Vol. 26, pp. 172–186). Elsevier. https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.09.018

Honikel, K.O. (2011). Composition and calories. In: Handbook of Analysis of Edible Animal By-Products (ed. L.M.L. Nollet and F. Toldrá), 105– 121. Boca Raton: CRC Press.

Hsieh, Y.H. and Ofori, J.A. (2011). Food-grade proteins from animal by-products. Their usage and detection methods. In: Handbook of Analysis of Edible Animal By-Products (ed. L.M.L. Nollet and F. Toldrá), 3– 11. Boca Raton: CRC Press.

Ihobe. (2009). *Análisis de ciclo de vida y huella de carbono*.

ISIE. (2013). *International Society for Industrial Ecology - About*. International Society for Industrial Ecology. https://is4ie.org/about/what-is-industrial-ecology

ISO, 2006a. ISO 14040, Environmental Management - Life Cycle Assessment – Principles and Framework. International Organization of Standardization, Geneva, Switzerland.

ISO, 2006b. ISO 14044, Environmental Management - Life Cycle Assessment – Require- ments and Guidelines. International Organization of Standardization, Geneva, Switzerland.

Jelinski, L. W., Graedel, T. E., Laudise, R. A., McCall, D. W., & Patel, C. K. N. (1992). Industrial ecology: Concepts and approaches. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *89*(3), 793–797. https://doi.org/10.1073/pnas.89.3.793

Jurgilevich, A., Birge, T., Kentala-Lehtonen, J., Korhonen-Kurki, K., Pietikäinen, J., Saikku, L., & Schösler, H. (2016). Transition towards Circular Economy in the Food System. *Sustainability 2016, Vol. 8, Page 69*, *8*(1), 69. https://doi.org/10.3390/SU8010069

Karwowska, M., Łaba, S., Szczepański, K. (2021). Food loss and waste in meat sector—why the consumption stage generates the most losses? Sustainability (Switzerland) 13 (11). Available at: https://doi.org/10.3390/su13116227.

Lafarga, T. and Hayes, M. (2014). Bioactive peptides from meat muscle and by-products: generation, functionality and application as functional ingredients. Meat Science 98 (2): 227– 239.

Lamnatou, C., Ezcurra-Ciaurriz, X., Chemisana, D., & Plà-Aragonés, L. M. (2016). Environmental assessment of a pork-production system in North-East of Spain focusing on life-cycle swine nutrition. *Journal of Cleaner Production*, *137*, 105–115. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.051

Li, QF., He, Y. & Wang, RM. (2019). A facile extraction of keratin from pig hair and its properties. Biologia 74, 563–571.https://doi.org/10.2478/s11756-019-00210-5

Lieder, M., & Rashid, A. (2016). Towards circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry. *Journal of Cleaner Production*, *115*, 36–51. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2015.12.042

Liu, X., Cai, Z., & Yuan, Z. (2021). Environmental burdens of small-scale intensive pig production in China. *Science of the Total Environment*, *770*, 144720. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144720

López-Pedrouso, M., Lorenzo, J. M., Bou, R., Vazquez, J. A., Valcarcel, J., Toldrà, M., & Franco, D. (2023). Valorisation of pork by-products to obtain antioxidant and antihypertensive peptides. *Food Chemistry*, *423*, 136351. https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2023.136351

Lule D. y Cervantes G. (2010). Diagramas de flujo de sistemas industriales, una herramienta para la ecología industrial. El caso del corredor industrial de Altamira. En V Congreso Sistemas de Innovación para la Competitividad SINNCO 2010. Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Guanajuato (CONCYTEG), León.

Martínez-Alvarez, O., Chamorro, S., and Brenes, A. (2015). Protein hydrolysates from animal processing by-products as a source of bioactive molecules with interest in animal feeding: a review. *Food Research International 73: 204– 212.*

McAuliffe, G. A., Chapman, D. V., & Sage, C. L. (2016). A thematic review of life cycle assessment (LCA) applied to pig production. *Environmental Impact Assessment Review*, *56*, 12–22. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2015.08.008

McAuliffe, G. A., Takahashi, T., Mogensen, L., Hermansen, J. E., Sage, C. L., Chapman, D. V., & Lee, M. R. F. (2017). Environmental trade-offs of pig production systems under varied operational efficiencies. *Journal of Cleaner Production*, *165*, 1163–1173. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.191

Merli, R., Preziosi, M., & Acampora, A. (2018). How do scholars approach the circular economy? A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, *178*, 703–722. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.12.112

Mirabella, N., Castellani, V., & Sala, S. (2014). Current options for the valorization of food manufacturing waste: a review. *Journal of Cleaner Production*, *65*, 28–41. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2013.10.051

Mora, L., Toldrá-Reig, F., Reig, M., & Toldrá, F. (2018). Meat By-Products: New Insights into Potential Technical and Health Applications. *Novel Proteins for Food, Pharmaceuticals and Agriculture*, 101–116. https://doi.org/10.1002/9781119385332.CH5

Nattassha, R., Handayati, Y., Simatupang, T. M., & Siallagan, M. (2020). Understanding circular economy implementation in the agri-food supply chain: the case of an Indonesian organic fertiliser producer. *Agriculture and Food Security*, *9*(1), 190–201. https://doi.org/10.1186/s40066-020-00264-8

Nguyen, T.L.T., Hermansen, J.E., Mogensen, L. (2011). Environmental Assessment of Danish Pork. Aarhus University, Aarhus, Denmark.

Ndue, K., & Pál, G. (2022). Life Cycle Assessment Perspective for Sectoral Adaptation to Climate Change: Environmental Impact Assessment of Pig Production. *Land*, *11*(6), 827. https://doi.org/10.3390/land11060827

Nollet, L.M.L. and Toldrá, F. (2011). Introduction – offal meat: definitions, regions, cultures and generalities. In: Handbook of Analysis of Edible Animal By-Products (ed. L.M.L. Nollet and F. Toldrá), 3– 11. Boca Raton: CRC Press.

Noya, I., Villanueva-Rey, P., González-García, S., Fernandez, M. D., Rodriguez, M. R., & Moreira, M. T. (2017). Life Cycle Assessment of pig production: A case study in Galicia. *Journal of Cleaner Production*, *142*, 4327–4338. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.160

Noya, Isabel, Aldea, X., González-García, S., M. Gasol, C., Moreira, M. T., Amores, M. J., Marín, D., & Boschmonart-Rives, J. (2017). Environmental assessment of the entire pork value chain in Catalonia – A strategy to work towards Circular Economy. *Science of the Total Environment*, *589*, 122–129. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.186

Oliveira, M. M. de, Lago, A., & Dal' Magro, G. P. (2021). Food loss and waste in the context of the circular economy: a systematic review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 294, p. 126284). Elsevier. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126284

Peña, C., Civit, B., Gallego-Schmid, A., Druckman, A., Caldeira-Pires, A., Weidema, B., Mieras, E., Wang, F., Fava, J., Canals, L. M. i., Cordella, M., Arbuckle, P., Valdivia, S., Fallaha, S., & Motta, W. (2021). Using life cycle assessment to achieve a circular economy. *International Journal of Life Cycle Assessment*, *26*(2), 215–220. https://doi.org/10.1007/s11367-020-01856-z

Pearl, G.G. (2014). Inedible by-products. In: Encyclopedia of Meat Sciences, 2e (ed. C. Devine and M. Dikeman), 112– 125. Oxford: Elsevier.

Pérez-Gálvez, R., Almecija, M.C., Espejo, F.J. et al. (2011). Biobjective optimisation of the enzymatic hydrolysis of porcine blood protein. *Biochemical Engineering Journal* 53: 305– 310.

Pirlo, G., Carè, S., Casa, G. Della, Marchetti, R., Ponzoni, G., Faeti, V., Fantin, V., Masoni, P., Buttol, P., Zerbinatti, L., & Falconi, F. (2016). Environmental impact of heavy pig production in a sample of Italian farms. A cradle to farm-gate analysis. *Science of the Total Environment*, *565*, 576–585. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.174

Poponi, S., Arcese, G., Pacchera, F., & Martucci, O. (2022). Evaluating the transition to the circular economy in the agri-food sector: Selection of indicators. *Resources, Conservation and Recycling*, *176*, 105916. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105916

Ragasri, S., & Sabumon, P. C. (2023). A critical review on slaughterhouse waste management and framing sustainable practices in managing slaughterhouse waste in India. *Journal of Environmental Management*, *327*, 116823. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116823

Reckmann, K., Traulsen, I., & Krieter, J. (2012). Environmental Impact Assessment - methodology with special emphasis on European pork production. *Journal of Environmental Management*, *107*, 102–109. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.04.015

Reckmann, K., Traulsen, I., & Krieter, J. (2013). Life Cycle Assessment of pork production: A data inventory for the case of Germany. *Livestock Science*, *157*(2–3), 586–596. https://doi.org/10.1016/j.livsci.2013.09.001

Reyes, Y. A., Barrera, E. L., Valle, A. S., Gil, M. P., García, O. H., & Dewulf, J. (2019). Life Cycle Assessment for the Cuban pig production: Case study in Sancti Spiritus. *Journal of Cleaner Production*, *219*, 99–109. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.02.047

Ryder, K., El-Din Bekhit, A., McConnell, M., and Carne, A. (2016). Towards generation of bioactive peptides from meat industry waste proteins: generation of peptides using commercial microbial proteases. *Food Chemistry* 208: 42– 50.

Rougoor C., Elferink E., Lap T., Balkema A. (2015). LCA of Dutch pork— assessment of three pork production systems in the Netherlands. GLAMUR

Saidani, M., Yannou, B., Leroy, Y., Cluzel, F., & Kendall, A. (2019). A taxonomy of circular economy indicators. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 207, pp. 542–559). Elsevier. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.014

Santagata, R., Ripa, M., & Ulgiati, S. (2017). An environmental assessment of electricity production from slaughterhouse residues. Linking urban, industrial and waste management systems. *Applied Energy*, *186*, 175–188. https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2016.07.073

Schroeder, P., Anggraeni, K., & Weber, U. (2019). The Relevance of Circular Economy Practices to the Sustainable Development Goals. *Journal of Industrial Ecology*, *23*(1), 77–95. https://doi.org/10.1111/jiec.12732

Selmane, D., Christophe, V., & Gholamreza, D. (2008). Extraction of proteins from slaughterhouse by-products: Influence of operating conditions on functional properties. *Meat Science*, *79*(4), 640–647. https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2007.10.029

Shirsath, A. P., & Henchion, M. M. (2021). Bovine and ovine meat co-products valorisation opportunities: A systematic literature review. *Trends in Food Science & Technology*, *118*, 57–70. https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2021.08.015

Six, L., De Wilde, B., Vermeiren, F., Van Hemelryck, S., Vercaeren, M., Zamagni, A., Masoni, P., Dewulf, J., & De Meester, S. (2017). Using the product environmental footprint for supply chain management: lessons learned from a case study on pork. *International Journal of Life Cycle Assessment*, *22*(9), 1354–1372. https://doi.org/10.1007/s11367-016-1249-8

Sporchia, F., Kebreab, E., & Caro, D. (2021). Assessing the multiple resource use associated with pig feed consumption in the European Union. *Science of the Total Environment*, *759*, 144306. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144306

Stillitano, T., Spada, E., Iofrida, N., Falcone, G., & De Luca, A. I. (2021). Sustainable agri-food processes and circular economy pathways in a life cycle perspective: State of the art of applicative research. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 13, Issue 5, pp. 1–29). Multidisciplinary Digital Publishing Institute. https://doi.org/10.3390/su13052472

Toldrá, F., Aristoy, M.-C., Mora, L., and Reig, M. (2012). Innovations in value-addition of edible meat byproducts. *Meat Science* 92: 290– 296.

Toldrá, F., Mora, L., & Reig, M. (2016). New insights into meat by-product utilization. *Meat Science*, *120*, 54–59. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.04.021

Toldrá, F., Reig, M., Aristoy, M. C., & Mora, L. (2018). Generation of bioactive peptides during food processing. *Food Chemistry*, *267*, 395–404. https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2017.06.119

Toldrá, F., Reig, M., & Mora, L. (2021). Management of meat by- and co-products for an improved meat processing sustainability. *Meat Science*, *181*, 108608. https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2021.108608

Toldrá, F., Mora, L., & Reig, M. (2022). Chapter 23 - Current developments in meat by-products. In P. B. T.-N. A. of M. Q. (Second E. Purslow (Ed.), *Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition* (pp. 649–665). Woodhead Publishing. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85879-3.00027-1

UNEP. (2011). Global Guidance principles for life cycle assessment databases. In *Shonan Guidance Principles*. www.unep.org

van Zyl, M., & van Eeden, J. (2022). A CIRCULAR ECONOMY INVESTIGATION INTO TREATMENT TECHNOLOGIES AVAILABLE FOR THE DISPOSAL OF SLAUGHTERHOUSE DERIVATIVES. The South African Journal of Industrial Engineering, 33(3), 150–168. https://doi.org/10.7166/33-3-2791

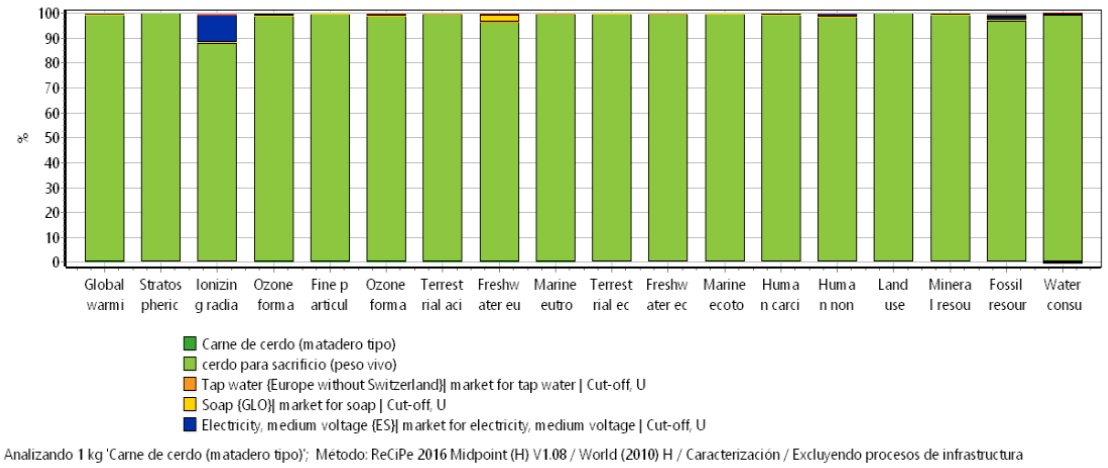
Valta, K., Damala, P., Orli, E., Papadaskalopoulou, C., Moustakas, K., Malamis, D., & Loizidou, M. (2015). Valorisation Opportunities Related to Wastewater and Animal By-Products Exploitation by the Greek Slaughtering Industry: Current Status and Future Potentials. *Waste and Biomass Valorization*, *6*(5), 927–945. https://doi.org/10.1007/s12649-015-9368-1

Vandermeersch, T., Alvarenga, R. A. F., Ragaert, P., & Dewulf, J. (2014). Environmental sustainability assessment of food waste valorization options. *Resources, Conservation and Recycling*, *87*, 57–64. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.03.008

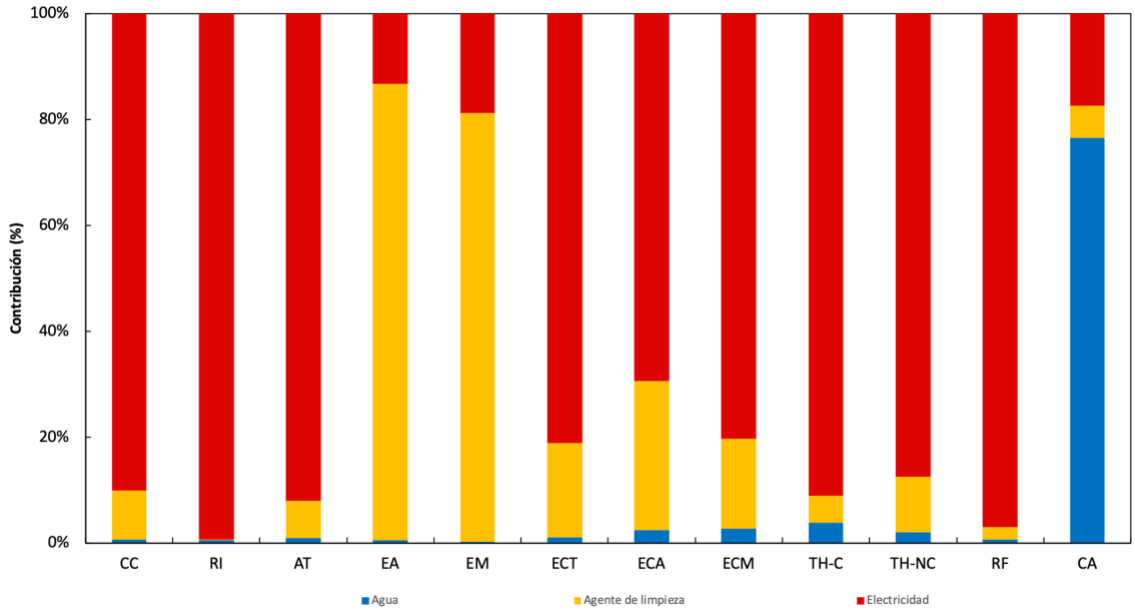
Winkler, T., Schopf, K., Aschemann, R., & Winiwarter, W. (2016). From farm to fork - A life cycle assessment of fresh Austrian pork. Journal of Cleaner Production, 116, 80–89. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.005

7. Anexos

Anexo 1. Resultados del Analisis de 1 kg de carne de cerdo de un matadero tipo, mediante método Recipe Mindpoint (H).

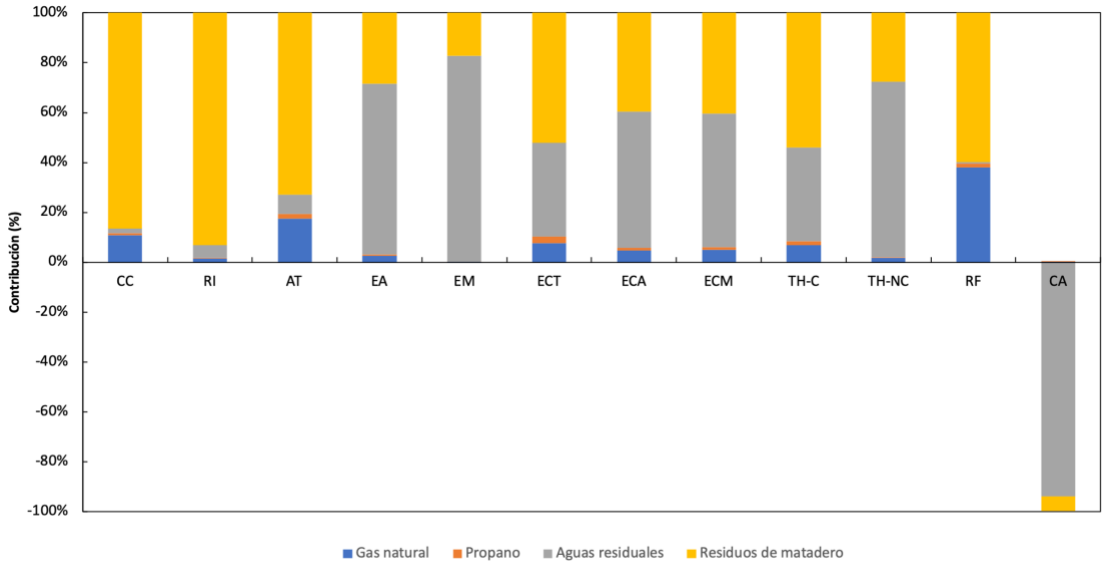


Anexo 2. Aportes (en %) del agua, electricicidad y agentes de limpieza en la produccion de carne de cerdo en un matadero tipo a las categorias de impacto evaluadas.



Siglas de las categorías de impacto: CC = cambio climático; RI = radiación ionizante; AT = acidificación terrestre; EA = eutrofización de agua dulce; EM = eutrofización marina; ECT = Ecotoxididad terrestre; ECA = Ecotoxididad de agua dulce; ECM = Ecotoxididad marina; TH-C = toxicidad humana cancerígena; TH-NC = toxicidad humana no cancerígena; RF = agotamiento de recursos fósiles; CA = agotamiento de agua.

Anexo 3. Aportes (en %) de energía (gas natural y propano), aguas residuales y residuos de matadero en la produccion de carne de cerdo en un matadero tipo a las categorias de impacto evaluadas.



Siglas de las categorías de impacto: CC = cambio climático; RI = radiación ionizante; AT = acidificación terrestre; EA = eutrofización de agua dulce; EM = eutrofización marina; ECT = Ecotoxididad terrestre; ECA = Ecotoxididad de agua dulce; ECM = Ecotoxididad marina; TH-C = toxicidad humana cancerígena; TH-NC = toxicidad humana no cancerígena; RF = agotamiento de recursos fósiles; CA = agotamiento de agua.

Anexo 4. Resultados generales de la evaluación de impacto por UF (1 kg de carne de cerdo saliente) asociado a la producción de carne de porcino en un matadero tipo.

Categoría de impacto	**Sigla**	**Unidad**	**Total**	**cerdo para sacrificio** (peso vivo)	**Agua**	**Agente de limpieza**	**Electricidad**	**Gas natural**	**Propano**	**Aguas residuales**	**Residuos de matadero**
Climate change	CC	kg CO2 eq	8.38430	8.288	0.00039	0.00470	0.04650	0.00345	0.00020	0.00063	0.0273
Ionizing radiation	RI	kBq Co-60 eq	0.33530	0.295	0.00021	6.83E-05	0.03769458	3.63E-05	5.03E-06	0.000112	0.00213
Terrestrial acidification	AT	kg SO2 eq	0.08743	0.087	1.51E-06	1.15E-05	0.00015086	4.19E-06	4.44E-07	1.90E-06	1.75E-05
Freshwater eutrophication	EA	kg P eq	0.00179	0.002	3.20E-07	5.28E-05	8.13E-06	1.15E-07	2.46E-08	3.13E-06	1.29E-06
Marine eutrophication	EM	kg N eq	0.00959	0.010	2.44E-08	5.75E-06	1.34E-06	1.05E-08	2.00E-09	1.04E-05	2.17E-06
Terrestrial ecotoxicity	ECT	kg 1,4-DCB	11.9889	11.939	0.00050	0.00782	0.03580	0.00046	0.00016	0.00225	0.003128
Freshwater ecotoxicity	ECA	kg 1,4-DCB	0.19180	0.191	1.02E-05	0.000118	0.00029	3.82E-06	7.97E-07	4.36E-05	3.15E-05
Marine ecotoxicity	ECM	kg 1,4-DCB	0.13301	0.132	1.42E-05	9.00E-05	0.00042	5.46E-06	1.17E-06	5.90E-05	4.46E-05
Human carcinogenic toxicity	TH-C	kg 1,4-DCB	0.09155	0.091	2.86E-05	3.87E-05	0.00068	8.00E-06	1.82E-06	4.38E-05	6.29E-05
Human non-carcinogenic toxicity	TH-NC	kg 1,4-DCB	1.78561	1.755	0.00044	0.00222	0.01848	0.00017	3.90E-05	0.006687	0.002638
Fossil resource scarcity	RF	kg oil eq	0.98080	0.951	0.00011	0.00032	0.01373	0.00598	0.000258	9.73E-05	0.009420
Water consumption	CA	m3	0.39107	0.391	0.00194	0.000157	0.000439	3.17E-06	3.69E-07	-0.00235389	-1.50E-04

Anexo 5. Resultados relativos a los residuos de matadero en la evaluación de impacto por UF (1 kg de carne de cerdo saliente) asociado a la producción de carne de porcino en un matadero tipo.

Categoría de impacto	Sigla	Total residuos de matadero	Sangre	Cadaveres (cerdo muerto)	Purines	Tripas	Decomisos	Huesos y grasa
Climate change	CC	0.0273	0.0064	0.0002	0.0034	3.80E-05	0.00119941	0.016036
Ionizing radiation	RI	0.00213	0.00050	1.27E-05	0.000270	2.97E-06	9.38E-05	0.001253
Terrestrial acidification	AT	1.75E-05	4.12E-06	1.04E-07	2.21E-06	2.44E-08	7.69E-07	1.03E-05
Freshwater eutrophication	EA	1.29E-06	3.04E-07	7.69E-09	1.63E-07	1.80E-09	5.67E-08	7.59E-07
Marine eutrophication	EM	2.17E-06	5.10E-07	1.29E-08	2.74E-07	3.02E-09	9.53E-08	1.27E-06
Terrestrial ecotoxicity	ECT	0.003128	0.00074	1.86E-05	0.00040	4.35E-06	0.000137	0.001837
Freshwater ecotoxicity	ECA	3.15E-05	7.41E-06	1.87E-07	3.98E-06	4.38E-08	1.38E-06	1.85E-05
Marine ecotoxicity	ECM	4.46E-05	1.05E-05	2.66E-07	5.64E-06	6.22E-08	1.96E-06	2.62E-05
Human carcinogenic toxicity	TH-C	6.29E-05	1.48E-05	3.74E-07	7.93E-06	8.74E-08	2.76E-06	3.69E-05
Human non-carcinogenic toxicity	TH-NC	0.002638	0.00062	1.57E-05	0.00033	3.67E-06	0.00012	0.00155
Fossil resource scarcity	RF	0.009420	0.00222	5.61E-05	0.00119	1.31E-05	0.00041	0.00553
Water consumption	CA	-1.50E-04	-3.53E-05	-8.93E-07	-1.89E-05	-2.09E-07	-6.59E-06	-8.81E-05