



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Evaluación ambiental mediante Análisis del Ciclo de Vida del tratamiento de purín porcino en fotobiorreactores con microalgas, para la valorización en biorrefinería de las microalgas generadas.

Autora: María Maté González

Tutor: Rubén Irusta Mata

Valladolid, julio, 2020



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Evaluación ambiental mediante Análisis del Ciclo de Vida del tratamiento de purín porcino en fotobiorreactores con microalgas, para la valorización en biorrefinería de las microalgas generadas.

Autora: María Maté González

Tutor: Rubén Irusta Mata

Valladolid, julio, 2020



Resumen

En este trabajo de fin de máster se realiza el Análisis del Ciclo de Vida del tratamiento de purín porcino con microalgas en un fotobiorreactor de canal abierto con la finalidad de obtener biomasa algal, para su posterior valorización en una biorrefinería. Para conocer si el proceso propuesto tiene viabilidad ambiental se comparan los resultados obtenidos con los de una alternativa que consiste en la obtención de fertilizante orgánico a partir de purín sin tratar. Para realizar esta comparación se utiliza el software Simapro y el método de evaluación de impacto IMPACT 2002+. Este método se caracteriza por dividir el impacto ambiental en cuatro categorías de daño y 15 categorías de impacto. Los resultados obtenidos muestran que el tratamiento de purín con microalgas tiene mejores resultados en las categorías de daño a salud humana, de daño a la calidad de los ecosistemas y cambio climático. Sin embargo, tiene peores resultados en la categoría de recursos, debido a que para llevar a cabo esta alternativa se requiere de un mayor número de materiales y de energía.

Abstract

This master thesis deals with Life cycle assessment of the treatment of pig manure with microalgae is cultivated in a Raceway photobioreactor to obtain algal biomass. The biomass undergoes the stages of a biorefinery to obtain high value-added products. In order to know if the proposed process has environmental viability, the results obtained are compared with those of an alternative consisting of obtaining organic fertilizer from untreated slurry. The Simapro software and the IMPACT 2002+ impact assessment method are used to make this comparison. This method is characterized by dividing the environmental impact into four categories of damage and 15 categories of impact. The results obtained show that the treatment of pig manure with microalgae has better results in the categories of damage to human health, damage to the quality of ecosystems and climate change. However, it has poorer results in the resource category because a greater number of materials and energy are required to carry out this alternative.



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

Agradecimientos

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento al profesor Rubén Irusta Mata por la generosa dedicación con la que ha tutelado este Trabajo de Fin de Máster. Siempre ha estado dispuesto a ayudarme. Sin él este trabajo no hubiese sido posible.

Quiero agradecer, también, la valiosa y desinteresada ayuda de la profesora Silvia Bolado Rodríguez.

Además, quiero agradecer a mi compañero Iván por haber estado dispuesto a prestar su apoyo.



Índice

1. Introducción.....	2
2. Objetivos	6
3. Alcance.....	8
3.1 Alternativa 1	10
3.1.1 Etapas del proceso.....	10
3.1.1.1 Almacenamiento interno del purín	10
3.1.1.2 Transporte del purín a las balsas	10
3.1.1.3 Almacenamiento externo del purín.....	11
3.1.1.4 Aplicación del purín a los terrenos de cultivo	12
3.1.2 Infraestructura.....	13
3.1.3 Productos obtenidos	13
3.1.3.1 Fertilizante orgánico	13
3.1.4 Cargas evitadas.....	13
3.1.4.1 Fosfato diamónico	13
3.2 Alternativa 2	14
3.2.1 Biomasa algal	14
3.2.2 Etapas del proceso.....	15
3.2.2.1 Almacenamiento interno en granja	16
3.2.2.2 Traslado del purín al tanque de dilución.....	16
3.2.2.3 Tanque de dilución	16
3.2.2.4 Planta de tratamiento.....	17
3.2.2.5 Deshidratación	19
3.2.2.6 Pretratamiento	20
3.2.2.7 Hidrólisis enzimática.....	22
3.2.2.8 Centrifugación	23
3.2.2.9 Neutralización	23
3.2.2.10 Ultrafiltración.....	24
3.2.2.11 Fermentación	25
3.2.2.12 Digestión anaerobia.....	25
3.2.2.13 Aplicación del digestato como fertilizante orgánico.....	26
3.2.3 Infraestructura.....	27



3.2.4	Productos obtenidos	28
3.2.4.1	Bioetanol.....	28
3.2.4.2	Proteínas.....	28
3.2.4.1	Biogás	29
3.2.4.2	Biofertilizante	30
3.2.5	Cargas evitadas.....	30
3.2.5.1	Bioetanol.....	30
3.2.5.2	Proteínas.....	31
3.2.5.3	Fosfato diamónico	31
3.2.5.4	Gas natural.....	31
4.	Análisis de inventario	34
4.1	Alternativa 1	34
4.1.1.1	Almacenamiento de purín	34
4.1.1.2	Trasporte del purín a las balsas.....	35
4.1.1.3	Aplicación del purín como fertilizante orgánico.....	35
4.1.1.4	Infraestructura	36
4.1.1.5	Cargas evitadas.....	37
4.2	Alternativa 2	37
4.2.1.1	Almacenamiento interno en granja	38
4.2.1.2	Traslado del purín al tanque de almacenamiento.....	38
4.2.1.3	Tanque de dilución	38
4.2.1.4	Planta de tratamiento.....	39
4.2.1.5	Deshidratación	39
4.2.1.6	Pretratamiento	40
4.2.1.7	Hidrólisis enzimática.....	40
4.2.1.8	Centrifugación	41
4.2.1.9	Neutralización	41
4.2.1.10	Ultrafiltración.....	41
4.2.1.11	Fermentación	42
4.2.1.12	Digestión anaerobia.....	42
4.2.1.13	Aplicación del digestato como fertilizante orgánico.....	43
4.2.1.14	Infraestructura	44
4.2.1.15	Cargas evitadas.....	44



5.	Evaluación de impacto del ciclo de vida y Análisis de resultados	48
5.1	Análisis del Ciclo de Vida de la infraestructura de las alternativas 1 y 2	48
5.2	Análisis del Ciclo de Vida de la Alternativa 1	55
5.3	Análisis del Ciclo de Vida de la Alternativa 2	61
5.4	Comparación de los ciclos de vida de las alternativas 1 y 2	68
6.	Conclusiones	76
	Bibliografía.....	80
	Anexos.....	86
A.1	Cantidad de purines a tratar	86
A.2	Elección pretratamiento e hidrólisis enzimática	91
A.3	Balance de materia	94
A.3.1	Alternativa 1	94
A.3.2	Alternativa 2	94
A.3.2.1	Planta de tratamiento.....	94
A.3.2.2	Pretratamiento	96
A.3.2.3	Hidrólisis enzimática.....	97
A.3.2.4	Centrifugación	97
A.3.2.5	Neutralización	98
A.3.2.6	Ultrafiltración.....	99
A.3.2.7	Fermentación	100
A.3.2.8	Digestión anaerobia.....	100
A.4	Dimensionado de equipos.....	102
A.4.1	Alternativa 1	102
A.4.1.1	Balsas	102
A.4.2	Alternativa 2	102
A.4.2.1	Planta de tratamiento.....	102
A.4.2.2	Tanques	103
A.4.2.3	Membrana de ultrafiltración	105
A.4.2.4	Bombas.....	106
A.5	Análisis de inventario	108
A.5.1	Alternativa 1	108
A.5.1.1	Almacenamiento de purín	108
A.5.1.2	Transporte del purín	111



A.5.1.3	Aplicación del purín como fertilizante orgánico.....	112
A.5.1.4	Infraestructura	114
A.5.1.5	Cargas evitadas.....	115
A.5.2	Alternativa 2	115
A.5.2.1	Almacenamiento interno en granja	115
A.5.2.2	Traslado del purín al tanque de dilución.....	115
A.5.2.3	Tanque de dilución	116
A.5.2.4	Planta de tratamiento.....	116
A.5.2.5	Deshidratación	116
A.5.2.6	Pretratamiento	117
A.5.2.7	Hidrólisis enzimática.....	117
A.5.2.8	Centrifugación	117
A.5.2.9	Neutralización	118
A.5.2.10	Ultrafiltración.....	118
A.5.2.11	Fermentación	118
A.5.2.12	Digestión anaerobia.....	118
A.5.2.13	Aplicación del digestato como fertilizante orgánico.....	119
A.5.2.14	Infraestructura.....	120
A.5.2.15	Cargas evitadas.....	121
A.6	Evaluación de impacto del ciclo de vida.....	124
A.6.1	Infraestructura.....	124
A.6.2	Alternativa 1	126
A.6.3	Alternativa 2	130
A.6.4	Comparación alternativas 1 y 2	137



CAPÍTULO 1:

INTRODUCCIÓN

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas,
para su valorización en biorrefinería.



1. Introducción

La sociedad actual se enfrenta a dos grandes problemas de carácter ambiental. En primer lugar, la sociedad se enfrenta a una gran generación de residuos de origen ganadero. Los purines contienen elevadas concentraciones de materia orgánica y nutrientes, difíciles de depurar y gestionar, pero que a la vez los convierten en una materia prima idónea para la obtención de bioproductos y para la producción de energía.

En segundo lugar, existe una demanda creciente de materias primas y de energía debido al aumento de la población mundial y al gran desarrollo de la actividad industrial. Los recursos naturales disponibles son escasos y las principales fuentes de energía tradicionales, los combustibles fósiles, presentan una serie de desventajas como su alto impacto ambiental y su aumento de precio de forma continua. Es necesario buscar nuevas materias primas y fuentes de energía alternativas, renovables y viables económicamente que permitan un desarrollo sostenible.

En relación con lo anteriormente comentado, desde los años 60 existe el concepto de biorrefinería (Honglay Chen and Oswald, 1998). Una biorrefinería es una planta que engloba los procesos de conversión de biomasa en bioproductos, biocombustibles y energía. A partir de la biomasa algal se podrían obtener bioproductos de alto valor añadido como proteínas, ácidos grasos y carbohidratos, además de biogás que actúa como biocombustible. Con la construcción de biorrefinerías se hace sostenible el tratamiento de purines, se recuperan los nutrientes y se obtiene una fuente de materia prima y energía verde lo que las diferencia de los combustibles fósiles (Alonso-Moreno and García-Yuste, 2016).

Este trabajo tiene como objetivo demostrar la viabilidad ambiental del tratamiento de purines con microalgas para su posterior valorización en biorrefinería. Para ello se van a plantear dos alternativas que utilicen los purines como materia prima. La primera alternativa va a consistir en aplicar los purines como fertilizantes orgánicos. La segunda alternativa va a tratar de obtener biomasa algal a partir de un tratamiento de estos purines. Para ello, se emplean fotobiorreactores basados en microalgas. Estos fotobiorreactores se encuentran actualmente en investigación para mejorar la recuperación de nutrientes y reducir el coste del cultivo de microalgas. En estos reactores crecen consorcios de microalgas y bacterias que trabajan simbióticamente en la acumulación de materias orgánicas y nutrientes (Quijano et al., 2017). La biomasa algal obtenida se va a utilizar en una biorrefinería para obtener diferentes bioproductos. Esta solución permitirá la recuperación de las sustancias con alto valor añadido.

En concreto el trabajo se centra en el análisis del ciclo de vida de ambas alternativas, para poder decidir cuál de las dos alternativas propuestas tiene una mayor viabilidad ambiental. El Análisis del Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta de gestión medioambiental cuya finalidad es identificar y evaluar el impacto ambiental atribuible a un producto o proceso durante todas las etapas de su ciclo de vida. La aplicación de esta herramienta puede llevarse a cabo siguiendo estándares internacionales, en el ámbito voluntario, basados en la normas UNE-EN ISO 14040:2006 que incluye la descripción del análisis del ciclo de

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



vida, los principios y el marco de referencia (AENOR, 2006a); la UNE-EN ISO 14044:2006 que describe los requisitos y directrices asociados al análisis del ciclo de vida (AENOR, 2006b); y la UNE-EN ISO 14050:2010 que define los términos relacionados con el análisis del ciclo de vida (AENOR, 2010).

El trabajo se divide en los siguientes apartados siguiendo la metodología del ACV. En primer lugar, se desarrollan los objetivos del trabajo. En segundo lugar, se define el alcance del estudio. En tercer lugar, se definen las entradas y salidas de materia y energía al sistema sujeto de estudio; es lo que se conoce como Inventario del ciclo de vida (ICV). En cuarto lugar, se evalúa la relevancia ambiental de cada entrada y salida. A esta etapa se la denomina Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (EICV). En quinto lugar, se analizan e interpretan los resultados obtenidos. Por último, se resumen las conclusiones obtenidas.



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas,
para su valorización en biorrefinería.



CAPÍTULO 2:

OBJETIVOS

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



2. Objetivos

El presente trabajo tiene como objetivo principal determinar si el tratamiento de purines con microalgas en un fotobiorreactor para su posterior valoración en una biorrefinería tiene viabilidad ambiental.

Con este objetivo general, se plantean unos objetivos más específicos:

- Plantear dos alternativas diferentes que permitan dar uso a los purines generados por parte del sector ganadero de Castilla y León.
- Definir las etapas necesarias para llevar a cabo dichas alternativas.
- Realizar el balance de materia para conocer los diferentes insumos y productos que se van a obtener en las alternativas propuestas.
- Determinar la energía consumida y generada en cada etapa de la alternativa propuesta.
- Calcular la infraestructura necesaria para poder llevar a cabo ambas alternativas.
- Determinar las emisiones generadas por ambas alternativas utilizando el programa SimaPro.
- Comparar los resultados medioambientales obtenidos en ambas alternativas.
- Decidir cuál de las alternativas tienen mayor viabilidad ambiental.



CAPÍTULO 3:

ALCANCE

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas,
para su valorización en biorrefinería.

3. Alcance

En este trabajo se estudian dos alternativas para conseguir los objetivos anteriormente citados. Ambas alternativas tienen como materia prima parte de los purines generados por el sector ganadero de Castilla y León.

Los purines son residuos procedentes de una mezcla de orina y estiércol de animales y de agua que se forma al reunir los desechos de animales domésticos. Este trabajo se centra en el purín porcino.

Los purines están compuestos por materia orgánica y nutrientes cuyos componentes principalmente son el nitrógeno, el fósforo y el potasio. Los compuestos principales que forman el fósforo y el potasio en los purines son el óxido de fósforo (V), P_2O_5 , y el óxido de potasio, K_2O . El alto contenido en N convierte a los purines en un buen fertilizante para su aplicación al campo, pero a la vez limita su uso a la disponibilidad de amplias extensiones de terreno para el cultivo. Para caracterizar el purín es necesario conocer los sólidos totales (ST), los sólidos volátiles (VS), la demanda química de oxígeno (DQO), la demanda biológica de oxígeno (DBO), la cantidad de nitrógeno (N), de fósforo (P) y de potasio (K). El purín utilizado presenta la composición mostrada en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición media del purín (ASAE, 2005).

Componente	kg/m ³
ST	50,65
VS	47,69
DQO	47,61
DBO	17,22
N	3,24
P	0,91
K	2,23

En la Tabla 2 viene representada la composición de los metales viene dada en función de la materia seca del purín (DM).

Tabla 2. Composición de metales pesados del purín (Corbala-Robles et al., 2018).

Metales pesados (mg/kg DM)							
As	Cd	Cu	Zn	Pb	Ni	Cr	Hg
3,0	0,3	640,0	770,0	5,0	9,0	10,0	0,3

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



También, se ha considerado que el porcentaje de humedad en el purín porcino es del 90% y que su densidad es de 1000 kg/m³ (ASAE, 2005).

La primera alternativa consiste en la aplicación directa de este purín como fertilizante orgánico. El alto contenido en N convierte a los purines en un buen fertilizante para su aplicación al campo, si bien esta práctica viene limitada a las restricciones que impone la legislación vigente, Real Decreto 261/1996 (BOE, 1996) y Decreto 4/2018 (BOCYL, 2018) que establecen una aplicación máxima de 170 kg N/ha/año.

La segunda alternativa describe la obtención de biomasa algal a partir de este purín y la utilización de esta en una biorrefinería. Esta solución permite la recuperación de las sustancias con alto valor añadido.

El alcance geográfico del estudio se centra en Segovia debido a que es la provincia de Castilla y León con mayor censo de ganadería porcina intensiva (Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación, 2019). El censo porcino de esta provincia se divide en 3 zonas como se puede observar en la Tabla 3.

Tabla 3. Censo porcino de los principales municipios de la provincia de Segovia (Junta de Castilla y León, 2019).

Zona	Censo de cerdas (hembras reproductoras)	Censo de animales en cebo
Cuéllar	80118	490076
Sepúlveda	23437	127387
Segovia	14782	60324

Para ambas alternativas se utiliza el purín generado en la zona de Cuéllar. Se han considerado para este estudio los municipios de Cuéllar, Olombrada y Valledado (Anexo A.1). La cantidad de purines de la zona seleccionada y que van a ser objeto de este estudio se ha fijado en 338866 m³/año.

Para el estudio de ambas alternativas se toma como Unidad Funcional (UF) 1 m³ de purín. Con una base funcional común se facilita la comparación de ambas alternativas, de forma que se podrá deducir cuál de ellas tiene mayor viabilidad ambiental. Para realizar esta comparación se utiliza el software SimaPro. SimaPro es una herramienta, desarrollada por Pré Consultants, que facilita la realización de estudios de análisis del ciclo de vida. Dentro del programa se va a utilizar la metodología de evaluación del impacto del ciclo de vida IMPACT 2002+ (Jolliet et al, 2003). Este método se caracteriza por dividir el impacto ambiental en cuatro categorías de daño (punto final). Estos son daños a la salud humana, daños a la calidad del ecosistema, cambio climático y daños a los recursos, y 15 categorías de impacto (punto medio). Esto se desarrolla con un mayor grado de detalle más adelante, en el apartado Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (EICV).

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.

3.1 Alternativa 1

Esta primera alternativa consiste en la aplicación del purín procedente del sector porcino de Cuéllar como fertilizante orgánico. El diagrama de bloques que sigue esta alternativa se representa en la Figura 1.

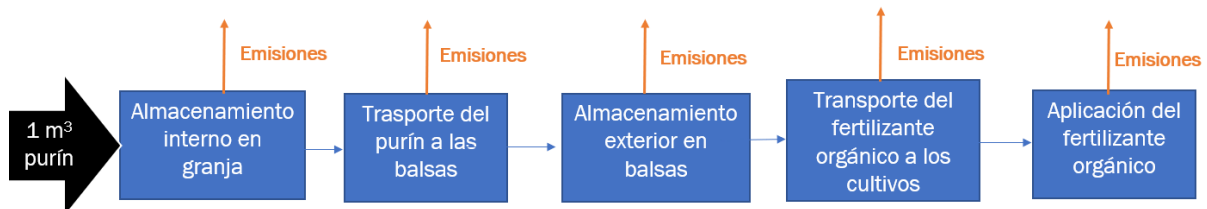


Figura 1. Diagrama de bloques de la alternativa 1.

Se describen a continuación las etapas y las hipótesis realizadas en la alternativa 1. Se estudian el almacenamiento del estiércol, el traslado de este a las balsas y desde estas a los cultivos y el uso del purín como fertilizante. También, se describen las consideraciones que se han tenido en cuenta al calcular las cargas evitadas.

3.1.1 Etapas del proceso

En esta alternativa la etapa principal es el almacenamiento del purín para ser aplicado como fertilizante, para ello necesita al menos 3 meses de almacenamiento (BOE, 2000). Una vez pasado ese tiempo se llevará a los cultivos más próximos con camiones cisterna para ser utilizado como fertilizante orgánico.

3.1.1.1 Almacenamiento interno del purín

En primer lugar, se almacena en la propia explotación porcina durante menos de un mes. Los cálculos detallados de las emisiones se desarrollan en el Anexo A.5.1.1. Estas emisiones se calculan utilizando los datos aportados por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) (Dong et al., 2006).

3.1.1.2 Transporte del purín a las balsas

Se realiza el traslado del purín desde las granjas a la balsa municipal. Esta se ubicará al lado de la granja que produzca mayor cantidad de purín de cada municipio, para disminuir así el impacto del transporte. Se utiliza un conjunto compuesto por tractora y una cisterna de aspiración para purines, lodos o cualquier otro tipo de carga aspirada. Su capacidad es de 29 m³.

Las toneladas por kilómetro debidas al traslado del purín a las balsas se calculan conociendo la superficie que hay recorrer. Para calcular las emisiones del traslado del purín a las balsas se supone que la balsa se encuentra en el punto medio de cada

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



municipio. Se conoce la superficie de cada municipio y los camiones necesarios al día para trasladar la totalidad del purín. Esto se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Superficie de los municipios y número de camiones necesarios.

Municipio	Superficie (km ²)	Radio (km)	Camiones (-)
Cuéllar	350	10,5	24
Olombrada	66	4,6	3
Vallelado	35	3,4	7

3.1.1.3 Almacenamiento externo del purín

En segundo lugar, se almacena durante al menos 3 meses para ser usado como fertilizante. Para llevar a cabo este almacenamiento se utilizan balsas. Cada municipio posee su propia balsa donde se acumulan los purines de las diferentes granjas de la localidad. Las balsas utilizadas donde se almacene el purín deben ser cercadas e impermeables para evitar filtraciones y la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas. Los cálculos se desarrollan en el Anexo A.4.1.1. Los resultados del dimensionamiento de las balsas para un periodo de almacenamiento del purín de 4 meses se encuentran en la Tabla 5.

Tabla 5. Dimensiones de las balsas de almacenaje de purines en cada municipio.

Municipio	Flujo (m ³ /mes)	Volumen teórico (m ³)	Volumen real (+10%) (m ³)	Ancho (m)	Largo (m)	Alto (m)
Cuéllar	20569	82277	90505	150	300	2
Olombrada	2112	8443	9287	48	96	2
Vallelado	5559	22236	24459	78	156	2

Las balsas para el almacenamiento exterior se impermeabilizan con PEHD (polietileno de alta densidad) de 1,5 mm de espesor. Este material tiene un peso específico de 500 g/m². La duración de este material para almacenamiento de purín es de 10 años.

Los cálculos detallados de las emisiones de gases a la atmósfera debido al almacenamiento del purín en las balsas se desarrollan en el Anexo A.5.1.1. Estas emisiones se calculan utilizando los datos aportados por el IPCC (Dong et al., 2006).



3.1.1.4 Aplicación del purín a los terrenos de cultivo

Es necesario el traslado del fertilizante desde las balsas de almacenamiento hasta los cultivos más próximos. Se utiliza un conjunto compuesto por tractora y una cisterna de aspiración para purines, lodos o cualquier otro tipo de carga aspirada que es capaz de transportar 20 toneladas.

Para calcular las toneladas por kilómetro (tkm) es necesario conocer la superficie de los terrenos de cultivo sobre los que se tiene que aplicar el purín, teniendo en cuenta que la cantidad máxima anual de nitrógeno que se puede aplicar por hectárea es de 170 kg N/ha/año.

La cantidad de hectáreas de superficie agrícola requerida es 8761 ha como se puede ver en el Anexo A.5.1.3. Esta superficie tiene un radio de 5,3 km. Esto y el número de camiones se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Superficie de terrenos de cultivo y camiones necesarios.

Superficie (ha)	Radio (km)	Camiones (-)
8761	5,3	46

Esta etapa consiste en la aplicación del purín obtenido como fertilizante. Para su aplicación se consideran dos etapas. La fertilización y la labranza. Para la primera, se utiliza un cono unido al tractor y para la segunda, un cultivador rotativo.

El uso de purín en suelos como fertilizante orgánico implica la generación de emisiones de compuestos de nitrógeno. Estas se calculan en el Anexo A.5.1.3 atendiendo a los datos aportados por el IPCC (Klein et al., 2006)

Además, se calculan las emisiones debidas a la lixiviación a las aguas subterráneas de suelos gestionados. Estas se dividen en tres grupos, las emisiones de nitratos, las emisiones de fósforo y las emisiones de metales pesados. Estas varían en función de la cantidad de nitrógeno que posee el purín. Para calcular las emisiones de nitratos, se utiliza el valor de 0,129 kg nitrato/kg de N excretado (Roy et al., 2003). Para calcular las emisiones de fósforo debidas a la lixiviación se utiliza el valor de 0,0009 kg P/kg de N excretado (Nemecek, 2013).

En cuanto a las emisiones de metales pesados al suelo, estas se corresponden con la cantidad de estos que se encuentra en la fracción sólida del purín (Corbala-Robles et al., 2018). La concentración de metales de este se muestra en la Tabla 2.



3.1.2 Infraestructura

Para llevar a cabo la primera alternativa es necesaria la infraestructura descrita a continuación.

En primer lugar, es necesario transformar el terreno de pastos a industrial. En segundo lugar, se tiene en cuenta la cantidad de terreno que se va a excavar para realizar las balsas. En tercer lugar, se supone que la construcción de las balsas se extiende durante un mes. En cuarto lugar, se sabe que es necesario colocar el aislante; esto implica la laminación del polietileno utilizado.

La vida útil de esta infraestructura es de 10 años.

La infraestructura viene definida en el software SimaPro con la unidad pieza. Esta unidad se representa con la letra p . Dicha unidad incluye todo lo descrito sobre la infraestructura. Se requiere de $2p$ de esta infraestructura para poder compararla con la infraestructura de la alternativa 2, debido a que esta última tiene una duración de 20 años.

3.1.3 Productos obtenidos

En esta alternativa se obtiene únicamente un producto final, el fertilizante orgánico.

3.1.3.1 Fertilizante orgánico

Como ya se ha citado en el apartado de materia prima, el purín tiene una carga significativa de materia orgánica y nutrientes, especialmente tienen un alto contenido de N y P (Acién et al., 2014). Esto implica que es un buen fertilizante, mejorando la capacidad de retención de agua y la composición mineral del suelo, además de su contenido nutricional (Kumar et al., 2010). El uso de este fertilizante orgánico supone una disminución de gases de efecto invernadero, debido a que es sustitutivo de fertilizantes minerales y pesticidas, cuya producción implica la liberación de óxidos de nitrógeno y amoníaco.

En esta alternativa la totalidad del purín se utiliza como fertilizante orgánico por lo que la cantidad de este que se genera es $338866 \text{ m}^3/\text{año}$.

3.1.4 Cargas evitadas

En este caso las emisiones evitadas se corresponden con la producción de fertilizante sintético debidas a la aplicación de fertilizante orgánico. Esto se debe a que son productos sustitutivos y el uso de uno evita la producción del otro.

3.1.4.1 Fosfato diamónico

El fertilizante sintético que se considera en este estudio es el fosfato diamónico (DAP) el cual posee un 23,5% de P y un 21,2 % de N. Los cálculos considerados para la equivalencia entre este y el fertilizante orgánico se realizan en el Anexo A.5.1.5.

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



3.2 Alternativa 2

En este apartado se describe el proceso consistente en el cultivo de microalgas y de la biorrefinería propuesta. La ubicación de la planta de cultivo y de la biorrefinería se sitúa en Cuéllar debido a que es el municipio con más censo porcino de toda Castilla y León. Ubicarlo en ese lugar evita el impacto ambiental del traslado de esa gran cantidad de purines a otro municipio.

3.2.1 Biomasa algal

Al igual que en el caso anterior, se parte de los purines de las localidades citadas. Estos purines tienen la composición citada en la Tabla 1. Sin embargo, en este caso se usan para obtener biomasa algal.

Las microalgas son organismos fotosintéticos, microscópicos, unicelulares y eucariotas. Existen diversos tamaños y tipos de microalgas. Las microalgas se desarrollan en medios acuáticos y son inocuas. En sus procesos metabólicos requieren un alto contenido de sustancias inorgánicas lo que las convierte en una solución muy interesante para tratar las aguas crecidas con purines. Dichas microalgas fijan CO_2 , N y P, utilizando como fuente de energía el sol, por medio de la fotosíntesis. Se convierten así en un elemento muy eficiente, utilizando la energía solar para producir biomasa. La biomasa algal utilizada en este trabajo está compuesta mayoritariamente por las especies *Scenedesmus* y *Chlorella vulgaris*. Una vez asimilado CO_2 , N y P, se almacenan dentro de las células de las microalgas en forma de carbohidratos, proteínas y lípidos (Makut et al., 2019).

Los carbohidratos (CH) en la biomasa sin tratar son principalmente polisacáridos y monosacáridos; el más abundante es la glucosa. A partir de los carbohidratos se obtiene el bioetanol.

Las proteínas (PR) son generalmente el componente mayoritario de la biomasa. Lo que las convierte en uno de los productos principales de la biorrefinería. Estas microalgas se emplean para obtener aminoácidos esenciales y no esenciales. Entre los esenciales destacan el aspartato, el glutamato y leucina; y entre los no esenciales destacan la serina, la cisteína y la glutamina (Brown, 1991).

Los lípidos (L) de la biomasa algal pueden ser tanto polares como neutros. Entre los polares destacan los fosfolípidos y los glicolípidos; y entre los neutros destacan los acilglicéridos y los ácidos grasos libres (D'Alessandro and Antoniosi Filho, 2016).

La ceniza es el resto de la biomasa algal seca. Esta fracción de la biomasa no tiene valor añadido.

Para este estudio se ha tomado una biomasa algal que tiene 19,75% de sólidos totales y el resto es humedad. Los sólidos totales se distribuyen según lo mostrado en la Tabla 7.

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.

Tabla 7. Composición media de los sólidos totales de la biomasa algal.

Componente	%
CH	22,3
PR	51,7
L	13,4
Ceniza	12,6

3.2.2 Etapas del proceso

Se describen aquí las diferentes etapas existentes en la alternativa 2. El diagrama de bloques completo se muestra en la Figura 2. Esta biorrefinería se va a centrar en maximizar la extracción de las proteínas (Puralga, 2017). Además, en este apartado se describen las hipótesis llevadas a cabo para realizar el análisis de inventario de la alternativa 2.

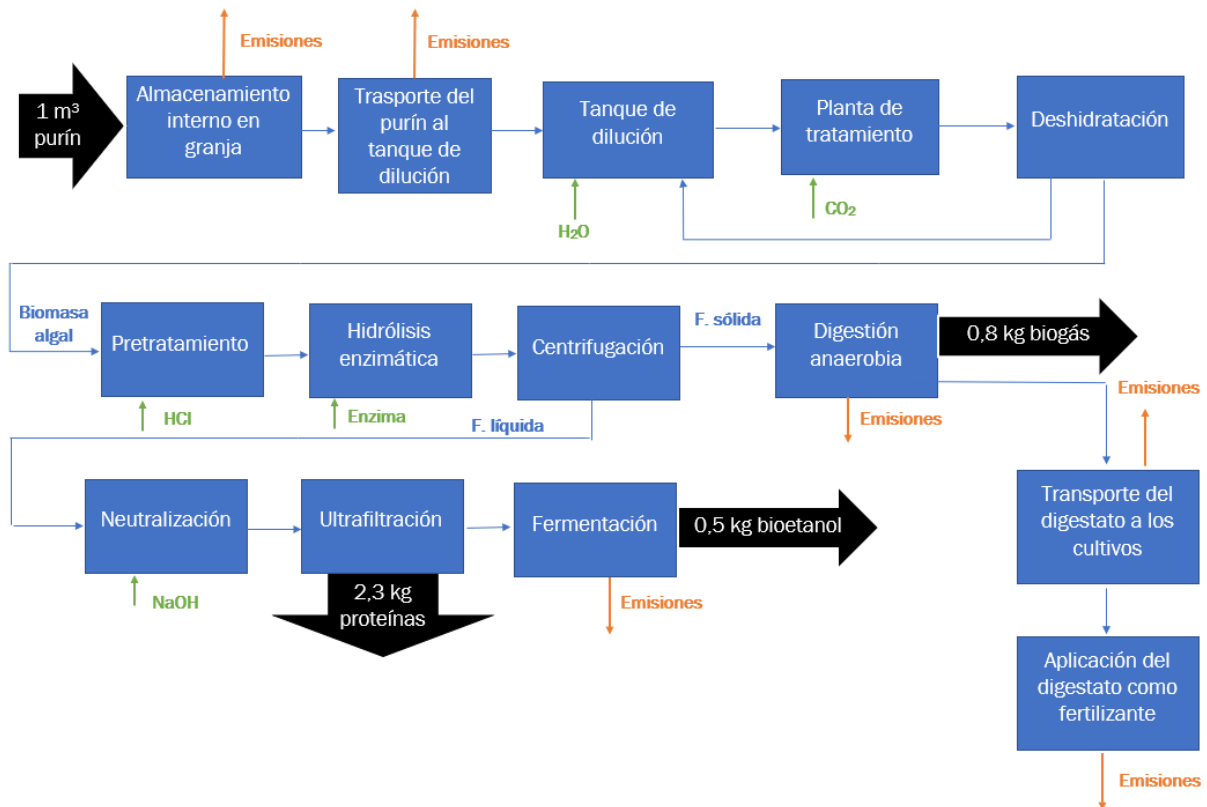


Figura 2. Diagrama de bloques de la alternativa 2.

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



3.2.2.1 Almacenamiento interno en granja

En esta alternativa se almacena el purín en la granja durante menos de un mes. Las emisiones debidas a este almacenamiento coinciden con las de la alternativa anterior calculadas utilizando los datos aportados por IPCC (Dong et al., 2006).

3.2.2.2 Traslado del purín al tanque de dilución

Es necesario llevar el purín de las granjas al tanque de dilución. Este traslado se realiza por carretera y se usan camiones con 29 m³ de volumen para trasladar el purín a la planta. La planta de tratamiento, al igual que la biorrefinería, se van a situar en Cuéllar lo más cercanas posibles a la granja con mayor producción de purines para minimizar el impacto de transporte. Las consideraciones tomadas se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Distancia al tanque de dilución y cantidad de purín al día que hay que trasladar desde cada municipio y camiones necesarios.

Municipio	Radio (km)	Producción (m ³ /d)	Área (km ²)	Número de Camiones (-)
Cuéllar	5,5	676,2	95	22
Olombrada	9	69,4	254,5	3
Valledado	9	182,8	254,5	7

3.2.2.3 Tanque de dilución

En el tanque de almacenamiento se mezcla el purín con el agua diaria que hay que aportar al proceso. Es necesario aportar al cultivo el agua que se evapora y el agua que se pierde tras la deshidratación en la biomasa algal para diluir el purín en el tanque al 10%. La evaporación que se considera en esta zona es de 6,5 l/(m²·d) de media anual.

La cantidad de purín que llega cada día a este tanque se corresponde con la suma de producción de la Tabla 8, es decir, 928,4 m³/d de purín.

Para el almacenamiento y disolución de la materia prima, se opta por un depósito cilíndrico construido en acero SS-304 con un tiempo de residencia en un día. La relación altura/diámetro, H/D, seleccionada es de 0,75. El tanque de dilución se dimensiona según lo descrito en el Anexo A.4.2.2. Se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Dimensiones del tanque de dilución.

Tanque	Volumen teórico (m ³)	Volumen real (+10%) (m ³)	Diámetro (m)	Altura (m)	Espesor (mm)
Dilución	9240	10164	25,8	19,4	18,0

Este tanque tiene una vida útil de 20 años. La densidad del acero es de 141,3 kg/m² (Grupo Manni, 2019).

El purín se vierte de los camiones a este tanque, sin embargo, es necesaria una bomba para suministrar el agua fresca al tanque. Para calcular la potencia necesaria se siguen los pasos descritos en el Anexo A.4.2.4. Se selecciona la bomba 65-315 funcionando a 1800 rpm (Hidrostal, 2020). Esta bomba está fabricada con acero inoxidable ANSI-316. Se muestran sus principales características en la Tabla 10.

Tabla 10. Características de la bomba que suministra el agua.

Modelo	Velocidad (rpm)	D rodete (mm)	P desarrollada (W)	Rendimiento (%)	P consumida (W)
65-315	1800	317	6499	52	12498

3.2.2.4 Planta de tratamiento

En primer lugar, es necesario trasladar la materia prima del tanque de dilución a la planta de tratamiento. Para calcular la potencia necesaria se siguen los pasos descritos en el Anexo A.4.2.4. Se selecciona la bomba 125-315 funcionando a 1800 rpm (Hidrostal, 2020). Esta bomba está fabricada con acero inoxidable ANSI-316. Se muestran sus principales características en la Tabla 11.

Tabla 11. Características de la bomba encargada de llevar la mezcla a la planta de tratamiento.

Modelo	Velocidad (rpm)	D rodete (mm)	P desarrollada (W)	Rendimiento (%)	P consumida (W)
125-315	1800	335	43174,9	70	61678,4

El sistema que se emplea en el cultivo depende principalmente de la aplicación que se va a utilizar (González, 2016). Existen dos categorías principales de fotobiorreactores, abierto

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



y cerrado. Los sistemas de cultivo abiertos se caracterizan por la existencia de contacto directo entre el cultivo y la atmósfera. Para este tipo de cultivos se utilizan estanques artificiales, canales de rodadura y plataformas de capa fina. Los sistemas de cultivo cerrados no tienen contacto directo con la atmósfera. Para este tipo de cultivos se utilizan columnas de burbujas, bucles tubulares y paneles planos (Acién et al., 2017).

Los sistemas abiertos son los únicos factibles para la producción de grandes cantidades de biomasa (Benemann, 2013). Por esta razón, en este trabajo se utiliza un reactor de canales abiertos de rodadura (Raceway). Estos presentan algunas ventajas como su fácil limpieza, la exposición directa al sol, autoenfriamiento por evaporación y menor acumulación de oxígeno al liberarlo a la atmósfera. Sin embargo, los sistemas abiertos dependen en gran medida del clima y presentan requisitos de área más altos en comparación con los sistemas cerrados.

La elevada concentración de nitrógeno y fósforo en los purines implica que es necesaria la dilución de estos. Esta dilución, como ya se ha comentado, se lleva a cabo en el tanque de dilución. Por lo tanto, se requiere gran cantidad de agua (dilución 1/10). Para reducir el consumo de agua en el reactor se recircula el agua que sale de la deshidratación del cultivo de biomasa algal.

En este tipo de sistemas es necesario suministrar CO_2 para mejorar la formación de biomasa algal. La inyección de CO_2 favorece la fotosíntesis, es decir, el crecimiento de biomasa y, además, favorece el control del pH a valores óptimos. Es necesario diseñar el sistema de suministro para maximizar la cantidad neta de CO_2 disuelto y minimizar la liberación de CO_2 a la atmósfera. Existen dos formas de suministrar el CO_2 . Por un lado, burbujear el CO_2 al fondo del canal y, por otro lado, utilizar sumideros en la sección de salida. En la primera, al tratarse de canales poco profundos, el tiempo de contacto entre el gas y el líquido es muy bajo, por lo tanto, entre el 80% y 90% del CO_2 se pierde en la atmósfera. La segunda, sin embargo, permite alcanzar el 96% de la utilización de CO_2 . Por esa razón es esta última la que se elige en este cultivo. Los datos obtenidos para la microalga *Scenedesmus* y *Chlorella vulgaris* indican que se requieren 1,853 g de CO_2 para la formación de 1 g de biomasa algal seca de la especie *Scenedesmus* (Choi et al., 2019) y 1,776 g CO_2/g alga para la especie *Chlorella vulgaris* (Huntley et al., 2015a). Por lo tanto, se selecciona un valor medio de 1,8 g CO_2/g alga en esta planta. El consumo eléctrico de la inyección de CO_2 es de 22,2 Wh/kg CO_2 (Kadam, 2002).

En el Raceway se van a tratar 928,4 m³/d de purín. Debido a su alto contenido en nitrógeno y fósforo es necesario realizar una dilución al 10%. Se ha tomado un tiempo de residencia de 5 días, por lo que el volumen de reacción es de 46420 m³. Además, se sabe que para los reactores descritos se obtiene una productividad media de 20 g/(m²·d) de biomasa algal (Acién et al., 2017).

Se han tomado reactores con una capacidad de 1500 m³ cada uno, con una profundidad de solución de 15 cm, que ocupan una superficie de 10000 m² cada uno. Por lo tanto, es necesario disponer de 31 canales Raceway con las características mostradas en la Tabla 12.

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.

Tabla 12. Dimensionado del Raceway de canal abierto.

Etapa	Volumen (m ³)	Superficie (m ²)	Ancho (m)	Largo (m)	Altura (m)	Nº	Material
Canal abierto	1500	10000	31	322,5	0,15	31	Hormigón y geotextil

Siendo V el volumen, S la superficie, L la longitud, W el ancho, H la profundidad de canal y N° el número de canales. Se muestra un prototipo del canal en la Figura 3.

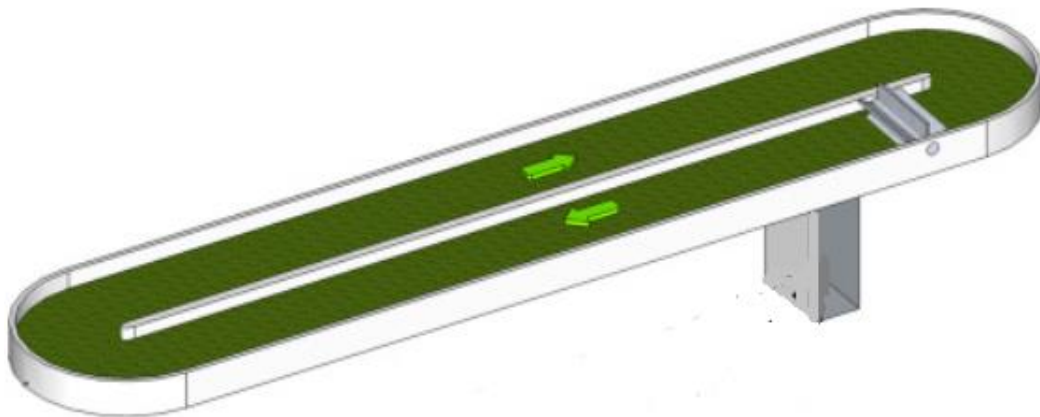


Figura 3. Prototipo de una unidad de canal abierto tipo Raceway.

Con los resultados de la Tabla 12 se deduce que el total de canales ocupa 31 ha. Además, se incluyen un 10% de ese tamaño como zona urbanizable, es decir, se requiere de 34 ha para la planta de tratamiento. Esta planta va a tener una vida útil de 20 años.

Por último, se sabe que para los canales abiertos con las características de la Tabla 12 son necesarios 93,88 kWh/ha/d de electricidad de planta de tratamiento (Huntley et al., 2015a).

3.2.2.5 Deshidratación

En primer lugar, es necesario trasladar el cultivo de biomasa hasta la etapa de deshidratación. Para calcular la potencia necesaria se siguen los pasos descritos en el Anexo A.4.2.4. Se selecciona la bomba 125-250 funcionando a 1800 rpm (Hidrostaal, 2020). Esta bomba está fabricada con acero inoxidable ANSI-316. Se muestran sus principales características en la Tabla 13.

Tabla 13. Características de la bomba encargada de trasladar la mezcla a la etapa de deshidratación.

Modelo	Velocidad (rpm)	D rodete (mm)	P desarrollada (W)	Rendimiento (%)	P consumida (W)
125-250	1800	275	25353,1	72	35212,7

La planta de tratamiento incluye una posterior deshidratación que implica la concentración de sólidos totales hasta un 20%, aproximadamente. Esta se lleva a cabo a través de un filtro prensa (Sills et al., 2020).

Para la deshidratación por filtro prensa en una instalación al día se requieren 3 kWh/ha/d (Huntley et al., 2015a).

Cuando ya se ha producido la deshidratación se recircula el agua sobrante al tanque de dilución. Para calcular la potencia necesaria se siguen los pasos descritos en el Anexo A.4.2.4. Se selecciona la bomba 125-250 funcionando a 1800 rpm (Hidrostal, 2020). Esta bomba está fabricada con acero inoxidable ANSI-316. Se muestran sus principales características en la Tabla 14.

Tabla 14. Características de la bomba de recirculación.

Modelo	Velocidad (rpm)	D rodete (mm)	P desarrollada (W)	Rendimiento (%)	P consumida (W)
125-250	1800	275	25243,7	72	35060,6

Una vez obtenida la biomasa algal en el cultivo se llevan a cabo las etapas de la biorrefinería

3.2.2.6 Pretratamiento

Los pretratamientos se utilizan para romper la pared celular de las microalgas, pudiéndose así extraer los distintos componentes macromoleculares atrapados en ellas, como son carbohidratos, lípidos y proteínas. Existen distintos tipos de pretratamientos. En primer lugar, pretratamientos físicos, entre los que destacan el molino de bolas, la explosión de vapor o el empleo de ultrasonidos para romper la pared celular. En segundo lugar, pretratamientos térmicos que se basan en aumento de la temperatura para la rotura de la pared, por ejemplo, mediante el uso de autoclave. Por último, pretratamientos químicos en los cuales se pone en contacto la biomasa algal con un agente químico como un ácido, una base o un peróxido.

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.

En este estudio se ha considerado un pretratamiento ácido, previo a la hidrólisis enzimática, que maximiza la liberación y recuperación de carbohidratos, y, principalmente, la liberación de proteínas. Además, se prima también el que minimice la degradación de carbohidratos y la liberación de lípidos (Bolado-Rodríguez et al., 2016).

En la Tabla 15 se indican las condiciones de operación fijadas para el pretratamiento.

Tabla 15. Pretratamiento óptimo considerando la hidrólisis enzimática posterior (Anexo A.2).

Pretratamiento	Microalga (g/L) en b.s.	HCl (mol/L)	T (°C)	t operación (min)	P (bar)
HCl	75	1	100	60	6

Con este pretratamiento se obtienen los resultados que se recogen en la Tabla 16.

Tabla 16. Resultados obtenidos tras el pretratamiento de la biomasa algal (Martín-Juárez et al., 2019).

LIBERACIÓN AZÚCARES	RECUPERACIÓN AZÚCARES	DEGRADACIÓN AZÚCARES	LIBERACIÓN PROTEÍNAS	LIBERACIÓN LÍPIDOS
73,6%	72,7%	1,2%	54,4%	2,4%

Para el pretratamiento, como se observa en la Tabla 15, el tiempo de residencia es de una hora y la presión necesaria 6 bar. El tanque de pretratamiento tiene geometría cilíndrica con una relación H/D de 2, se dimensiona según lo descrito en el Anexo A.4.2.2, obteniéndose los resultados que se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17. Dimensiones del tanque de pretratamiento.

Tanque	Volumen teórico (m ³)	Volumen real (+20%) (m ³)	Diámetro (m)	Altura (m)	Espesor (mm)
Pretratamiento	1,4	1,7	1,0	2,0	7,0

El material que se utiliza, por su buen comportamiento frente a la corrosión y su uso extendido en la industria, es el acero austenítico inoxidable SS-304. Se pretende que la vida útil sea de 20 años.

En esta etapa se requiere 0,7 MJ/kg de biomasa algal seca de electricidad para cumplir con las condiciones descritas (Hossain et al., 2019).

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



Esta etapa requiere calor para calentar el flujo de entrada a las condiciones del tanque. Se supone que la biomasa algal se encuentra a 25°C; para calentar los 0,4 kg/s de biomasa algal hasta 100°C se requieren 125 kW de calor.

3.2.2.7 Hidrólisis enzimática

La hidrólisis enzimática se realiza después del pretratamiento y consta de dos fases. La primera, consiste en la ruptura de la pared celular de las microalgas al igual que ocurría en el pretratamiento. Esta ruptura es necesaria debido a que los carbohidratos están atrapados dentro de la pared celular, intracelularmente, en forma de polisacáridos. La segunda fase se corresponde con la propia hidrólisis. Se trata de la descomposición de los polisacáridos, a glucosa y fructosa, monosacáridos.

La hidrólisis enzimática posterior al pretratamiento se realiza en un tanque a presión atmosférica con una concentración enzimática de 68 µl de enzima celulasa por cada gramo de alga seca y un tiempo de hidrólisis de 12 h (Martín-Juárez et al., 2019). En la Tabla 18 se muestran los resultados a los que se llega tras el pretratamiento y la hidrólisis enzimática de la biomasa algal.

Tabla 18. Resultados obtenidos tras el pretratamiento e hidrólisis enzimática de biomasa cultivada con purines (Martín-Juárez et al., 2019).

LIBERACIÓN AZÚCARES	RECUPERACIÓN AZÚCARES	DEGRADACIÓN AZÚCARES	LIBERACIÓN PROTEÍNAS	LIBERACIÓN LÍPIDOS
81,28%	75,74%	6,83%	91,32%	15,89%

Para este tipo de tanques se utiliza la norma API 650 (American Petroleum Institute, 2016). Esta norma solo es aplicable en el caso de tanques de acero, por ello, el material seleccionado es de nuevo el acero inoxidable austenítico SS-304 con una vida útil de 20 años. La relación H/D seleccionada es de 0,75. El tanque diseñado se muestra en la Tabla 19.

Tabla 19. Dimensiones del tanque de hidrólisis enzimática.

Tanque	Volumen teórico (m ³)	Volumen real (+20%) (m ³)	Diámetro (m)	Altura (m)	Espesor (mm)
H. enzimática	17,2	20,6	3,3	2,5	7,0

También, se requiere un consumo energético de 0,05 MJ/kg de biomasa algal seca (Hossain et al., 2019).

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.

3.2.2.8 Centrifugación

La centrifugación es la etapa donde se separan la fracción sólida y la líquida. En la fracción líquida se encuentran los carbohidratos, las proteínas y los lípidos recuperados. También se encuentra en esa fracción el disolvente utilizado en el pretratamiento y la humedad propia de la biomasa algal. En la fracción sólida se encuentran los carbohidratos, las proteínas y los lípidos no liberados. También irán a esta fracción los productos de degradación de carbohidratos, proteínas y lípidos degradados. Además de lo citado, en esta fracción se encuentra también la ceniza presente en la biomasa algal.

La centrífuga se selecciona dentro de un catálogo (Alfa Laval, 2020). Dentro de las centrifugas se selecciona una especializada en deshidratación de lodos en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales e industriales, con un enfoque en la sostenibilidad, rentabilidad, fiabilidad y facilidad de operación. La centrifuga seleccionada está construida principalmente con acero inoxidable, sus principales características se muestran en la Tabla 20.

Tabla 20. Características de la centrífuga.

Centrifugadora	P delante (kW)	P detrás (kW)	W (m)	L (m)	H (m)
ALDEC 10	7	3	0,6	2,2	0,8

Siendo W, L y H los parámetros mostrados en el prototipo de la Figura 4.

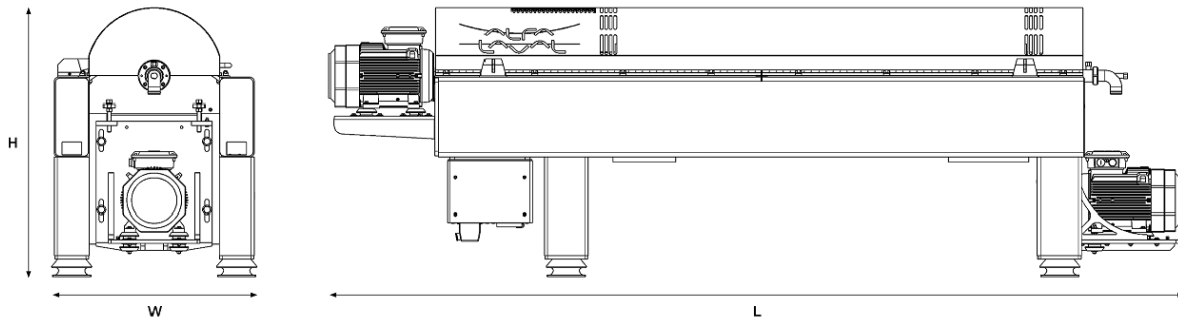


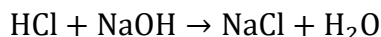
Figura 4. Prototipo de la centrífuga (Alfa Laval, 2020).

3.2.2.9 Neutralización

La neutralización se aplica a la fracción líquida y no es necesaria en todos los casos. Únicamente se utiliza si el pretratamiento realizado es químico; más específicamente, si se ha utilizado un ácido o una base como disolvente. Si se ha empleado un ácido en el pretratamiento se usará una base para neutralizar, y si se ha empleado una base en el pretratamiento se usará un ácido para neutralizar.

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.

Al haberse seleccionado un pretratamiento químico se tiene que llevar a cabo la etapa de neutralización descrita previamente. Al tratarse de un ácido clorhídrico la neutralización tiene que llevarse a cabo con una base fuerte como el NaOH. La reacción de neutralización que se produce es la siguiente:



La cantidad de NaOH se calcula a partir de la reacción mostrada, debido a que se conoce la cantidad de HCl utilizado para el pretratamiento. También, si se usa la reacción se conoce la cantidad de NaCl que se forma.

El tiempo de residencia en el tanque neutralizador es de 15 minutos y se trabaja a presión atmosférica. Se utiliza la norma API 650. La relación H/D seleccionada es de 0,75. El material es acero SS-304 con una vida útil de 20 años. Los resultados obtenidos en el Anexo A.4.2.2 se muestran en la Tabla 21.

Tabla 21. Dimensiones del tanque neutralización.

Tanque	Volumen teórico (m ³)	Volumen real (+20%) (m ³)	Diámetro (m)	Altura (m)	Espesor (mm)
Neutralización	0,32	0,38	0,86	0,65	7,0

Para conseguir que la neutralización sea eficaz se utiliza un agitador de 3 palas que funciona a 290 rpm. Se consumen en esta agitación 7,5 kW (NOVATEC, 2019).

3.2.2.10 Ultrafiltración

La corriente líquida se somete a la etapa de ultrafiltración. Este tipo de filtración se lleva a cabo utilizando membranas. Los componentes de alto peso molecular son retenidos (en este proceso, las proteínas), mientras que el agua, el disolvente y los componentes de bajo peso molecular atraviesan la membrana (lípidos y carbohidratos).

Para este proceso se selecciona una membrana tubular con polarización de concentración como se explica en el Anexo A.5.2.10. Las características principales se recogen en la Tabla 22.

Tabla 22. Características de la membrana de ultrafiltración.

Tipo de Membrana	Área membrana (m ²)	Longitud (m)	Área contacto tubo (m ²)	Nº tubos (-)
Tubular	0,9	0,5	0,08	12

La membrana está fabricada con polisulfona (PSU) que se cambia cada 2 años (Lo et al., 2005).

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.

Es necesaria una bomba encargada de aportar la presión de 3 bar necesaria para que el fluido pueda atravesar la membrana de ultrafiltración. Para calcular la potencia necesaria se siguen los pasos descritos en el Anexo A.4.2.4. Se selecciona la bomba 40-200L funcionando a 1800 rpm (Hidrostral, 2020). Esta bomba está hecha de acero inoxidable ANSI-316. Se muestran sus principales características en la Tabla 23.

Tabla 23. Características de la bomba.

Modelo	Velocidad (rpm)	D rodete (mm)	P desarrollada (W)	Rendimiento (%)	P consumida (W)
40-200L	1800	175	178,55	45	396,79

3.2.2.11 Fermentación

La fermentación es una etapa anaerobia que se aplica a la fracción permeada de la ultrafiltración. En este proceso metabólico las levaduras realizan la fermentación de los carbohidratos disueltos en el permeado y los convierten en bioalcoholes.

Las condiciones necesarias en esta etapa son 3 días de tiempo de residencia, 30°C de temperatura y presión atmosférica (El-Dalatony et al., 2019). El material vuelve a ser acero SS-304. La relación H/D seleccionada es de 0,5. El dimensionado siguiendo los pasos del Anexo A.4.2.2, se muestran los resultados obtenidos en la Tabla 24.

Tabla 24. Dimensiones del fermentador.

Tanque	Volumen teórico (m ³)	Volumen real (+20%) (m ³)	Diámetro (m)	Altura (m)	Espesor (mm)
Fermentador	80,2	96,2	6,3	3,1	7,00

Durante la fermentación de la glucosa se genera CO₂. Por cada gramo de glucosa fermentada se generan 0,489 g de CO₂ (Martín-Juárez et al., 2017).

El consumo energético necesario en la fermentación viene dado como 0,05 MJ/kg de alga (Hossain et al., 2019). Cabe destacar que a esta etapa llega el 22,2% de la biomasa algal seca que entra a la biorrefinería.

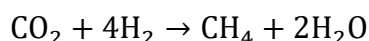
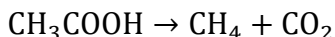
3.2.2.12 Digestión anaerobia

Esta etapa se aplica exclusivamente a la fracción sólida obtenida de la centrifugación. La digestión anaerobia es un proceso biológico a través del cual la materia orgánica, en ausencia de oxígeno, y mediante la acción de bacterias específicas, se transforma en productos gaseosos como CH₄ y CO₂, que forman el biogás. Este proceso consta de cuatro fases. La primera es la hidrólisis que consiste en una descomposición, controlada por

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



enzimas, de polisacáridos en monosacáridos. La segunda es la acidogénesis, controlada por bacterias fermentativas, etapa en la que los monómeros formados se degradan en ácidos grasos volátiles y alcoholes. La tercera etapa es la acetogénesis, controlada por bacterias acetogénicas, donde los ácidos y alcoholes formados anteriormente se degradan en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono. La última etapa es la metanogénesis, controlada por bacterias metanogénicas, en la cual se transforma el ácido acético en metano y dióxido de carbono; y el hidrógeno y dióxido de carbono en metano y agua.



El tiempo necesario para llevar a cabo la digestión anaerobia es de 30 días y la temperatura de 35°C se realiza a presión atmosférica utilizando bacterias mesófilas (Martín Juárez et al., 2018). El material es de nuevo acero SS-304 con una vida útil de 20 años. La relación H/D seleccionada es de 2. El dimensionado del digestor anaerobio se muestra en la Tabla 25 a partir de los cálculos que se recogen en el Anexo A.4.2.2.

Tabla 25. Dimensiones del digestor anaerobio.

Tanque	Volumen (m ³)	Volumen real (+20%) (m ³)	Diámetro (m)	Altura (m)	Espesor (mm)
Digestor	121,7	146,1	4,5	9,1	7,0

Para la digestión anaerobia se consumen, para mezclar el digestor, 112,5 kW y se requiere de 708,3 kW para aportar calor a 25000 kg alga seca al día (Collet et al., 2011). Cabe destacar que a esta etapa llega el 42,7% de la biomasa algal seca que entra a la biorrefinería.

Las emisiones de la digestión anaerobia se deben a las emisiones de CH₄, las emisiones de N₂O y las emisiones de NO_x. Las emisiones de CH₄, se corresponde con el 1,5% del metano producido, las emisiones de N₂O que se producen son 0,1 kg N₂O por cada TJ de electricidad producida y las emisiones de NO_x son 0,42 g de NO_x por cada m³ de biogás producido (De Vries et al., 2012).

3.2.2.13 Aplicación del digestato como fertilizante orgánico

El digestato obtenido se lleva a los cultivos más cercanos. Este se traslada en un conjunto compuesto por tractora y una cisterna de aspiración, lodos o cualquier otro tipo de carga aspirada que es capaz de transportar 20 toneladas, al igual que en la alternativa 1.

Esta etapa consiste en la aplicación del digestato obtenido como fertilizante. Para la fertilización se utiliza un cono unido al tractor. Las características de este digestato vienen definidas en el apartado productos obtenidos.

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



El uso de digestato como fertilizante orgánico implica la generación de emisiones de compuestos de nitrógeno. Estas se calculan atendiendo a los datos aportados por el IPCC (Klein et al., 2006). Además, se calculan las emisiones debidas a la lixiviación a las aguas subterráneas de suelos gestionados. Todas estas emisiones se calculan de igual forma que en la alternativa 1 (Apartado 3.1.1.4).

3.2.3 Infraestructura

Se calcula la infraestructura necesaria para llevar a cabo la alternativa 2. La infraestructura se divide en 4 submontajes. El submontaje del tanque de dilución, de la planta de tratamiento, de los tanques de la biorrefinería y de la membrana de ultrafiltración. Para cada submontaje se considera el área que ocupa, la transformación del terreno necesaria desde pastos a industrial y el tiempo de construcción de cada uno.

En primer lugar, se considera el tanque de dilución. El tanque está construido en acero de 18 mm de espesor. Este material tiene un peso específico es de 141,3 kg/m² (Grupo Manni, 2019). El tanque presenta forma cilíndrica y tiene una vida útil de 20 años. Este tanque se tarda en construir un mes.

En segundo lugar, se describe la planta de tratamiento. La planta de tratamiento está compuesta por los canales Raceway. Estos canales se aproximan a forma rectangular y están contruidos en hormigón de 10 cm de espesor. Este hormigón tiene un peso específico de 230 kg/m². Además, poseen una aislante geotextil de polipropileno con un peso específico 100 g/m². Para realizar el geotextil es necesario laminar el polipropileno. La planta se tarda en construir un año.

En tercer lugar, se hace referencia a los tanques de la biorrefinería. Estos tanques están hechos en acero de 7 mm de espesor. Este acero tiene un peso específico del acero es 54,95 kg/m² (Grupo Manni, 2019). Los tanques tienen formas cilíndricas y tienen una vida útil de 20 años.

Por último, se explica la membrana de ultrafiltración. Esta está elaborada con el material PSU. Este polímero tiene una densidad de 1,24 g/cm³ (elaplas, 2020). Como la membrana tiene una longitud de 50 cm, se llega al peso específico de 62 g/cm², es decir, 620 kg/m². La membrana tiene una vida útil de 2 años.

En la infraestructura no se consideran los elementos auxiliares como bombas o tuberías debido a que su impacto ambiental es mínimo comparado con el resto de la infraestructura.

Esta infraestructura tiene una vida útil de 20 años. Por lo tanto, con los años de vida propuestos solo es necesario cambiar la membra de ultrafiltración. Se necesita cambiar este submontaje 10 veces durante la vida útil de la planta. El total de la infraestructura viene definido en la unidad anteriormente mencionada p .



3.2.4 Productos obtenidos

3.2.4.1 Bioetanol

El bioetanol se obtiene en la etapa de fermentación realizada a la fracción permeada tras la ultrafiltración. El bioetanol es un biocombustible que sirve como alternativa a los combustibles fósiles. Dentro de los bioalcoholes el bioetanol es el más estudiado debido a su menor coste y sus mayores rendimientos (Voloshin et al., 2016).

El bioetanol de primera generación se obtiene a partir de cultivos alimentarios como la caña de azúcar, la remolacha, el maíz o el trigo. Sin embargo, los problemas éticos y económicos que se derivan del uso de cultivos alimentarios para la producción de combustible hacen necesario buscar alternativas de obtención de bioetanol. Surge así el bioetanol de segunda generación que reemplaza el uso de los cultivos alimentarios por el uso de materiales lignocelulósicos, una materia prima sobreabundante en el mundo (Alvira et al., 2010). No obstante, la obtención de bioetanol de segunda generación implica la utilización de pretratamientos severos para romper su estructura fuerte, debido a su contenido de lignina y la estructura cristalina de la celulosa. Adicionalmente, el uso de microalgas constituye la tercera generación. Estas no contienen lignina, por lo tanto, requieren de pretratamientos moderados (Günerken et al., 2015).

En la biorrefinería planteada se obtiene 0,5 kg de bioetanol por cada m³ de purín como se puede ver en el Anexo A.3.2.7.

3.2.4.2 Proteínas

Las proteínas se obtienen tras la ultrafiltración en la fracción retenida. Las proteínas son el principal componente de las microalgas y tienen un alto valor añadido. Esto convierte a las proteínas en uno de los principales productos de las biorrefinerías. Estas proteínas son utilizadas principalmente en piensos para alimentación animal. El contenido en proteínas es uno de los parámetros que hay que conocer para determinar si la calidad del alga la hace apta para ser usada como alimentación animal (Spolaore et al., 2006).

En la biorrefinería planteada se obtienen 2,3 kg de proteínas por cada m³ de purín como se puede ver en el Anexo A.3.2.6. Su composición viene reflejada en la Tabla 26.

Tabla 26. Composición de las proteínas (Lorenzo-Hernando et al., 2019).

Aminoácido esencial	Abreviatura	g/g proteína	Aminoácido esencial	Abreviatura	g/g proteína
Aspartato	Asp	11,62	Cisteína	Cys	0,30
Glutamato	Glu	13,66	Valina	Val	5,92
Serina	Ser	3,62	Metionina	Met	2,41
Histidina	His	2,00	Fenilalanina	Phe	6,32
Glicina	Gly	5,65	Isoleucina	Ile	4,73
Treonina	Thr	3,62	Leucina	Leu	10,70
Arginina	Arg	6,65	Lisina	Lys	5,63
Alanina	Ala	8,77	Prolina	Pro	4,13
Tirosina	Tyr	4,28	Aminoácidos esenciales/ totales	Eaa/Taa	33,42

3.2.4.1 Biogás

Este producto se obtiene tras la digestión anaerobia de la fracción sólida. El biogás es un gas compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono. Las principales fuentes de biogás son los residuos ganaderos y agroindustriales, los lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas (EDARs) y la fracción orgánica de los residuos domésticos. El biogás es la única energía renovable que puede emplearse en las tres aplicaciones energéticas principales: eléctrica, térmica o como carburante. El biogás es posible tanto canalizarlo directamente para usarlo en calderas adaptadas para su combustión, como inyectarlo en las infraestructuras de gas natural existentes de transporte o de distribución. Es importante destacar que para inyectarlo es necesario someterlo a una purificación hasta biometano (IDAE, 2013).

Como el metano tiene un potencial de calentamiento global muy superior al del dióxido de carbono, su aprovechamiento como biogás implica una importante reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero.

En la biorrefinería plantada se obtienen 0,8 kg de biogás por metro cúbico de purín como se puede ver en el Anexo A.3.2.8. Este biogás está formado por un 62% en volumen de CH₄ y un 38% en volumen de CO₂. Un biogás con estas características tiene un poder calorífico de 21,5 MJ/m³ y una densidad de 1,22 kg/m³ (Ludington, 2018).

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



3.2.4.2 Biofertilizante

Este producto se obtiene también en la etapa de digestión anaerobia: es la parte restante que no se ha transformado en biogás. Esta fracción se denomina digestato. El digestato tiene una carga significativa de nutrientes, especialmente tienen un alto contenido de N y P (Acién et al., 2014). Esto convierte al digestato en un buen fertilizante, mejorando la capacidad de retención de agua y la composición mineral del suelo, además de su contenido nutricional (Kumar et al., 2010). Al igual que ocurre en la alternativa 1, el uso de este biofertilizante supone una disminución de gases de efecto invernadero, debido a que es sustitutivo de fertilizantes minerales y pesticidas.

En la biorrefinería plantada se obtienen 3,6 kg de digestato por cada m³ de purín como se puede ver en el Anexo A.3.2.8. Este digestato tiene las características mostradas en la Tabla 27.

Tabla 27. Composición del digestato en base seca (Martín Juárez et al., 2018).

Componente	% (b.s)	Componente	% (b.s)
SV	28,8	Cr	2,0E-03
C	16,0	Cu	1,2E-02
N	1,7	Fe	1,2
P	2,0	K	1,0
S	1,0	Mg	5,7E-01
Hg	-	Mn	-
Al	5,7E-01	Ni	3,0E-03
As	1,0E-03	Pb	3,0E-03
Ca	9,8	Zn	1,6E-01

3.2.5 Cargas evitadas

En esta alternativa se consigue evitar las siguientes cargas.

3.2.5.1 Bioetanol

El bioetanol producido tiene la misma composición que un etanol producido mediante métodos tradicionales. Por lo tanto, son totalmente sustitutos, no es necesario realizar ninguna equivalencia.



3.2.5.2 Proteínas

Con la obtención de proteínas en la ultrafiltración se consigue evitar la producción de proteínas comerciales usadas en piensos de porcinos en crecimiento. Para conocer la relación entre las proteínas obtenidas y las comerciales hay que conocer que aminoácido esencial es el limitante, esto se calcula en el Anexo A.5.2.15.

3.2.5.3 Fosfato diamónico

El fertilizante sintético que se considera en este estudio es el fosfato diamónico (DAP) el cual posee un 23,5% de P y un 21,2 % de N. Los cálculos considerados para la equivalencia entre este y el fertilizante orgánico se realizan en el Anexo A.5.2.15.

3.2.5.4 Gas natural

Para calcular las cargas evitadas de gas natural al sustituirse por el empleo de biogás, es necesario conocer los poderes caloríficos de ambos. El poder calorífico de biogás formado es de 5135 kcal/m³ de biogás y del gas natural es de 9032 kcal/m³.



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas,
para su valorización en biorrefinería.



CAPÍTULO 4:

ANÁLISIS DE INVENTARIO

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas,
para su valorización en biorrefinería.

4. Análisis de inventario

En este apartado se recogen todos los datos obtenidos para realizar el ACV. Todos ellos están referenciados a la UF, 1 m³ de purín.

4.1 Alternativa 1

En esta alternativa se contemplan las siguientes etapas: el almacenamiento del purín en la explotación porcina, su traslado a una balsa de almacenamiento centralizada y su traslado y uso como fertilizante en los terrenos de cultivo, tal y como se ilustra en el diagrama de la Figura 5.

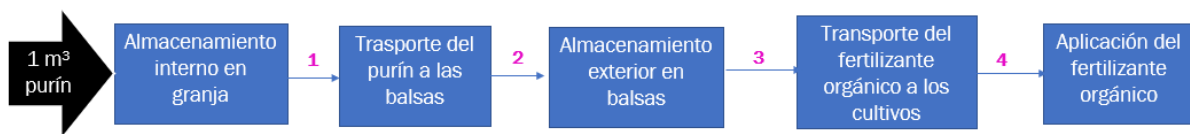


Figura 5. Diagrama de corrientes de la alternativa 1.

Como en esta alternativa no hay entradas y solo hay una línea de flujo la cantidad de purín se mantiene constante entre las corrientes 1 y 4.

4.1.1.1 Almacenamiento de purín

En primer lugar, el purín se almacena en la explotación porcina durante menos de un mes. Las emisiones debidas a este almacenamiento se muestran en la Tabla 28.

Tabla 28. Emisiones debidas al almacenamiento del purín en el interior de las explotaciones ganaderas. (Referidas a la Unidad Funcional, 1 m³ de purín). (Anexo A.5.1.1).

Emisiones (kg/m ³ purín)					
CH ₄	N ₂ O directas	N ₂ O indirectas	NH ₃	NO _x	N ₂
4,31E-1	1,05E-2	6,30E-4	3,15E-2	2,13E-2	1,94E-2

En segundo lugar, se almacena el purín como líquido fango en las balsas. Las emisiones calculadas de este almacenamiento se exponen en la Tabla 29.

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.

Tabla 29. Emisiones debidas al almacenamiento del purín en el exterior de las explotaciones ganaderas. (Referidas a la Unidad Funcional, 1 m³ de purín). (Anexo A.5.1.1).

Emisiones (kg/m ³ purín)					
CH ₄	N ₂ O directas	N ₂ O indirectas	NH ₃	NO _x	N ₂
1,87	2,62E-2	1,57E-3	7,87E-2	5,32E-2	4,86E-2

4.1.1.2 Transporte del purín a las balsas

El impacto ambiental debido al traslado del purín desde las explotaciones ganaderas a las balsas centralizada se muestra en la Tabla 30.

Tabla 30. Impacto ambiental debido al transporte del purín desde las explotaciones ganaderas hasta la balsa centralizada. (Referido a la Unidad Funcional, 1 m³ de purín). (Anexo A.5.1.2).

Traslado purín a balsas (tkm/m ³ purín)		
Cuéllar	Olombrada	Vallelado
15,4	9,9E-2	7,5E-1

4.1.1.3 Aplicación del purín como fertilizante orgánico

El impacto ambiental asociado al transporte del purín desde las balsas hasta los terrenos de cultivo se muestra en la Tabla 31.

Tabla 31. Impacto ambiental debido al transporte del purín desde la balsa centralizada hasta los terrenos de cultivo. (Referido a la Unidad Funcional, 1 m³ de purín). (Anexo A.5.1.3).

Traslado purín a cultivos (tkm/m ³ purín)
26,8

El uso de purín en suelos como fertilizante orgánico implica la generación de las emisiones mostradas en la Tabla 32.

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.

Tabla 32. Emisiones por aplicación del purín como fertilizante orgánico. (Referidas a la Unidad Funcional, 1 m³ de purín). (Anexo A.5.1.3).

Emisiones (kg/m ³ purín)				
N ₂ O directas	N ₂ O indirectas	NH ₃	NO _x	N ₂
5,09E-2	3,56E-3	2,75E-1	1,06E-2	1,52E-1

También, se calculan las emisiones debidas a la lixiviación de los purines aplicados en los terrenos de cultivo. Estas se muestran en la Tabla 33.

Tabla 33. Emisiones debidas a la lixiviación. (Referidas a la Unidad Funcional, 1 m³ de purín). (Anexo A.5.1.3).

Emisiones lixiviación (kg/m ³ purín)	
Nitratos	Fósforo
4,18E-1	8,21E-4

Además, se muestran las emisiones de metales pesados en la Tabla 34.

Tabla 34. Emisiones de metales pesados debidas a la aplicación del purín como biofertilizante. (Referidas a la Unidad Funcional, 1 m³ de purín). (Anexo A.5.1.3).

Emisiones metales (kg/m ³ purín)							
As	Cd	Cu	Zn	Pb	Ni	Cr	Hg
3,0E-4	3,0E-5	6,4E-2	7,7E-2	5,0E-4	9,0E-4	1,0E-3	3,0E-5

Por último, en la Tabla 35 se recogen los impactos ambientales debidos a los procesos que son necesarios realizar para aplicar el purín en la tierra de cultivo, expresados en ha de terreno.

Tabla 35. Impacto ambiental debido a las operaciones de aplicación del purín a los terrenos de cultivos. (Referido a la Unidad Funcional, 1 m³ de purín). (Anexo A.5.1.3).

Aplicación purín a los cultivos (ha/m ³ purín)	
Cono dispersor	Cultivador rotativo
2,6E-2	2,6E-2

4.1.1.4 Infraestructura

El material que es necesario para realizar las balsas se muestra en la Tabla 36.

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.

Tabla 36. Infraestructura almacenamiento purín en balsas. (Referida a la Unidad Funcional, 1 m³ de purín). (Anexo A.5.1.4).

Infraestructura	(p/m ³ purín)
	5,90 E-7

4.1.1.5 Cargas evitadas

En este caso las cargas evitadas se corresponden con la producción de fertilizante DAP.

Tabla 37. Cargas evitadas de DAP debidas al uso de biofertilizante. (Referidas a la Unidad Funcional, 1 m³ de purín). (Anexo A.5.1.5).

Cargas evitadas (kg/m³ purín)
Fertilizante DAP
3,8

4.2 Alternativa 2

En esta alternativa se contemplan las corrientes mostradas en la Figura 6.

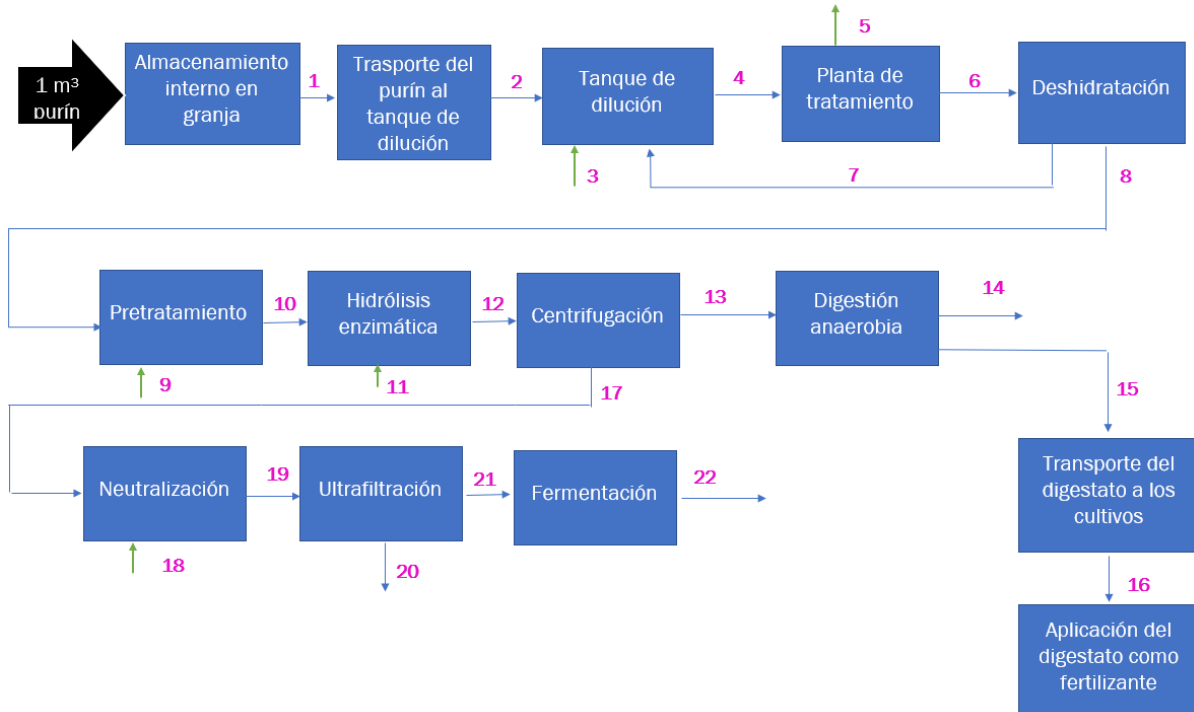


Figura 6. Diagrama de corrientes de la alternativa 2.

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.

El total del flujo que circula por cada corriente se muestra en kg/m³ de purín en la Tabla 38. Tabla de corrientes de la alternativa 2.

Tabla 38. Tabla de corrientes de la alternativa 2. (Referidas a la Unidad Funcional, 1 m³ de purín). (Anexo A.3.2).

Corriente	1	2	3	4	5	6	7	8
Total (kg/m ³ purín)	1000,0	1000,0	1204,2	10000,0	2170,4	7829,6	7795,8	33,8
Corriente	9	10	11	12	13	14	15	16
Total (kg/m ³ purín)	3,2	37,1	0,5	37,6	4,4	0,8	3,6	3,6
Corriente	17	18	19	20	21	22		
Total (kg/m ³ purín)	32,7	3,4	36,1	7,3	28,8	28,8		

Las corrientes de la Tabla 38 vienen desglosadas en componentes en el Anexo A.3.2.

4.2.1.1 Almacenamiento interno en granja

Las emisiones debidas a este almacenamiento coinciden con las de la alternativa anterior mostradas en la Tabla 28.

4.2.1.2 Traslado del purín al tanque de almacenamiento

Las toneladas por kilómetro debidas al transporte desde las granjas a la planta de cultivo se muestran en la Tabla 39.

Tabla 39. Transporte desde las granjas hasta el cultivo. (Referido a la Unidad Funcional, 1 m³ de purín). (Anexo A.5.2.2).

Traslado purín a tratamiento (tkm/m³ purín)
31,8

4.2.1.3 Tanque de dilución

Se necesita un suministro de agua. Para impulsar esta cantidad de agua se requiere de energía, se muestran ambos valores en la Tabla 40.

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.

Tabla 40. Suministro de agua fresca y consumo eléctrico de este. (Referidos a la Unidad Funcional, 1 m³ de purín). (Anexo A.5.2.3).

Requisitos de H ₂ O (kg/m ³ purín)	Consumo eléctrico (kWh/m ³ purín)
1204,2	3,2E-1

4.2.1.4 Planta de tratamiento

Los consumos eléctricos debidos al cultivo de purines para la obtención de biomasa algal se muestran en la Tabla 41.

Tabla 41. Consumo eléctrico en la planta de tratamiento. (Referido a la Unidad Funcional, 1 m³ de purín) (Anexo A.5.2.4).

Consumo eléctrico (kWh/m ³ purín)		
Agitación	Inyección de CO ₂	Suministro influente
4,1	2,7E-1	1,59

En la Tabla 42 se recoge la cantidad de CO₂ absorbido por las microalgas.

Tabla 42. Requisitos de CO₂. (Referido a la Unidad Funcional, 1 m³ de purín). (Anexo A.5.2.4).

Requisitos de CO ₂ (kg/m ³ purín)
12

Durante este proceso se evapora agua, la cantidad de agua que se evapora se muestra en la Tabla 43.

Tabla 43. Agua evaporada en la planta de tratamiento. (Referidas a la Unidad Funcional, 1 m³ de purín). (Anexo A.5.2.4).

Emisiones de H ₂ O (m ³ /m ³ purín)
2,17

4.2.1.5 Deshidratación

El consumo energético consumido en la deshidratación se muestra en la Tabla 44.

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



Tabla 44. Consumo eléctrico en la deshidratación. (Referido a la Unidad Funcional, 1 m³ de purín). (Anexo A.5.2.5).

Consumo eléctrico (kWh/m ³ purín)		
Filtro prensa	Suministro	Recirculación
1,3E-1	9,1E-1	9,1E-1

4.2.1.6 Pretratamiento

En la Tabla 45 se recoge la cantidad de HCl necesaria para el pretratamiento, se expresa en kg por m³ de purín.

Tabla 45. Cantidad de HCl. (Referida a la Unidad Funcional, 1 m³ de purín). (Anexo A.5.2.6).

Requisito de HCl (kg/m ³ purín)
3,2

Además, se requiere de calor y de electricidad, estos requerimientos se muestran en la Tabla 46.

Tabla 46. Consumo de electricidad y calor en el pretratamiento. (Referidos a la Unidad Funcional, 1 m³ de purín). (Anexo A.5.2.6).

Consumo eléctrico (kWh/m ³ purín)	Calor necesario (kWh/m ³ purín)
1,3	3,2

4.2.1.7 Hidrólisis enzimática

En la Tabla 37 se recoge la cantidad de celulasa necesaria para la hidrólisis enzimática, se expresa en kg por m³ de purín.

Tabla 47. Cantidad de celulasa. (Referida a la Unidad Funcional, 1 m³ de purín). (Anexo A.5.2.7).

Requisito de celulasa (kg/m ³ purín)
5,5E-1

Para realizar la hidrólisis enzimática se requiere de agitación que implica el consumo energético mostrado en la Tabla 48.

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



Tabla 48. Consumo eléctrico en la hidrólisis enzimática. (Referido a la Unidad Funcional, 1 m³ de purín). (Anexo A.5.2.7).

Consumo eléctrico (kWh/m ³ purín)
9,2E-2

4.2.1.8 Centrifugación

Para realizar la centrifugación se requiere el consumo energético mostrado en la Tabla 49.

Tabla 49. Consumo eléctrico en la centrifugación. (Referido a la Unidad Funcional, 1 m³ de purín). (Anexo A.5.2.8).

Consumo eléctrico (kWh/m ³ purín)	
Parte delantera	Parte trasera
1,8E-1	7,8E-2

4.2.1.9 Neutralización

Para realizar la neutralización es necesario añadir NaOH. La cantidad necesaria se muestra en la Tabla 50. También se muestra el NaCl formado.

Tabla 50. Requisitos de NaOH en la neutralización y formación de NaCl. (Referido a la Unidad Funcional, 1 m³ de purín). (Anexo A.5.2.9).

NaOH (kg/m ³ purín)	NaCl (kg/m ³ purín)
3,4	4,9

Para realizar la neutralización se requiere el consumo energético mostrado en la Tabla 51.

Tabla 51. Consumo eléctrico en la neutralización. (Referido a la Unidad Funcional, 1 m³ de purín). (Anexo A.5.2.9).

Consumo eléctrico (kWh/m ³ purín)
1,6E-1

4.2.1.10 Ultrafiltración

El consumo energético que se produce en la membrana es el correspondiente a la bomba que permite que el fluido atraviese la membrana. Se muestran estas en la Tabla 52.

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



Tabla 52. Consumo eléctrico en la ultrafiltración. (Referido a la Unidad Funcional, 1 m³ de purín). (Anexo A.5.2.10).

Consumo eléctrico (kWh/m ³ purín)
1,0E-2

4.2.1.11 Fermentación

El consumo energético necesario en la fermentación se muestra en la Tabla 53.

Tabla 53. Consumo eléctrico en la fermentación. (Referido a la Unidad Funcional, 1 m³ de purín). (Anexo A.5.2.11).

Consumo eléctrico (kWh/m ³ purín)
2,0E-2

Durante la fermentación se producen emisiones de CO₂ mostradas en la Tabla 54.

Tabla 54. Emisiones CO₂ en la fermentación. (Referido a la Unidad Funcional, 1 m³ de purín). (Anexo A.5.2.11).

Emisiones de CO ₂ (kg/m ³ purín)
4,7E-1

4.2.1.12 Digestión anaerobia

El consumo energético para la mezcla y el calor necesario en un digestor anaerobio de biomasa algal se muestran en la Tabla 55.

Tabla 55. Consumo eléctrico y calorífico en la digestión anaerobia. (Referidos a la Unidad Funcional, 1 m³ de purín). (Anexo A.5.2.12).

Consumo eléctrico (kWh/m ³ purín)	Calor necesario (kWh/m ³ purín)
3,1E-1	1,94

Las emisiones debidas a la digestión anaerobia se muestran en la Tabla 56.

Tabla 56. Emisiones debidas a la digestión anaerobia. (Referidas a la Unidad Funcional, 1 m³ de purín). (Anexo A.5.2.12).

Emisiones (kg/m ³ purín)		
CH ₄	N ₂ O	NO _x
4,5E-3	1,4E-6	2,8E-4

4.2.1.13 Aplicación del digestato como fertilizante orgánico

Las emisiones debidas al traslado del digestato a los cultivos se muestran en la Tabla 57.

Tabla 57. Impacto ambiental debido al transporte del digestato desde la biorrefinería hasta los terrenos de cultivo. (Referido a la Unidad Funcional, 1 m³ de purín). (Anexo A.5.2.13).

Traslado digestato a cultivos (tkm/m ³ purín)
8,4E-3

El uso de digestato en suelos como fertilizante orgánico implica la generación de las emisiones mostradas en la Tabla 58.

Tabla 58. Emisiones por aplicación del digestato como fertilizante orgánico. (Referidas a la Unidad Funcional, 1 m³ de purín). (Anexo A.5.2.13).

Emisiones (kg/m ³ purín)				
N ₂ O directas	N ₂ O indirectas	NH ₃	NO _x	N ₂
2,19E-5	1,53E-6	1,18E-4	4,57E-6	6,54E-5

También, se calculan las emisiones debidas a la lixiviación a las aguas subterráneas. Estas se muestran en la Tabla 59.

Tabla 59. Emisiones debidas a la lixiviación. (Referidas a la Unidad Funcional, 1 m³ de purín). (Anexo A.5.2.13).

Emisiones lixiviación (kg/m ³ purín)	
Nitratos	Fósforo
1,80E-4	1,47E-6

Además, se muestran las emisiones de metales pesados en la Tabla 60.

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.

Tabla 60. Emisiones de metales pesados debidas a la aplicación del digestato como biofertilizante (Referidas a la Unidad Funcional, 1 m³ de purín). (Anexo A.5.2.13).

Emisiones metales (kg/m ³ purín)							
As	Fe	Cu	Zn	Pb	Ni	Cr	Mg
8,2E-7	9,7E-4	9,4E-6	1,3E-4	2,5E-6	2,5E-6	1,6E-6	4,7E-4

Por último, en la Tabla 61 se recogen los impactos ambientales debidos a los procesos que son necesarios realizar para aplicar el purín en la tierra de cultivo, expresado en ha de terreno.

Tabla 61. Impacto ambiental debido a las operaciones de aplicación del digestato a los terrenos de cultivos. (Referido a la Unidad Funcional, 1 m³ de purín). (Anexo A.5.2.13).

Aplicación digestato a los cultivos (ha/m ³ purín)
Cono dispersor
1,0E-5

4.2.1.14 Infraestructura

Los materiales necesarios para realizar la infraestructura se recogen en la Tabla 62.

Tabla 62. Materiales necesarios en la alternativa 2. (Referidas a la Unidad Funcional, 1 m³ de purín). (Anexo A.5.2.14).

Infraestructura	(p/m ³ purín)
Tanque de dilución	1,48E-7
Planta de tratamiento	1,48E-7
Tanques de la biorrefinería	1,48E-7
Membrana UF	1,48E-6

4.2.1.15 Cargas evitadas

Para la alternativa 2, las cargas evitadas se muestran en la Tabla 63.

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



Tabla 63. Cargas evitadas de la alternativa 2. (Referidas a la Unidad Funcional, 1 m³ de purín). (Anexo A.5.2.15).

Cargas evitadas (kg/m ³ purín)			
Fertilizante DAP	Etanol	Proteínas	Gas Natural
4,0E-3	4,9E-1	1,82	2,8E-1



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas,
para su valorización en biorrefinería.



CAPÍTULO 5:

EVALUACIÓN DE IMPACTO DEL CICLO DE VIDA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas,
para su valorización en biorrefinería.

5. Evaluación de impacto del ciclo de vida y Análisis de resultados

El método de evaluación de impacto utilizado en este trabajo es IMPACT 2002+. Este método se caracteriza por dividir el impacto ambiental en cuatro categorías de daño (punto final), que son daños a la salud humana, daños a la calidad del ecosistema, cambio climático y daños a los recursos (Jolliet et al., 2003) y 15 categorías de impacto (punto medio), como se puede ver en la Tabla 64.

Tabla 64. Categorías de impacto y de daño de IMPACT 2002+.

Categorías de daño	Categorías de impacto
Daños a la salud humana	Sustancias cancerígenas
	Sustancias no cancerígenas
	Sustancias orgánicas respirables
	Sustancias inorgánicas respirables
	Radiación ionizante
	Destrucción de la capa de ozono
Daños a la calidad de los ecosistemas	Ecotoxicidad acuática
	Ecotoxicidad terrestre
	Acidificación y eutrofización terrestre
	Uso del suelo
	Acidificación acuática
	Eutrofización acuática
Cambio climático	Calentamiento global
Daños a los recursos	Extracción de minerales
	Energías no renovables

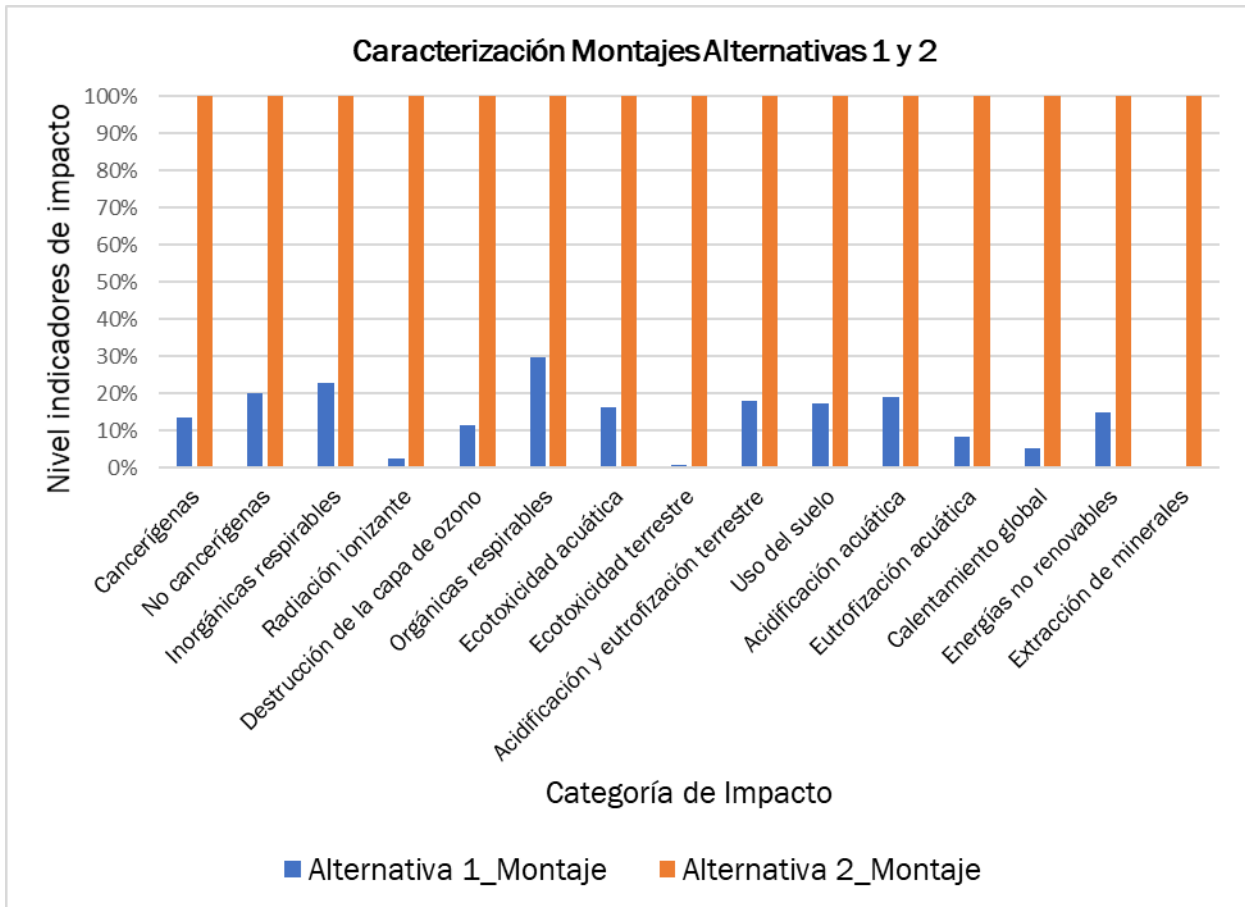
En este trabajo se aplicará el método de EICV IMPACT 2002+ a la unidad funcional adoptada, 1 m³ de purín.

5.1 Análisis del Ciclo de Vida de la infraestructura de las alternativas 1 y 2

En primer lugar, se comparan las infraestructuras de las alternativas 1 y 2. Para poder compararlas con exactitud se utiliza para ambas una vida útil de 20 años.

Se muestra en la Gráfica 1 la caracterización de las categorías de impacto para las infraestructuras de las alternativas 1 y 2.

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.

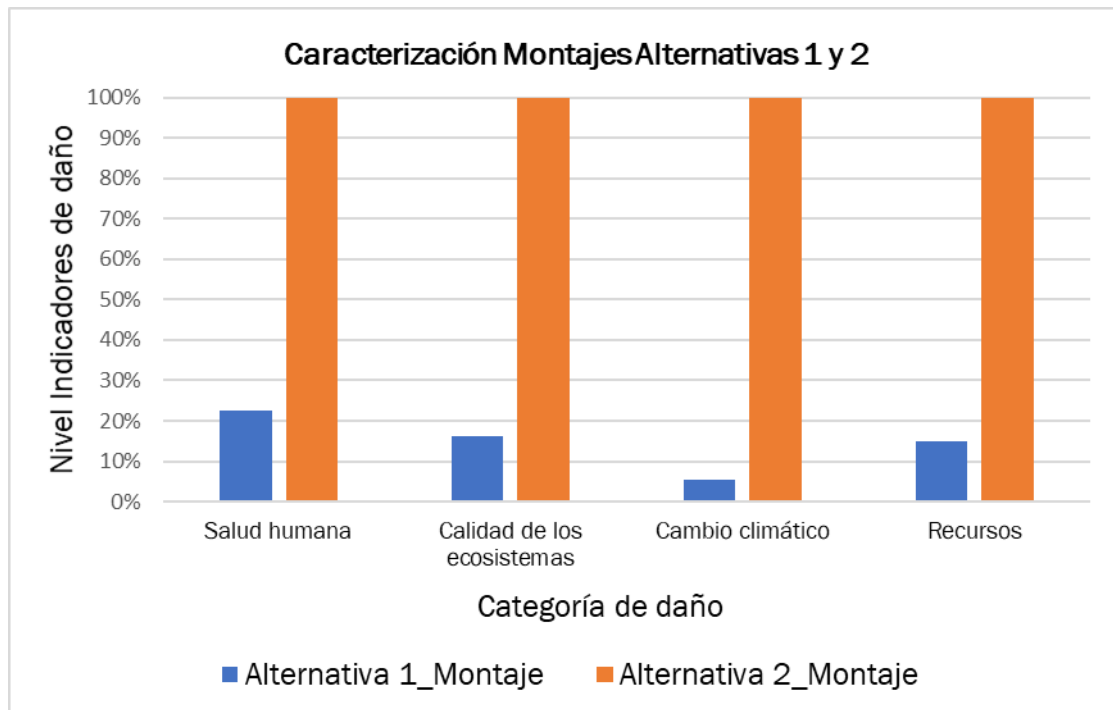


Gráfica 1. Caracterización de las categorías de impacto de las infraestructuras de las alternativas 1 y 2 (Anexo A.6.1).

Se observa en la Gráfica 1 que, para todas las categorías de impacto, la infraestructura de la alternativa 2 produce mayor impacto que la 1. Esto se debe a que el requerimiento de materiales, procesos y espacio es mucho mayor en la segunda alternativa. En la primera únicamente se requiere de balsas donde almacenar el purín, sin embargo, para llevar a cabo la alternativa 2 se necesita construir la planta de tratamiento y la biorrefinería.

Si las categorías de impacto de la Gráfica 1 se engloban en categorías de daño, se obtienen los resultados mostrados en la Gráfica 2. Se muestra, por tanto, en la Gráfica 2 la caracterización de las categorías de daño para las infraestructuras de las alternativas 1 y 2.

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.

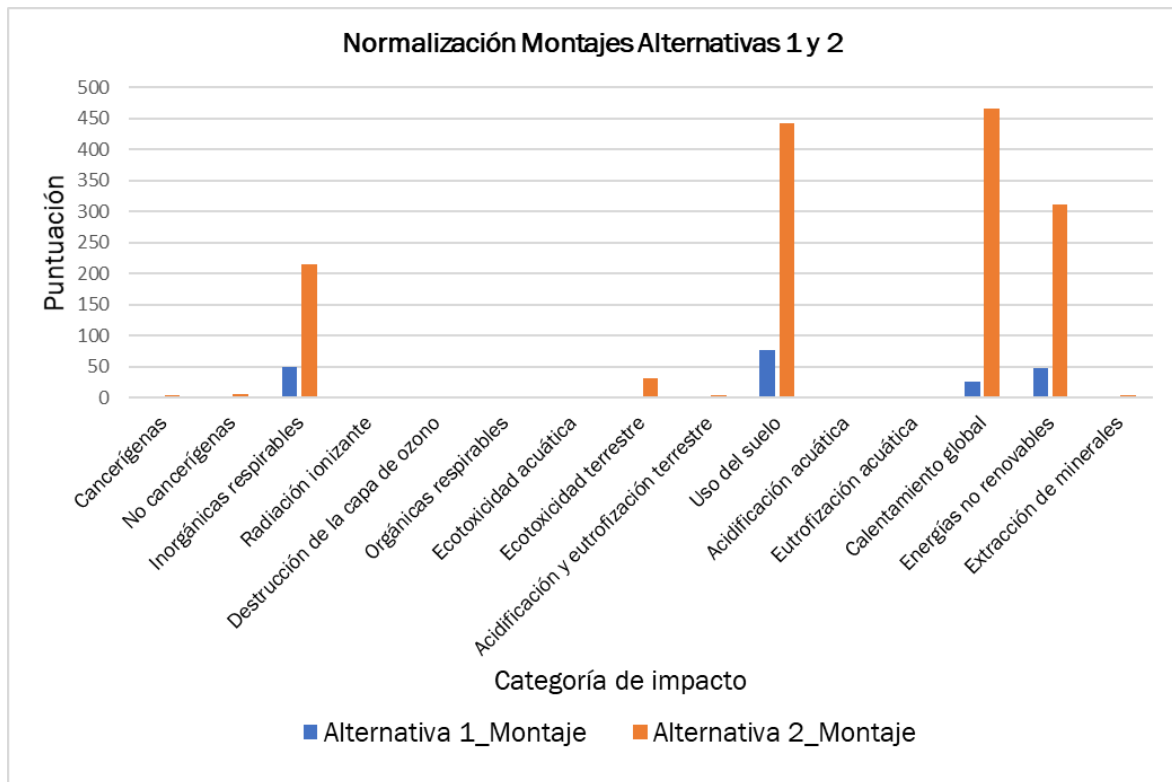


Gráfica 2. Caracterización de las categorías de daño de las infraestructuras de las alternativas 1 y 2 (Anexo A.6.1).

Como cabe esperar en vista a los resultados obtenidos en la Gráfica 1, en todas las categorías de daño resulta más perjudicial la infraestructura de la alternativa 1 que la 2. Esto se debe a lo descrito en la Gráfica 1.

Para conocer qué categorías de impacto son las más perjudiciales se normalizan los valores. Esta normalización se realiza comparando los valores obtenidos con los del resto de Europa. Para ello, se divide el impacto por unidad de emisión entre el impacto total de todas las sustancias de la categoría específica para la que existen factores de caracterización, por persona y por año (para Europa).

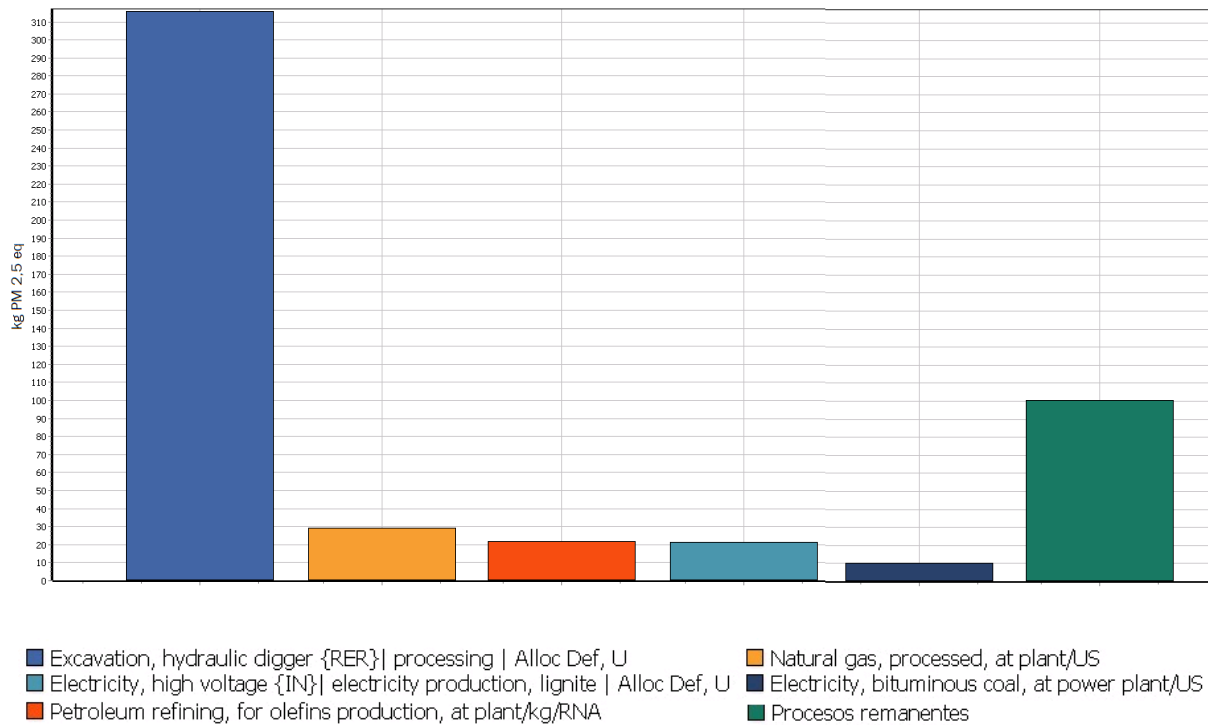
La Gráfica 3 muestra la normalización de las categorías de impacto para las infraestructuras de las alternativas 1 y 2.



Gráfica 3. Normalización de las categorías de impacto de las infraestructuras de las alternativas 1 y 2 (Anexo A.6.1).

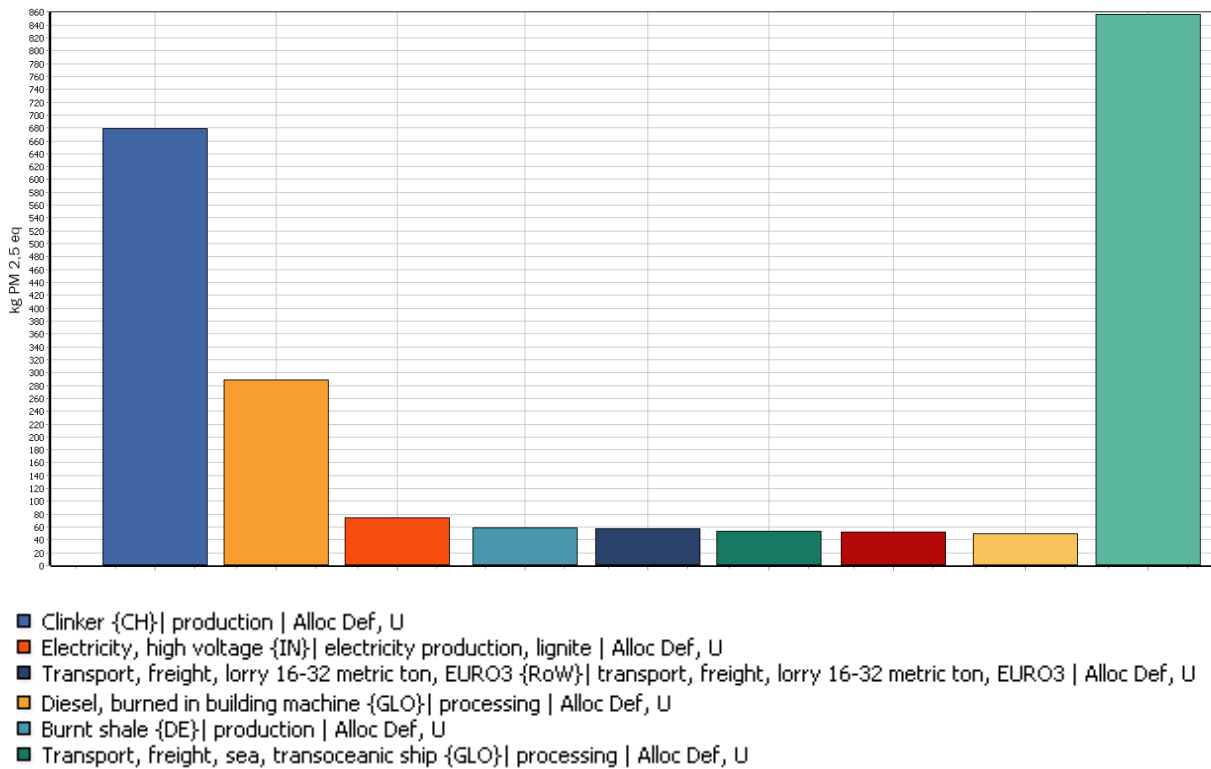
Se observa en la Gráfica 3 con la normalización que las categorías de impacto más significativas son las sustancias inorgánicas respirables, el uso del suelo, el calentamiento global y las energías no renovables.

Las sustancias inorgánicas respirables de la alternativa 1 se deben principalmente al impacto generado por la excavación de las balsas como se muestra en la Gráfica 4.



Gráfica 4. Contribución de los procesos en la categoría de sustancias inorgánicas respirables para la infraestructura de la alternativa 1.

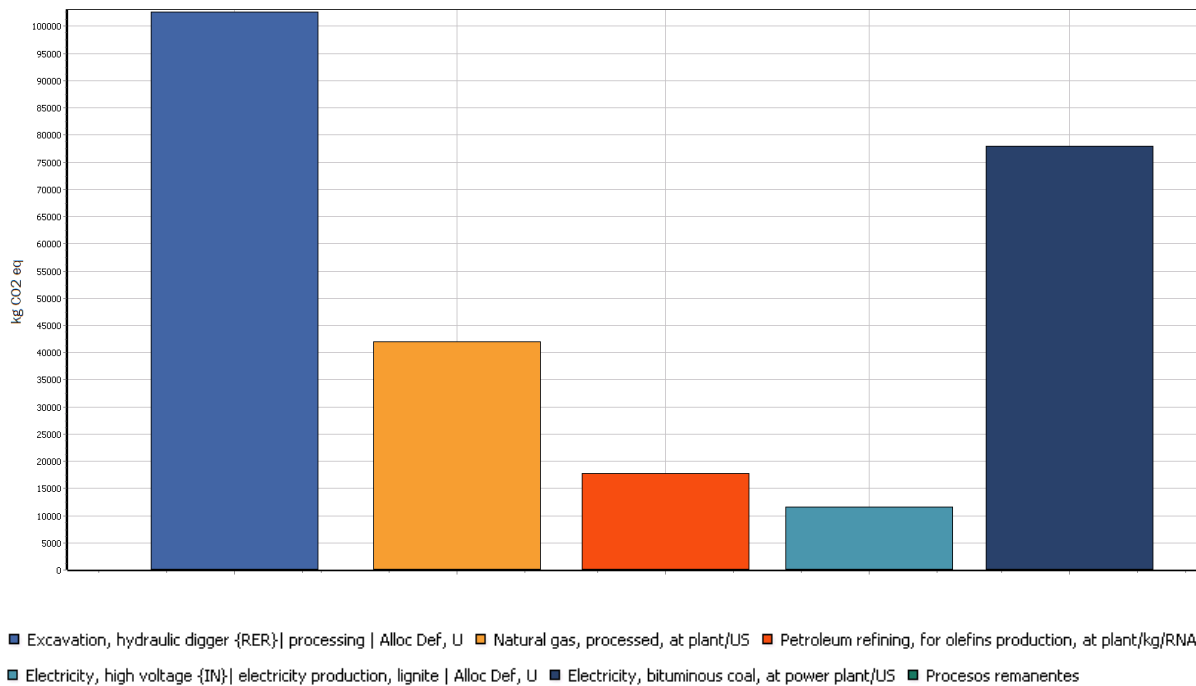
Las sustancias inorgánicas respirables de la alternativa 2 se deben principalmente a las emisiones a óxidos de nitrógeno que se producen durante la producción del Clinker. Este es el principal componente del cemento y, por lo tanto, del hormigón utilizado en los Raceway como se muestra en la Gráfica 5.



Gráfica 5. Contribución de los procesos en la categoría de sustancias inorgánicas respirables para la infraestructura de la alternativa 2.

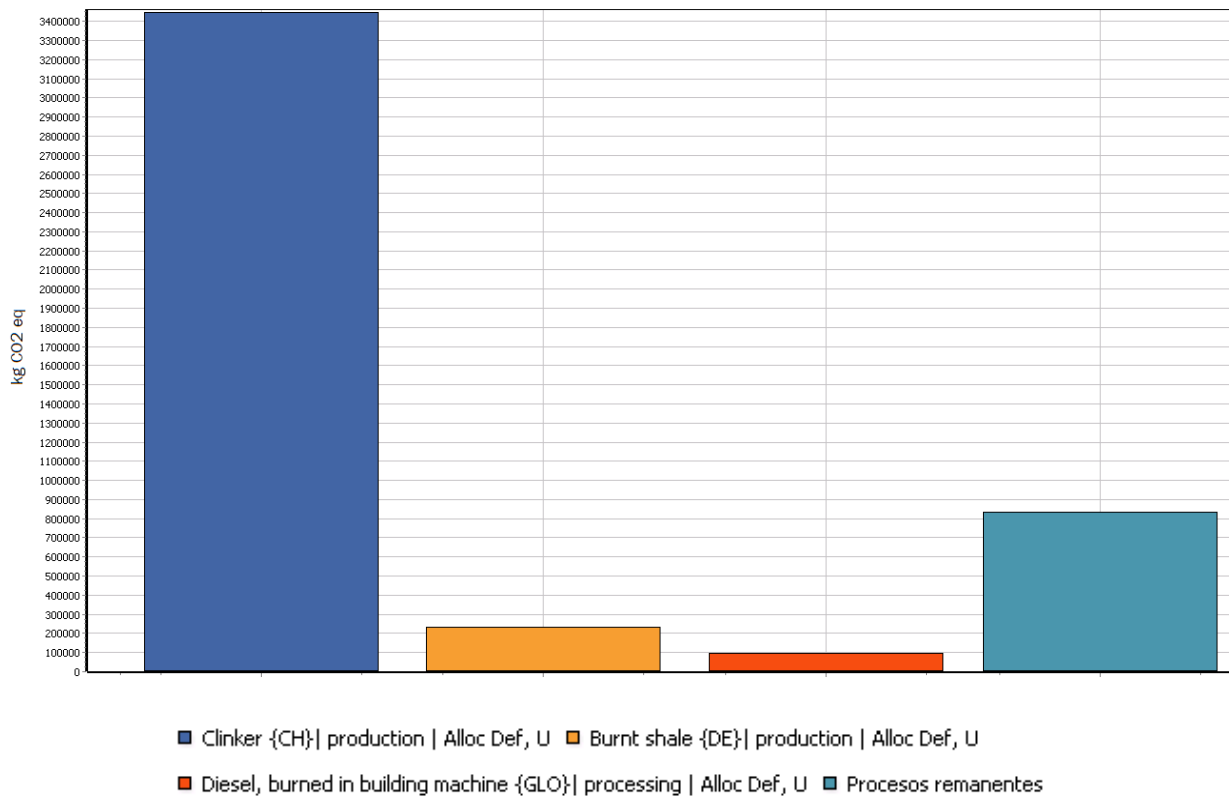
El resultado para el uso del suelo en la alternativa 2 se debe a la gran cantidad de terreno necesaria para la generación de biomasa algal a partir de purines en los canales Raceway.

El calentamiento global en la alternativa 1 es debido a las emisiones de dióxido de carbono que se producen durante la excavación de las balsas como se muestra en la Gráfica 6.



Gráfica 6. Contribución de los procesos en el calentamiento global para la infraestructura de la alternativa 1.

El calentamiento global en la alternativa 2 se asocia a las emisiones de dióxido de carbono que se producen durante la producción del Clinker de los canales Raceway como se observa en la Gráfica 7.



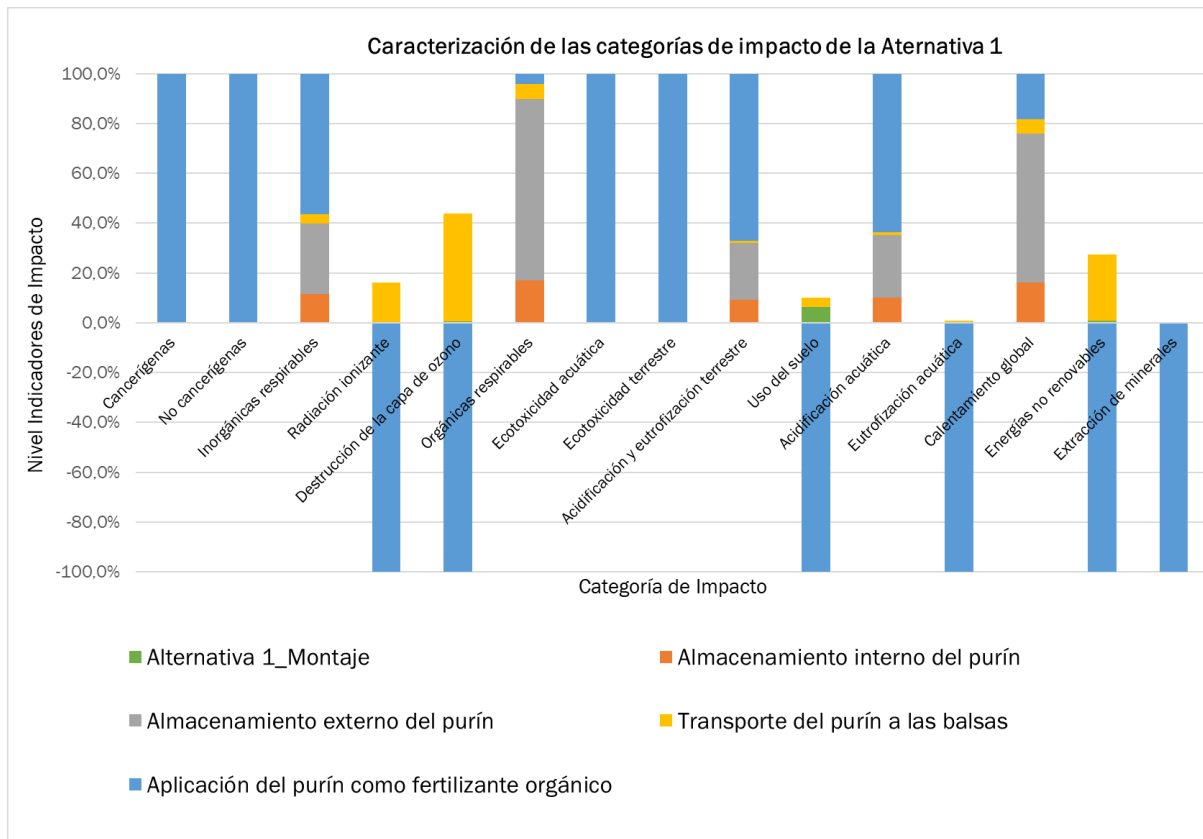
Gráfica 7. Contribución de los procesos en el calentamiento global para la infraestructura de la alternativa 2.

El resultado obtenido para la energía no renovable se debe al requerimiento de petróleo crudo para la construcción de los canales Raceway.

5.2 Análisis del Ciclo de Vida de la Alternativa 1

En este apartado se desarrollan los resultados obtenidos para el Análisis del Ciclo de Vida de la alternativa 1.

Se muestra en la Gráfica 8 la caracterización de las categorías de impacto para el ciclo de vida de la alternativa 1.



Gráfica 8. Caracterización del ciclo de vida de la alternativa 1 (Anexo A.6.2).

En primer lugar, si se observa la Gráfica 8 se ve que la etapa que produce un mayor impacto es la aplicación del purín como fertilizante orgánico. Esta etapa genera tantos impactos negativos (indicadores positivos en la gráfica) como positivos (indicadores negativos en la gráfica). Los impactos positivos se asocian a las cargas evitadas de la producción de fertilizantes sintéticos, en este caso DAP.

En segundo lugar, se evalúan las distintas categorías de impacto de la Gráfica 8 asociadas a la categoría de punto final daños a la salud humana.

Se comprueba que las sustancias cancerígenas y no cancerígenas son producidas por la aplicación de purín como fertilizante. Las sustancias cancerígenas se deben a la cantidad de arsénico que va al suelo en la lixiviación de metales pesados. Las sustancias no cancerígenas se deben también a la lixiviación de metales, principalmente del zinc, del arsénico y del cobre.

Con respecto a las sustancias inorgánicas respirables se observa que son debidas principalmente a la aplicación de purín como fertilizante. Esto obedece a que se emite

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



amoniaco a la atmósfera durante la fertilización. También las emisiones de esta categoría de impacto asociadas al almacenamiento externo del purín se deben a las emisiones de amoniaco durante el almacenamiento.

Se observa en la Gráfica 8 que tanto la radiación ionizante como la destrucción de la capa de ozono tienen impactos positivos. La radiación ionizante tiene un impacto ambiental positivo asociado a la cantidad de radio 226 y de carbono 14 evitados en la producción del fertilizante DAP. El impacto positivo de la destrucción de la capa de ozono se asocia a las emisiones de Halón 1211 (bromo-cloro-difluoro-metano) evitadas en la producción del fertilizante sintético. Los impactos negativos de estas categorías se deben al transporte de purín a las balsas. Para la radiación ionizante durante el transporte se producen emisiones de carbono 14. Para la destrucción de la capa de ozono durante el traslado se producen emisiones de Halón 1301 (trifluor-bromo-metano).

Para la categoría de impacto de sustancias orgánicas respirables se observa que la etapa que produce principalmente estas emisiones es el almacenamiento externo del purín. Esto se debe a la cantidad de CH_4 que se libera en las balsas durante los meses que se almacena el purín.

En tercer lugar, se evalúan las categorías de impacto de la Gráfica 8 asociadas a la categoría de daño a la calidad de los ecosistemas.

Las ecotoxicidades acuática y terrestre se producen por la aplicación del purín como fertilizante orgánico. La ecotoxicidad acuática se debe a la lixiviación de metales pesados a las aguas subterráneas, principalmente del cobre y del zinc. La ecotoxicidad terrestre se debe, también, a la lixiviación del zinc y del cobre, pero también del níquel y del cromo.

La acidificación y eutrofización terrestre se debe principalmente a la aplicación de purín como fertilizante. Esto se origina por las emisiones de amoniaco que se producen durante la fertilización. También las emisiones de esta categoría de impacto asociadas al almacenamiento externo del purín se deben a las emisiones de amoniaco durante el almacenamiento.

La ocupación de suelo tiene un impacto positivo asociado a la aplicación de purín como fertilizante orgánico. Esto se debe a que se ahorra el espacio de la producción del fertilizante DAP. Además, como cabía esperar el impacto negativo se debe a la utilización de las balsas para el almacenaje del purín.

La acidificación acuática, al igual que la terrestre, se debe a las emisiones de amoniaco que se producen durante la etapa de aplicación del purín como fertilizante orgánico. También, se producen emisiones de esta sustancia durante el almacenamiento del purín.

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.

La eutrofización acuática tiene un impacto positivo asociado a emisiones al agua de fosforo evitadas en la producción de DAP.

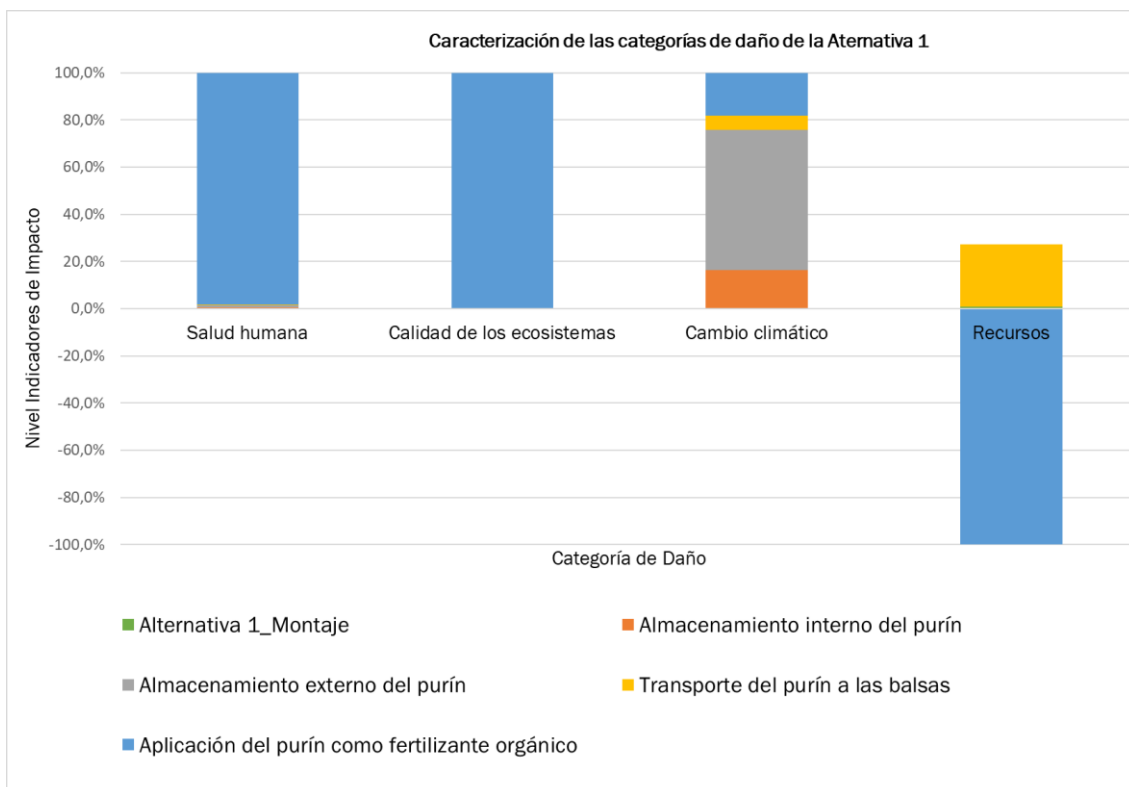
En cuarto lugar, se evalúa la categoría de cambio climático de la Gráfica 8.

Se observa que el calentamiento global es producido especialmente por el almacenamiento externo del purín. Esto se debe a las emisiones de metano y de óxido de nitrógeno que se producen durante esta etapa.

Por último, se evalúa la categoría de daño a los recursos de la Gráfica 8. Se evalúa la categoría de impacto de energías no renovables. El impacto negativo se debe al petróleo en crudo asociado al transporte del purín a las balsas municipales. El impacto positivo se debe al ahorro de gas natural utilizado en la producción de DAP.

La extracción de minerales tiene un impacto positivo debido a que se evita la utilización de cobre, zinc y plomo en la producción de DAP.

También es interesante conocer el resultado de las categorías de daño. Se muestra en la Gráfica 9 la caracterización de las categorías de daño para la alternativa 1.



Gráfica 9. Caracterización de las categorías de daño del ciclo de vida de la alternativa 1 (Anexo A.6.2).

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.

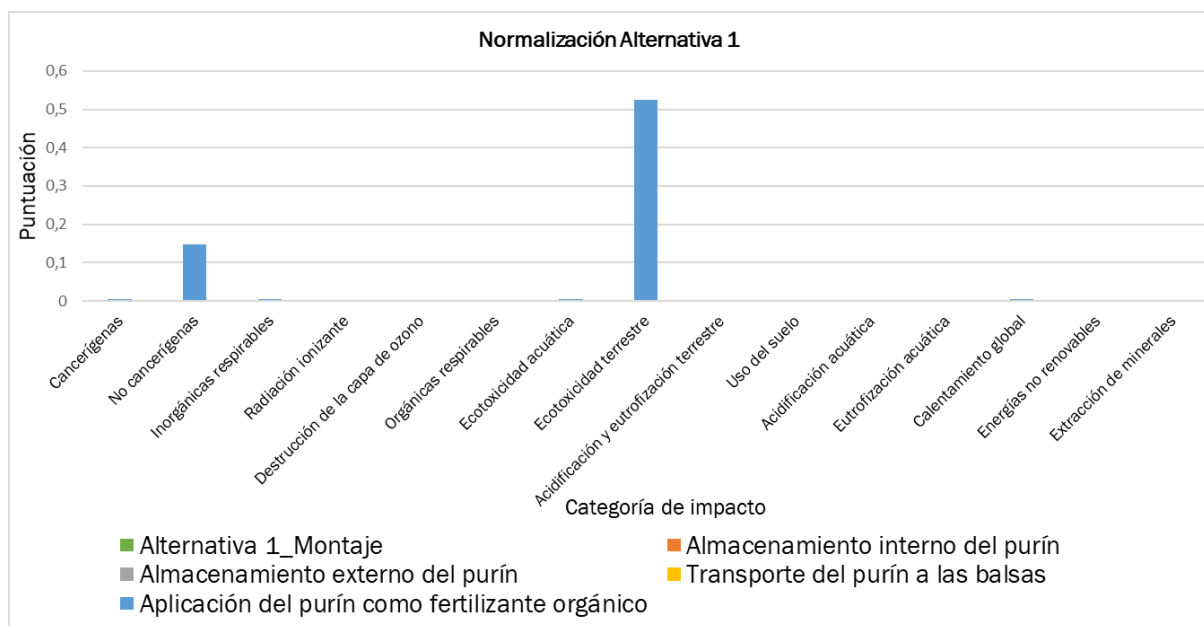
En primer lugar, se observa en la Gráfica 9 que los daños a la salud humana tienen un impacto negativo que se debe a la aplicación del purín como fertilizante orgánico. Esto se asocia principalmente a la lixiviación del zinc y el arsénico al suelo.

En segundo lugar, se observa en la Gráfica 9 que los daños a los ecosistemas tienen un impacto negativo que se debe a la aplicación del purín como fertilizante orgánico. Esto se vincula principalmente a la lixiviación del zinc y el cobre al suelo.

En tercer lugar, se deduce de la Gráfica 9 que la categoría de daño al cambio climático se produce esencialmente por el almacenamiento externo del purín en las balsas. Esto se debe a las emisiones de metano y de monóxido de dinitrógeno.

Por último, si se observa la Gráfica 9 se aprecia que la categoría de daño a los recursos tiene un impacto positivo gracias a la cantidad de fertilizante sintético DAP que se evita producir por la utilización de purín como fertilizante. Esto se debe principalmente al ahorro de gas natural al evitar la producción de DAP. El impacto negativo asociado al transporte obedece al petróleo en crudo necesario para llevar a cabo el traslado.

Se muestra en la Gráfica 10 la normalización de las categorías de impacto para el ciclo de vida de la alternativa 1.

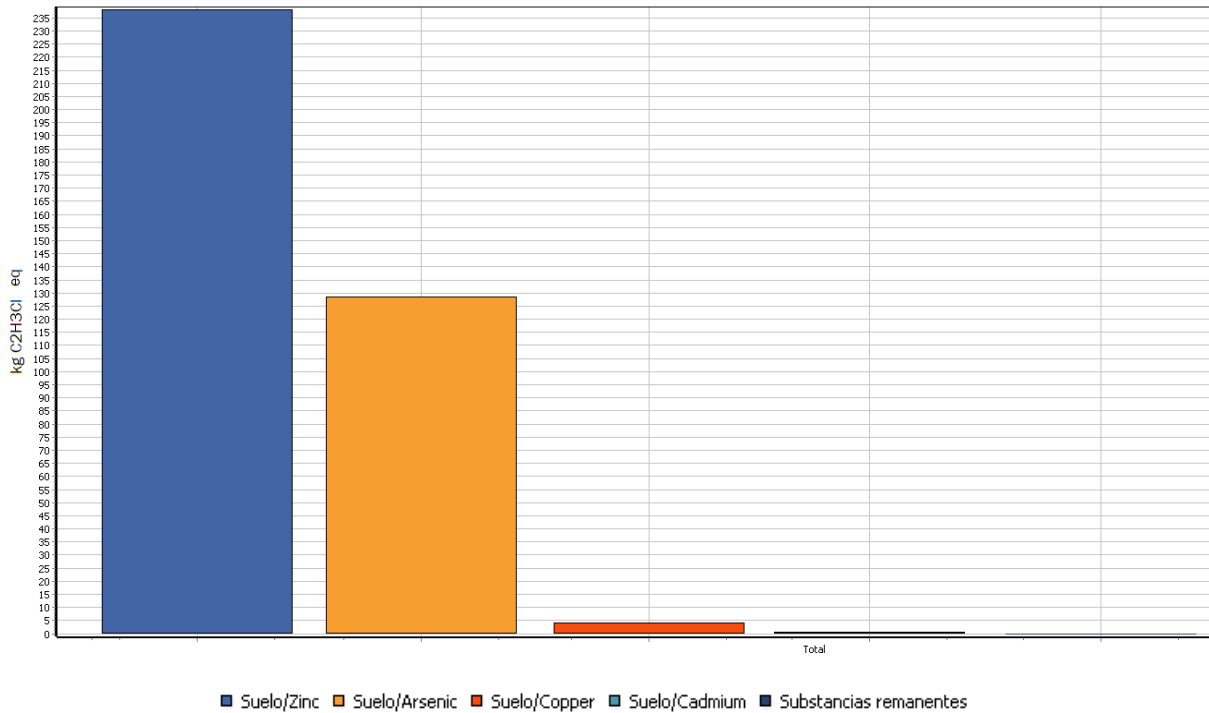


Gráfica 10. Normalización de las categorías de impacto del ciclo de vida de la alternativa 1 (Anexo A.6.2).

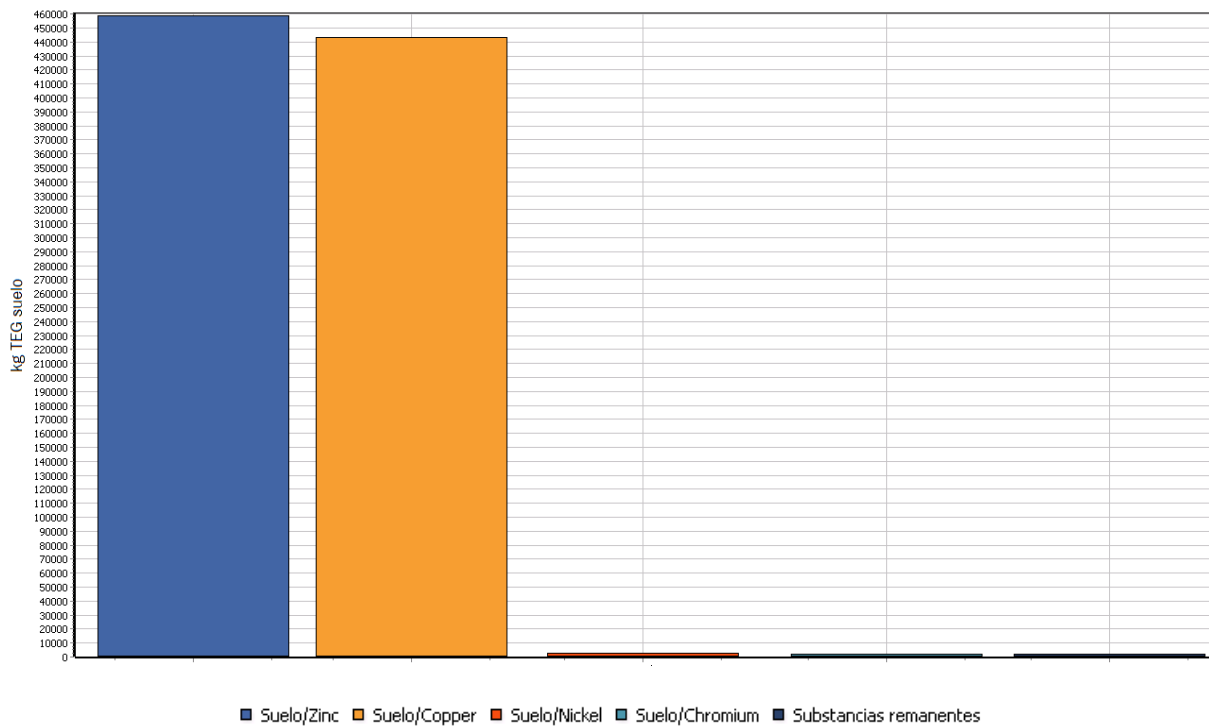
Se observa en la Gráfica 10 que las categorías que muestran mayor impacto tras la normalización son las sustancias no cancerígenas y la ecotoxicidad terrestre. Ambas se

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.

deben a la aplicación del purín como fertilizante orgánico. Asimismo, las dos se deben a la lixiviación de metales pesados principalmente del zinc, del cobre y del arsénico como se puede ver en las Gráfica 11 y Gráfica 12.



Gráfica 11. Contribución de los procesos en las sustancias no cancerígenas para la alternativa 1.

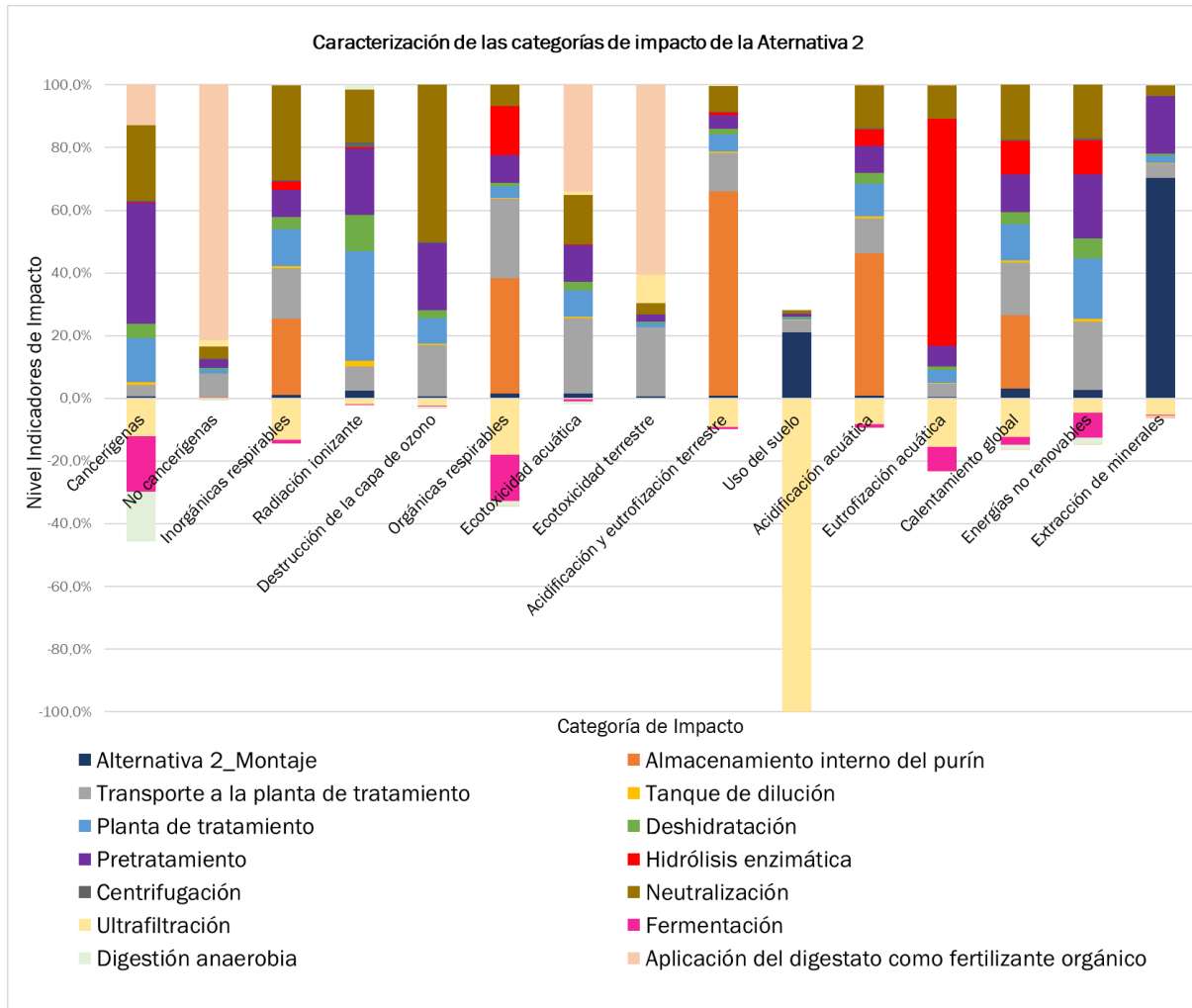


Gráfica 12. Contribución de los procesos en la ecotoxicidad terrestre para la alternativa 1.

5.3 Análisis del Ciclo de Vida de la Alternativa 2

En este apartado se desarrollan los resultados obtenidos para el Análisis del Ciclo de Vida de la alternativa 2.

Se muestra en la Gráfica 13 la caracterización de las categorías de impacto para el ciclo de vida de la alternativa 2.



Gráfica 13. Evaluación de impacto del ciclo de vida de la alternativa 2 (Anexo A.6.3).

En primer lugar, si se observa la Gráfica 13 se ve que las etapas que producen un mayor impacto negativo van variando en función de la categoría de impacto y que la etapa que produce un mayor impacto positivo es la ultrafiltración debido a que es en esta donde se obtienen las proteínas. Estas proteínas sustituyen a proteínas comerciales usadas en los piensos de los porcinos en crecimiento.

En segundo lugar, se evalúan las distintas categorías de impacto de la Gráfica 13 asociadas a la categoría de punto final daños a la salud humana.

Se comprueba que las sustancias cancerígenas se deben principalmente a la etapa de pretratamiento. Esto se debe a la utilización del agente químico HCl para romper la pared celular de las microalgas. La utilización de este implica la emisión de hidrocarburos aromáticos a la atmósfera.

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



Si se observan las emisiones de sustancias no cancerígenas se deduce que son producidas esencialmente por la aplicación del digestato como fertilizante. Las emisiones de esta etapa se deben a la lixiviación de metales pesados al suelo, principalmente el zinc, y el arsénico.

Con respecto a las sustancias inorgánicas respirables se observa que son debidas principalmente a la etapa de neutralización y al almacenamiento interno del purín. Esto se asocia a las partículas menores de 2,5 μm que se emiten durante la neutralización y al amoníaco y los óxidos de nitrógeno que se emiten en el almacenamiento interno del purín.

Si se observa la radiación ionizante tiene un impacto ambiental negativo asociado en su mayoría a la planta de tratamiento. Ello es debido a que durante esta etapa se producen emisiones de radón 222 y de carbono 14 asociadas a la generación de electricidad de medio voltaje.

La destrucción de la capa de ozono se produce principalmente en la etapa de neutralización. La neutralización genera destrucción de la capa de ozono debido al uso de NaOH como agente neutralizador. La fabricación de este implica la liberación de CFC (cloro-flúor-carbonos) a la atmósfera.

Para la categoría de impacto de sustancias orgánicas respirables se observa que la etapa que produce principalmente estas emisiones es el almacenamiento interno del purín en la granja. Su causa principal son las emisiones de metano que se generan.

En tercer lugar, se evalúan las categorías de impacto de la Gráfica 13 asociadas a la categoría de daño a la calidad de los ecosistemas.

La ecotoxicidad acuática se produce esencialmente por la aplicación del digestato como fertilizante orgánico. Esta se debe a la lixiviación de los metales pesados a las aguas subterráneas durante la fertilización.

La ecotoxicidad terrestre se produce, también, por la aplicación del digestato como fertilizante orgánico. Durante esta aplicación se produce la lixiviación a los suelos de metales pesados, entre los que destacan el zinc y el cobre.

La acidificación y eutrofización terrestre se produce principalmente por el almacenamiento interno del purín. Esto se debe a las emisiones de amoníaco que se producen durante el almacenamiento.

La ocupación de suelo tiene un impacto positivo asociado a la carga evitada de proteínas comerciales. Ello obedece a que se ahorra el espacio de la producción de proteínas para pienso porcino obtenidas a partir de cultivos extensivos de girasol o maíz. Además, como

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



cabía esperar, el impacto negativo se debe a la infraestructura necesaria para llevar a cabo esta alternativa.

La acidificación acuática, al igual que la terrestre, se debe a las emisiones de amoníaco. Se producen emisiones de esta sustancia durante el almacenamiento interno del purín.

La eutrofización acuática tiene un impacto negativo asociado a la hidrólisis enzimática, lo cual se debe a las emisiones de fosfato producidas por el uso de la celulasa.

En cuarto lugar, se evalúa la categoría de cambio climático de la Gráfica 13.

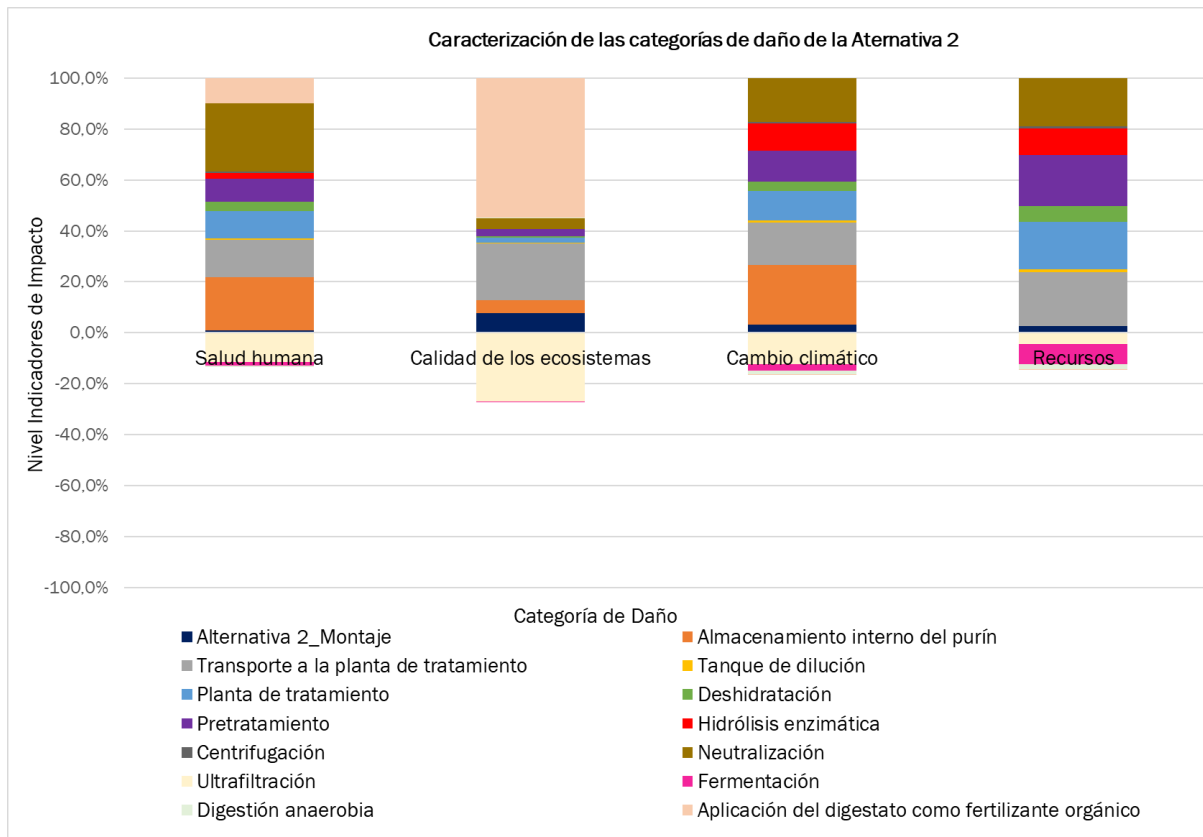
Se observa que el calentamiento global es producido principalmente por el almacenamiento interno del purín esto se asocia a las emisiones de metano que se generan. También, el transporte del purín a la planta genera calentamiento global debido a las emisiones de dióxido de carbono que se producen durante esta etapa. Además, se genera calentamiento en todas las etapas de la biorrefinería debido al uso de electricidad de medio voltaje.

Por último, evalúa la categoría de daño a los recursos de la Gráfica 13.

Al evaluar la categoría de impacto energías no renovables se aprecia que el impacto negativo se debe al petróleo en crudo asociado al transporte del purín la planta de tratamiento. Las etapas de la biorrefinería también generan un importante impacto negativo asociado al uranio y al gas natural necesario para producir la energía eléctrica que se requiere en ellas.

La extracción de minerales tiene un impacto negativo asociado a la infraestructura de la planta. Esto se debe a la cantidad de materiales necesarios para llevar a cabo la infraestructura.

También es interesante conocer el resultado de las categorías de daño para la alternativa 2. Se muestra en la Gráfica 14 la caracterización de las categorías de daño para la alternativa 2.



Gráfica 14. Caracterización de las categorías de daño de la alternativa 2 (Anexo A.6.3).

En primer lugar, se observa en la Gráfica 14 que los daños a la salud humana tienen un impacto negativo que se debe principalmente a la etapa de neutralización. La siguiente etapa que es más perjudicial para la salud humana es el almacenamiento interno del purín.

En segundo lugar, se ve en la Gráfica 14 que los daños a los ecosistemas tienen un impacto negativo que se debe a la aplicación del digestato como fertilizante orgánico.

En tercer lugar, se deduce de la Gráfica 14 que la categoría de daño al cambio climático se produce esencialmente por el almacenamiento interno del purín y por el uso de electricidad de medio voltaje en las etapas de la biorrefinería.

En cuarto lugar, si se observa la Gráfica 14 se ve que la categoría de daño a los recursos debe su impacto principalmente al transporte del purín a la planta de tratamiento. Esto se asocia a la cantidad de petróleo necesaria para el traslado. También, el daño es producido por el uso de energía eléctrica en las distintas etapas de la biorrefinería.

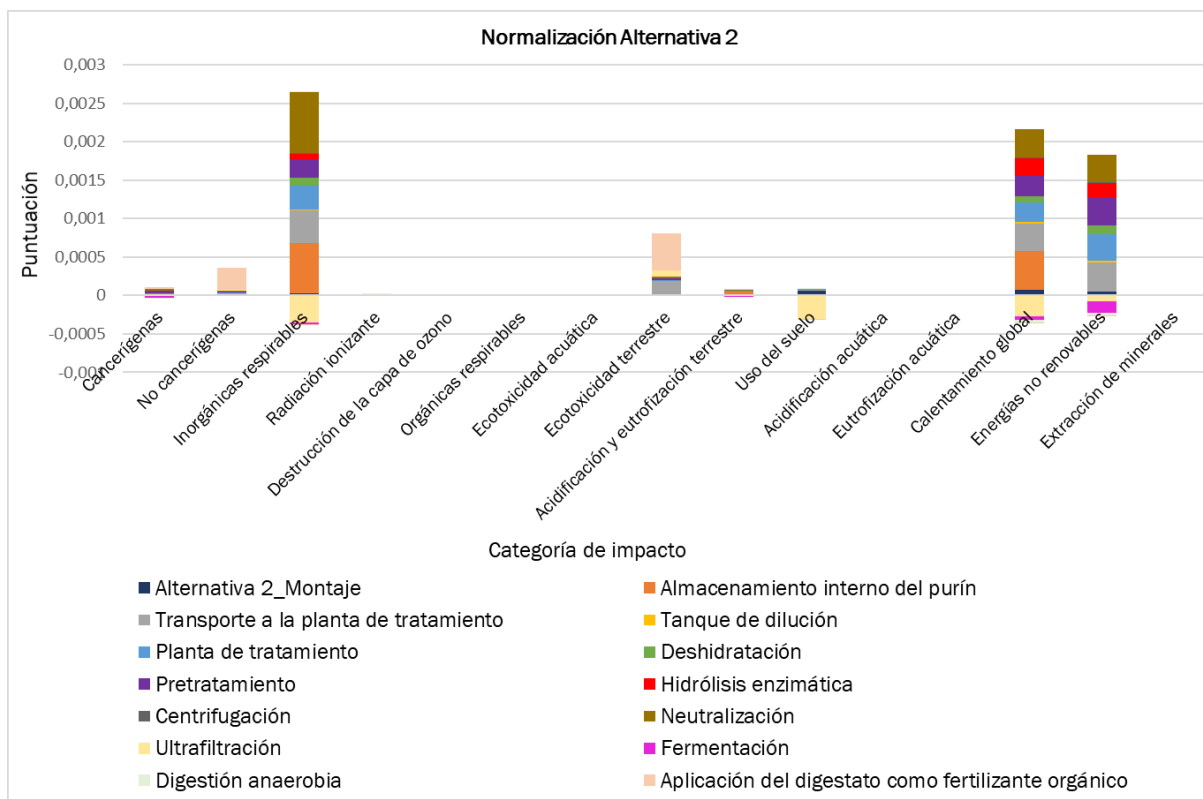
Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.

Por último, se observa que todas las categorías de daño también tienen un impacto positivo.

Para las categorías de daños a la salud humana, a la calidad de los ecosistemas y de cambio climático afecta esencialmente obtención de proteínas durante la ultrafiltración. La obtención de estas evita la producción de proteínas comerciales usadas en los piensos de porcinos en crecimiento. Por lo que respecta a la salud humana la carga evitada de producción de proteínas implica la reducción de partículas menores de 2,5 μm . Con respecto al daño a la calidad de los ecosistemas, fundamentalmente se debe el impacto negativo a la reducción de espacio para la obtención de proteínas. Para la categoría de cambio climático se debe el impacto positivo a la reducción de emisiones de dióxido de carbono asociadas a la obtención de proteínas comerciales para pienso porcino.

Para la categoría de daño a los recursos, el impacto positivo se debe a la obtención de bioetanol en la fermentación que puede usarse como biocombustible y evitar el consumo de combustibles fósiles.

Se muestra en la Gráfica 15 la normalización de las categorías de impacto del ciclo de vida para la alternativa 2.

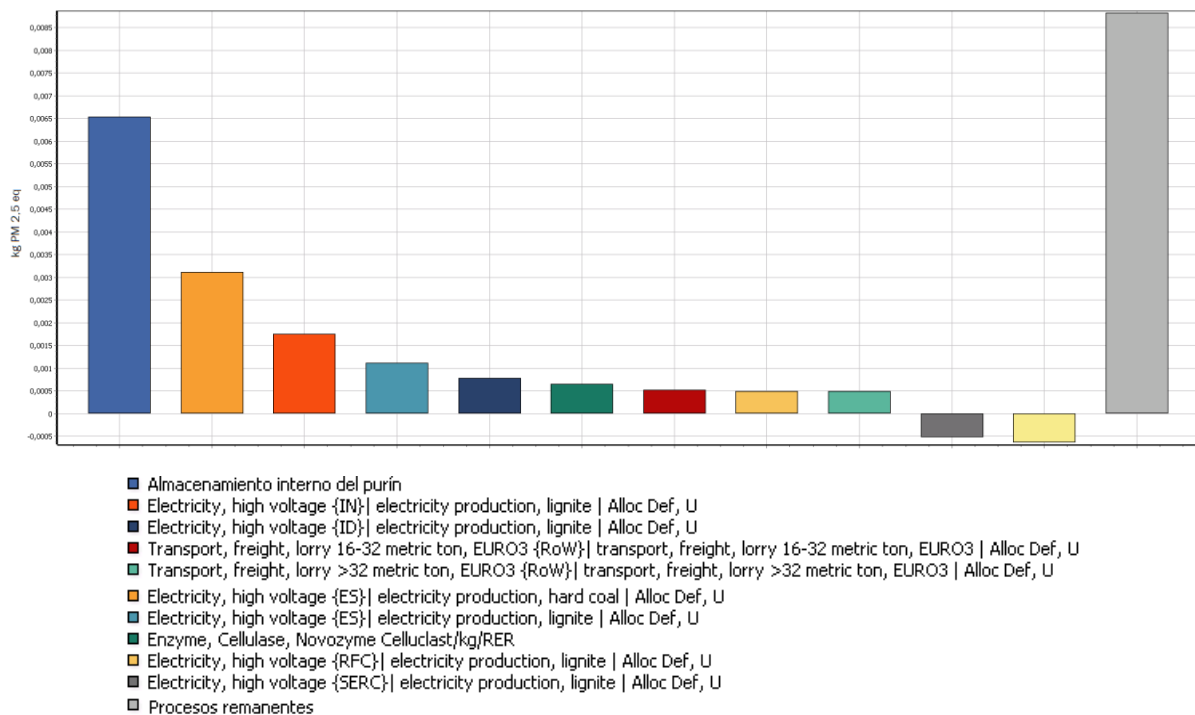


Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.

Gráfica 15. Normalización de las categorías de impacto del ciclo de vida de la alternativa 2 (Anexo A.6.3).

Si se observa la Gráfica 15 se deduce que las categorías de impacto que generan mayor impacto negativo son las sustancias inorgánicas respirables, ecotoxicidad terrestre, calentamiento global y energías no renovables.

Con respecto a las sustancias inorgánicas respirables se producen esencialmente durante la aplicación de digestato como fertilizante orgánico debido a la a la lixiviación de metales pesados principalmente del zinc, del cobre y del arsénico. También, la necesidad de electricidad en las distintas etapas de la biorrefinería también genera la emisión de estas sustancias como se muestra en la Gráfica 16.



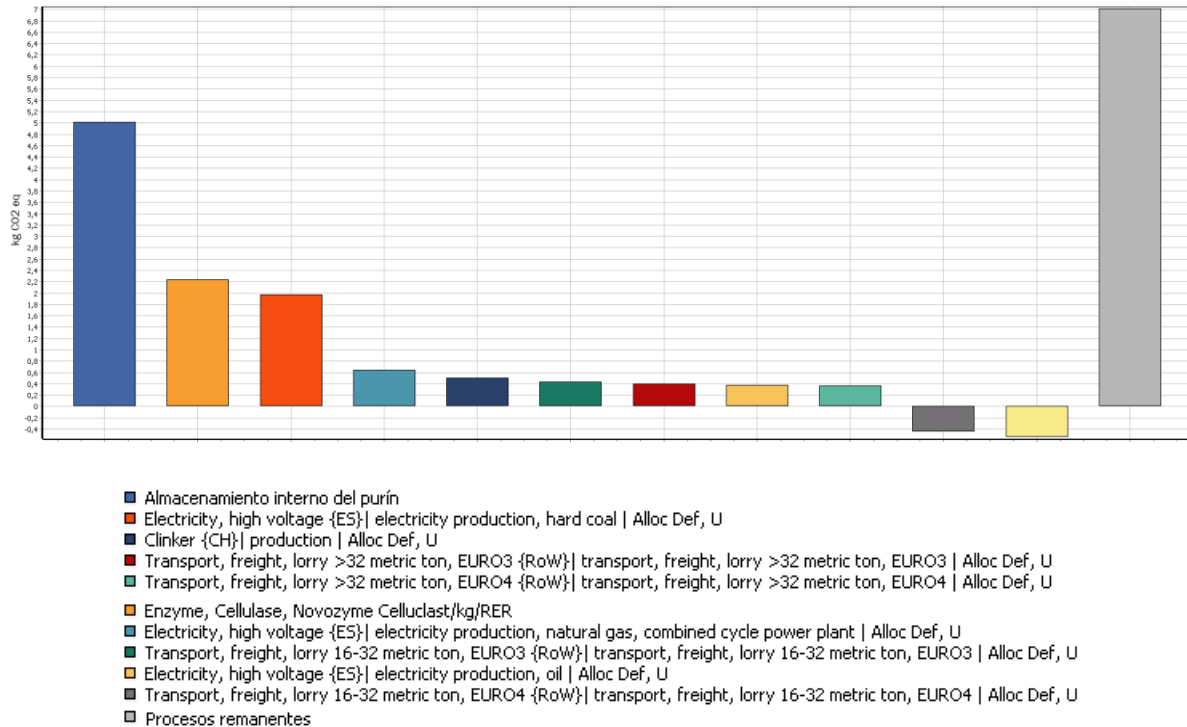
Gráfica 16. Contribución de los procesos en las sustancias inorgánicas respirables para la alternativa 2.

La ecotoxicidad terrestre se produce esencialmente por la aplicación del digestato como fertilizante orgánico debido a lo explicado con anterioridad.

Se observa que el calentamiento global es producido especialmente por el almacenamiento interno del purín, como ya se dijo con anterioridad. Asimismo, corresponde una parte de este calentamiento la generación de energía eléctrica necesaria para los procesos de biorrefinería. También, se genera calentamiento global en la

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.

alternativa 2 en la producción del Clinker necesario para la construcción de los Raceway. Todo esto se muestra en la Gráfica 17.



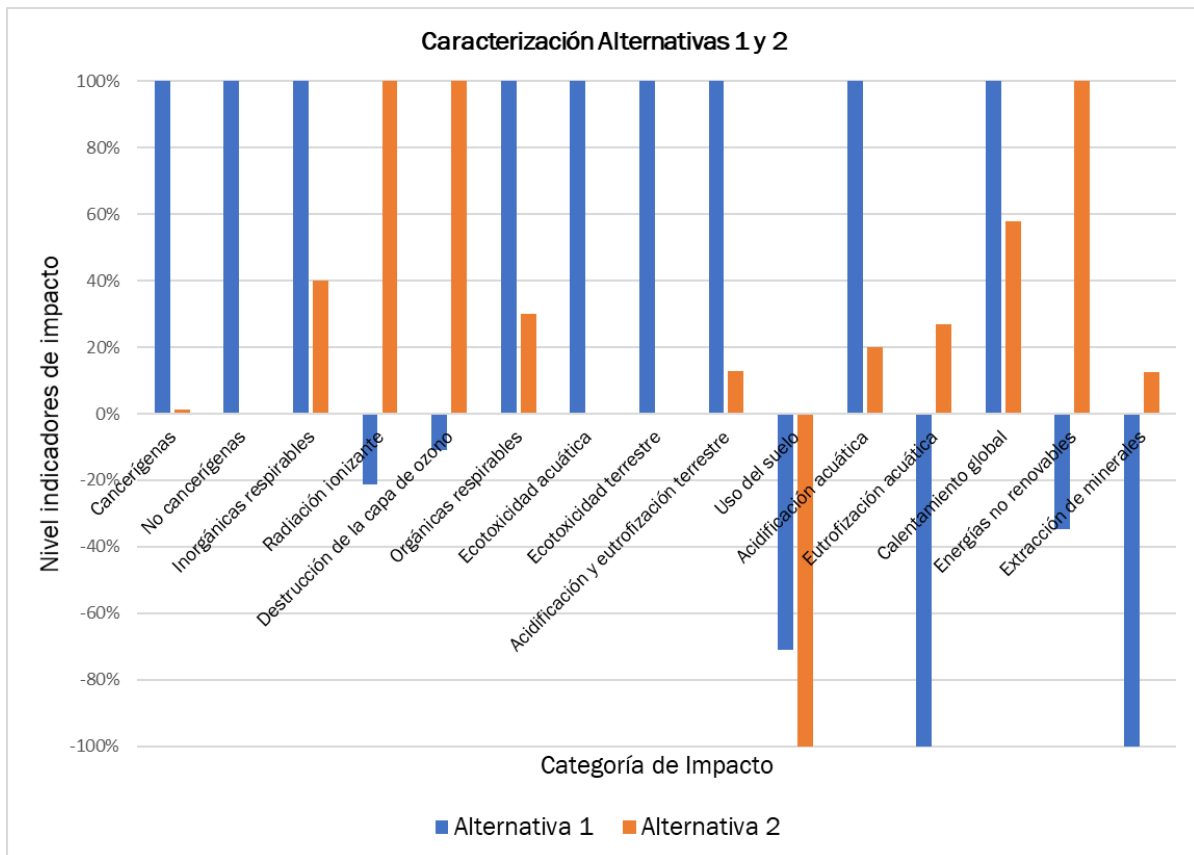
Gráfica 17. Contribución de los procesos en el calentamiento global para la alternativa 2.

La categoría de impacto de energías no renovables debe su impacto negativo al consumo de petróleo necesario en la etapa transporte del purín a la planta de tratamiento.

5.4 Comparación de los ciclos de vida de las alternativas 1 y 2

En este apartado se comparan los ciclos de vida de las dos alternativas para decidir cuál tiene mayor viabilidad ambiental.

Se muestra en la Gráfica 18 la EICV para las alternativas 1 y 2.



Gráfica 18. Caracterización de las categorías de impacto de las alternativas 1 y 2 (Anexo A.6.4).

En primer lugar, se observa en la Gráfica 18 que los principales impactos negativos están asociados a la alternativa 1.

En segundo lugar, se comparan las distintas categorías de impacto de la Gráfica 18 asociadas a la categoría de punto final daños a la salud humana. Se aprecia que las sustancias cancerígenas y no cancerígenas son mucho mayores en la alternativa 1. Las emisiones de estas sustancias están asociadas a la lixiviación de metales pesados durante la aplicación de purín como fertilizante.

Con respecto a las sustancias inorgánicas respirables se observa que también hay mayores emisiones en la alternativa 1. Esto se debe a la cantidad de amoníaco que se emite durante la fertilización.

Si se observa la radiación ionizante se ve que la alternativa que presenta un impacto negativo es la 2 debido a que se producen emisiones de radón 222 y de carbono 14 asociadas a la generación de electricidad de medio voltaje necesaria en esta alternativa.

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



La destrucción de la capa de ozono se produce exclusivamente en la alternativa 2. Esto se debe a la liberación de CFC a la atmósfera que se produce durante la neutralización y a las emisiones de Halón 1301 que se generan durante el transporte.

Para la categoría de impacto de sustancias orgánicas respirables se observa que la alternativa 1 es la que produce mayor cantidad de estas emisiones. Esto se debe a que se emite amoníaco a la atmósfera durante la fertilización.

En tercer lugar, se comparan las categorías de impacto de la Gráfica 18 asociadas a la categoría de daño a la calidad de los ecosistemas.

La ecotoxicidad acuática se produce por la alternativa 1. Esta es debida a la lixiviación de metales pesados, principalmente el cobre y el zinc, a las aguas subterráneas.

La ecotoxicidad terrestre se produce por la alternativa 1. Esto se debe, también, a la lixiviación del zinc y del cobre.

La acidificación y eutrofización terrestre que se produce por la alternativa 1 es mucho mayor que por la alternativa 2. Ello obedece principalmente a las emisiones de amoníaco que se producen durante la fertilización.

La ocupación de suelo tiene un impacto positivo en ambas alternativas. Pero es mayor en la alternativa 2. Esto es debido a que se ahorra el espacio de la producción de proteínas para pienso porcino obtenidas en cultivos extensivos de girasol o maíz.

La acidificación acuática, al igual que la terrestre, se produce en mayor medida en la alternativa 1. Esto se debe a las emisiones de amoníaco que se originan durante la etapa de aplicación del purín como fertilizante orgánico.

La eutrofización acuática debe su impacto negativo a la alternativa 2. En concreto a las emisiones de fosfato producidas por el uso de la celulasa en la hidrólisis enzimática.

En cuarto lugar, se evalúa la categoría de cambio climático de la Gráfica 18.

Se observa que el calentamiento global es parecido en ambas etapas, pero es mayor el producido en la alternativa 1. Esto se debe a las emisiones de metano y de óxido de nitrógeno que se producen durante el almacenamiento en las balsas.

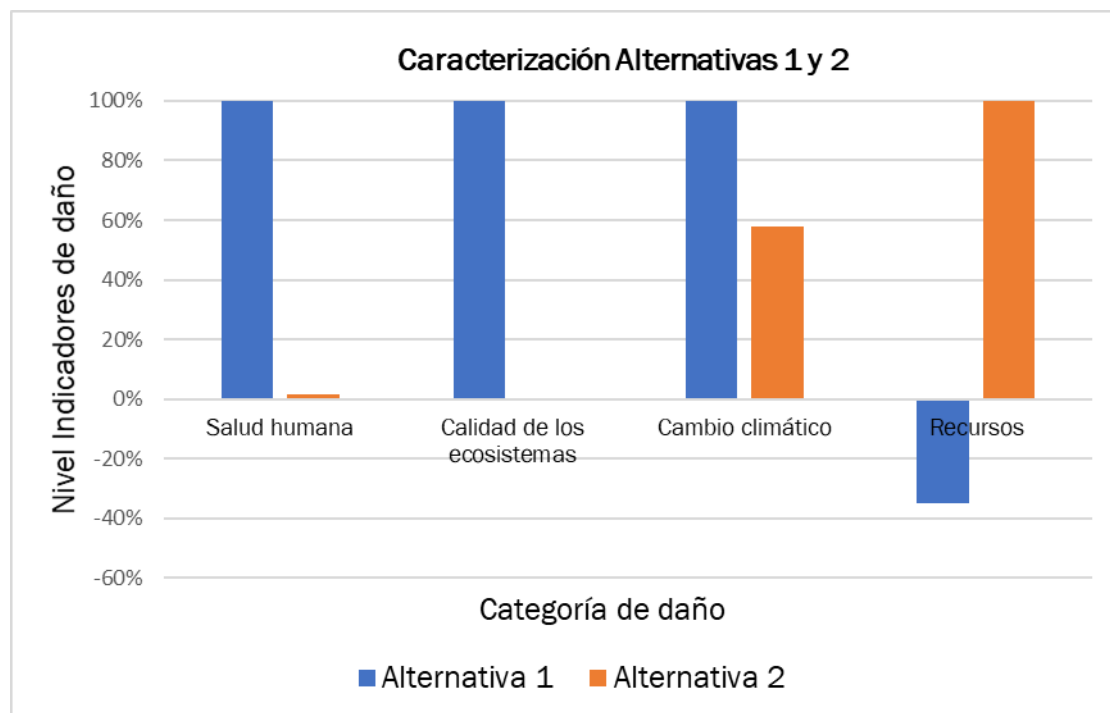
Por último, se evalúa la categoría de daño a los recursos de la Gráfica 18.

Se evalúa la categoría de impacto energías no renovables. El impacto negativo se debe a la alternativa 2, en concreto al petróleo en crudo asociado al transporte del purín la planta de tratamiento.

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.

La extracción de minerales tiene un impacto negativo en la alternativa 2 asociado a la infraestructura de la planta. Esto se debe a la cantidad de materiales necesarios para llevar a cabo la infraestructura.

Es interesante conocer el resultado de las categorías de daño debido a que las emisiones de las categorías de impacto no son todas debidas a la misma alternativa. Se muestra en la Gráfica 19 la caracterización de las categorías de daño para las alternativas 1 y 2.



Gráfica 19. EICV de las categorías de daño de las alternativas 1 y 2 (Anexo A.6.4).

Se comparan las categorías de daño para ambas alternativas.

En primer lugar, se observa en la Gráfica 19 que los daños a la salud humana causados por la alternativa 1 son mucho mayores que por la alternativa 2. Este impacto negativo se debe fundamentalmente a la aplicación del purín como fertilizante orgánico.

En segundo lugar, se ve en la Gráfica 19 que los daños a los ecosistemas tienen un impacto negativo mucho mayor en la alternativa 1. Esto se debe a la lixiviación del zinc y el cobre al suelo durante la fertilización de cultivos con el purín.

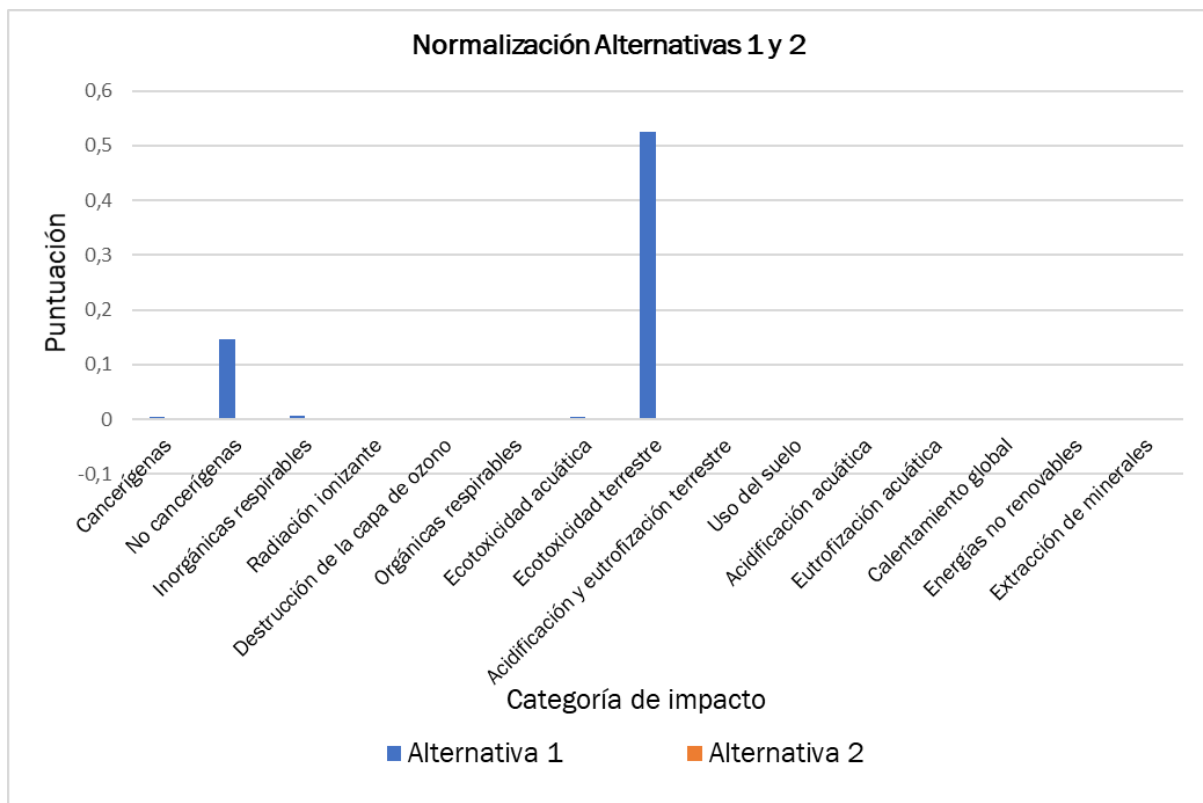
En tercer lugar, se deduce de la Gráfica 19 que el efecto del cambio climático es algo mayor para la alternativa 1 que para la 2. Esto se debe a las emisiones de metano y de óxido de nitrógeno que se producen por el almacenamiento de purín en las balsas.

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.

En cuarto lugar, si se observa la Gráfica 19 se ve que la categoría de daño a los recursos tiene un impacto negativo para la alternativa 2 y un impacto positivo para la alternativa 1. El impacto negativo de la alternativa 2 es debido a que los recursos necesarios para llevar a cabo la alternativa 2 son mucho mayores al tratarse de una alternativa bastante más compleja que requiere de grandes cantidades de energía. El impacto positivo de la alternativa 1 se debe principalmente al ahorro de gas natural al evitar la producción de DAP.

En resumen, la alternativa 2 presenta mejores resultados, que la alternativa 1, en 3 de las 4 categorías de daño. Esto implica que la alternativa 2 tiene una mayor viabilidad ambiental; por lo tanto, se cumple con el objetivo principal de este trabajo.

Para asegurar la viabilidad ambiental de la alternativa 2 se normalizan los datos de ambas alternativas con el fin de conocer qué categorías producen mayor impacto. Se muestra en la Gráfica 20 la normalización de las categorías de impacto para las alternativas 1 y 2.



Gráfica 20. EICV normalizado de las alternativas 1 y 2 (Anexo A.6.4).

Se observa que las categorías de impacto que obtienen mayor puntuación son las sustancias no cancerígenas y la ecotoxicidad terrestre. En ambos casos los impactos se

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



asocian a la alternativa 1. Esto quiere decir que la alternativa 1 causa un mayor impacto ambiental, demostrándose así que la alternativa 2 tiene mayor viabilidad ambiental y cumpliéndose con el objetivo del trabajo.



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas,
para su valorización en biorrefinería.



CAPÍTULO 6:

CONCLUSIONES

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



6. Conclusiones

En este apartado se sintetizan las principales conclusiones obtenidas en el trabajo, cuyo objetivo ha sido demostrar la viabilidad ambiental mediante el análisis del ciclo de vida del tratamiento de purín porcino con microalgas para su posterior valorización en biorrefinería.

Para demostrar la viabilidad ambiental se ha planteado una primera alternativa consistente en la utilización del purín como fertilizante orgánico. Esta se ha comparado con la segunda alternativa que consiste en el tratamiento de purín en un fotobiorreactor de canal abierto para obtener biomasa algal y someter esta última a las etapas de la biorrefinería propuesta para adquirir productos de alto valor añadido.

Las etapas necesarias para llevar a cabo la primera alternativa son el almacenamiento interno del purín, el traslado de este desde las granjas a las balsas, el almacenamiento externo del mismo y la aplicación del purín como fertilizante orgánico.

Para la segunda alternativa las etapas utilizadas son el almacenamiento interno del purín, el traslado de este a la planta de cultivo, la disolución de este, el cultivo de la biomasa algal en un fotobiorreactor de canal abierto, la deshidratación de la biomasa, el pretratamiento para romper la pared celular, la hidrólisis enzimática, la centrifugación, la neutralización de la fracción líquida, la ultrafiltración, la fermentación y la digestión anaerobia de la fracción sólida.

Con la realización del presente trabajo fin de máster, se ha podido concluir que:

- 1) con la primera alternativa se consigue como producto un biofertilizante natural, el purín, que puede sustituir a un fertilizante sintético como el DAP. Con la segunda alternativa se obtienen bioetanol de la etapa de fermentación, proteínas para pienso porcino de la etapa de ultrafiltración, biogás y digestato de la etapa de digestión anaerobia.
- 2) con ayuda del software Simapro se ha comprobado que la alternativa 2 tiene una infraestructura que produce mayor impacto ambiental que la alternativa 1. Esto se debe a que en la primera alternativa únicamente se requiere de balsas para el almacenamiento de purín. Por el contrario, para la alternativa 2 se necesita de la construcción de los canales abiertos y de la biorrefinería.
- 3) con la realización del ACV y el uso del método de evaluación de impacto IMPACT 2002+, las causas de los daños a la salud humana y a los ecosistemas de la Alternativa 1 se producen principalmente por la aplicación del purín como fertilizante orgánico, debido a la lixiviación del zinc y el arsénico al suelo durante el proceso. El daño al cambio

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



climático se produce esencialmente por el almacenamiento externo del purín en las balsas. El daño a los recursos tiene un impacto positivo (beneficio) gracias a la cantidad de fertilizante sintético DAP que se evita producir por la utilización de purín como fertilizante.

- 4) con la realización del ACV y el uso del método de evaluación de impacto IMPACT 2002+, los daños a la salud humana de la Alternativa 2 tienen un impacto negativo que se debe principalmente al proceso de neutralización con HCl. Los daños a los ecosistemas producidos en esta alternativa tienen un impacto negativo debido al transporte del purín y a la aplicación del digestato como fertilizante orgánico. El daño al cambio climático se produce esencialmente por el almacenamiento del purín y el uso de energía eléctrica en la biorrefinería. La categoría de daño a los recursos debe su impacto principalmente al transporte del purín a la planta de tratamiento.
- 5) se han comparado en el trabajo los resultados ambientales de ambas alternativas, resultando que la alternativa 2 tiene un mejor comportamiento ambiental en las categorías de daño a salud humana, daño a la calidad de los ecosistemas y cambio climático. De esta forma se demuestra la viabilidad ambiental de la segunda alternativa, aun cuando en la categoría de recursos se obtienen peores resultados debido a que para llevar a cabo esta alternativa se requiere de un mayor número de materiales y de energía.



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas,
para su valorización en biorrefinería.



BIBLIOGRAFÍA

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas,
para su valorización en biorrefinería.



Bibliografía

- Acién FG, Molina E, Reis A, Torzillo G, Zittelli GC, Sepúlveda C, Masojídek J. 2017. Photobioreactors for the production of microalgae. In: . *Microalgae-Based Biofuels Bioprod. From Feed. Cultiv. to End-Products*. Elsevier Inc., pp. 1–44.
- Acién FG, Fernández JM, Molina-Grima E. 2014. Biofuels from Algae. In: Pandey, A, Lee, DJ, Chisti, Y, Soccol, CR, editors., pp. 313–325. <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-termico/biogas>.
- AENOR. 2006a. UNE-EN ISO 14040:2006 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de... <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0038060>.
- AENOR. 2006b. UNE-EN ISO 14044:2006 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de... <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0038059>.
- AENOR. 2010. UNE-EN ISO 14050:2010 Gestión ambiental. Vocabulario. (ISO 140... <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0046055>.
- Alfa Laval. 2020. Alfa Laval ALDEC G3 range of decanter centrifuges.
- Alonso-Moreno C, García-Yuste S. 2016. Environmental potential of the use of CO₂ from alcoholic fermentation processes. The CO₂-AFP strategy. *Sci. Total Environ.* 568:319–326.
- Alvira P, Tomás-Pejó E, Ballesteros M, Negro MJ. 2010. Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review. *Bioresour. Technol.* 101:4851–4861.
- American American Society of Mechanical Engineers. 2019. ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section VIII Division 2 Alternative Rules. ASME.
- American Petroleum Institute. 2016. API 650 EN ESPANOL pdf.
- ASAE. 2005. ASAE D384.2 MAR2005 Manure Production and Characteristics American Society of Agricultural Engineers.
- Benemann J. 2013. Microalgae for biofuels and animal feeds. *Energies*. MDPI AG.
- van den Berg GB, Rácz IG, Smolders CA. 1989. Mass transfer coefficients in cross-flow ultrafiltration. *J. Memb. Sci.* 47:25–51.
- BOCYL. 2018. Decreto 4/2018, de 22 de febrero, por el que se determinan las condiciones ambientales mínimas para las actividades o instalaciones ganaderas de Castilla y León, se modifica el Anexo III del Texto Refundido de la Ley de Prevención Ambiental de Castilla y. http://noticias.juridicas.com/base_datos/CCAA/615551-d-4-2018-de-22-feb-ca-castilla-y-leon-condiciones-ambientales-minimas-para.html.
- BOE. 1996. BOE.es - Documento BOE-A-1996-5618. <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1996-5618>.

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



- BOE. 2000. Real Decreto 324/2000, de 3 de marzo, por el que se establecen normas básicas de ordenación de las explotaciones porcinas. http://noticias.juridicas.com/base_datos/Admin/rd324-2000.html#a1.
- Bolado-Rodríguez S, Toquero C, Martín-Juárez J, Travaini R, García-Encina PA. 2016. Effect of thermal, acid, alkaline and alkaline-peroxide pretreatments on the biochemical methane potential and kinetics of the anaerobic digestion of wheat straw and sugarcane bagasse. *Bioresour. Technol.* 201:182–190. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852415015801>.
- Brown MR. 1991. The amino-acid and sugar composition of 16 species of microalgae used in mariculture. *J. Exp. Mar. Bio. Ecol.* 145:79–99.
- Cheryan M, Cheryan M. 1998. Ultrafiltration and microfiltration handbook. Technomic Pub. Co 527 p.
- Choi H II, Hwang SW, Sim SJ. 2019. Comprehensive approach to improving life-cycle CO2 reduction efficiency of microalgal biorefineries: A review. *Bioresour. Technol.* Elsevier Ltd.
- Collet P, Hélias Arnaud A, Lardon L, Ras M, Goy RA, Steyer JP. 2011. Life-cycle assessment of microalgae culture coupled to biogas production. *Bioresour. Technol.* 102:207–214.
- Corbala-Robles L, Sastafiana WND, Van linden V, Volcke EIP, Schaubroeck T. 2018. Life cycle assessment of biological pig manure treatment versus direct land application – a trade-off story. *Resour. Conserv. Recycl.* 131:86–98.
- D’Alessandro EB, Antoniosi Filho NR. 2016. Concepts and studies on lipid and pigments of microalgae: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* Elsevier Ltd.
- Dong H, Mangino J, McAllister TA. 2006. Emisiones resultantes de la gestión del ganado y del estiércol.
- El-Dalatony MM, Salama ES, Kurade MB, Kim KY, Govindwar SP, Kim JR, Kwon EE, Min B, Jang M, Oh SE, Chang SW, Jeon BH. 2019. Whole conversion of microalgal biomass into biofuels through successive high-throughput fermentation. *Chem. Eng. J.* 360:797–805.
- elaplas. 2020. Propiedades físicas polisulfona (PSU). <http://www.elaplas.es/wp-content/uploads/Ficha-técnica-Polisulfona-PSU.pdf>.
- González AM. 2016. Cultivos de microalgas a gran escala: Sistemas de Producción.
- Grupo Manni. 2019. Prontuario pesos teóricos.
- Günerken E, D’Hondt E, Eppink MHM, Garcia-Gonzalez L, Elst K, Wijffels RH. 2015. Cell disruption for microalgae biorefineries. *Biotechnol. Adv.* Elsevier Inc.

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



- Hidrostal. 2020. Hidrostal Pumps. <http://www.hidrostalpumps.com/>.
- Honglay Chen P, Oswald WJ. 1998. THERMOCHEMICAL TREATMENT FOR ALGAL FERMENTATION. *Pergamon Environ. Int.* 24:889–897. https://ac.els-cdn.com/S0160412098000804/1-s2.0-S0160412098000804-main.pdf?_tid=32e5adc6-4c60-49a4-a7a6-5606c9c75665&acdnat=1528898933_222b2222e56442c4fecbdf0521304a67.
- Hossain N, Zaini J, Indra Mahlia TM. 2019. Life cycle assessment, energy balance and sensitivity analysis of bioethanol production from microalgae in a tropical country. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 115:109371.
- Huntley ME, Johnson ZI, Brown SL, Sills DL, Gerber L, Archibald I, Machesky SC, Granados J, Beal C, Greene CH. 2015a. Demonstrated large-scale production of marine microalgae for fuels and feed. *Algal Res.* 10:249–265.
- Huntley ME, Johnson ZI, Brown SL, Sills DL, Gerber L, Archibald I, Machesky SC, Granados J, Beal C, Greene CH. 2015b. Corrigendum to “Demonstrated large-scale production of marine microalgae for fuels and feed” [*Algal Res.* 10 (July 2015) 249-265] DOI: 10.1016/j.algal.2015.04.016. *Algal Res.* Elsevier.
- IDAE. 2013. Biogás. <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-termico/biogas>.
- IDAE. 2020. Ahorro y Eficiencia Energética en Climatización- Guía técnica. Condiciones climáticas exteriores de proyecto.
- Instituto Nacional de Estadística. 2009. Censo Agrario 2009.
- Jolliet O, Margni M, Charles R, Humbert S, Payet J, Rebitzer G, Rosenbaum R. 2003. IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. *Int. J. Life Cycle Assess.* Springer Verlag. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02978505>.
- Junta de Castilla y León. 2019. Explotaciones ganaderas de porcino | Datos Abiertos | Junta de Castilla y León. https://datosabiertos.jcyl.es/web/jcyl/set/es/medio-rural-pesca/ganaderia_porcino_2017/1284707659296.
- Kadam KL. 2002. Environmental implications of power generation via coal-microalgae cofiring. *Energy* 27:905–922.
- Klein C de, Novoa RSA, Ogle S, Rochette P. 2006. Capítulo 11: Emisiones de N₂O de los suelos gestionados y emisiones de CO₂ derivadas de la aplicación de cal y urea.
- Kumar A, Ergas S, Yuan X, Sahu A, Zhang Q, Dewulf J, Malcata FX, van Langenhove H. 2010. Enhanced CO₂ fixation and biofuel production via microalgae: Recent developments and future directions. *Trends Biotechnol.*
- Lo YM, Cao D, Argin-Soysal S, Wang J, Hahm TS. 2005. Recovery of protein from poultry processing wastewater using membrane ultrafiltration. *Bioresour. Technol.* 96:687–

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



698.

- Lorenzo-Hernando A, Ruiz-Vegas J, Vega-Alegre M, Bolado-Rodríguez S. 2019. Recovery of proteins from biomass grown in pig manure microalgae-based treatment plants by alkaline hydrolysis and acidic precipitation. *Bioresour. Technol.* 273:599–607.
- Ludington D. 2018. Calculating the Heating Value of Biogas.
- Makut BB, Das D, Goswami G. 2019. Production of microbial biomass feedstock via co-cultivation of microalgae-bacteria consortium coupled with effective wastewater treatment: A sustainable approach. *Algal Res.* 37:228–239.
- Martín-Juárez J, Markou G, Muylaert K, Lorenzo-Hernando A, Bolado S. 2017. Breakthroughs in bioalcohol production from microalgae: Solving the hurdles. In: . *Microalgae-Based Biofuels Bioprod. From Feed. Cultiv. to End-Products*. Elsevier Inc., pp. 183–207.
- Martín-Juárez J, Vega-Alegre M, Riol-Pastor E, Muñoz-Torre R, Bolado-Rodríguez S. 2019. Optimisation of the production of fermentable monosaccharides from algal biomass grown in photobioreactors treating wastewater. *Bioresour. Technol.* 281:239–249.
- Martín Juárez J, Riol Pastor E, Fernández Sevilla JM, Muñoz Torre R, García-Encina PA, Bolado Rodríguez S. 2018. Effect of pretreatments on biogas production from microalgae biomass grown in pig manure treatment plants. *Bioresour. Technol.* 257:30–38.
- Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. 2019. Encuestas Ganaderas - Ganado Porcino. https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/resultados_provisionales_may2019_porcino_webmapaxlsx_tcm30-514026.pdf.
- Nemecek T. 2013. SALCA Swiss Agricultural Life Cycle Assessment. <http://www.agroscope.ch>.
- NOVATEC. 2019. Agitadores mecánicos sistemas y equipos para el manejo, control, dosificación y agitación de fluidos. www.novatecfs.com.
- Puralga. 2017. Puralga · Micro Solutions for Macro Problems. <https://puralga.weebly.com/>.
- Quijano G, Arcila JS, Buitrón G. 2017. Microalgal-bacterial aggregates: Applications and perspectives for wastewater treatment. *Biotechnol. Adv.* Elsevier Inc.
- Roy RN, Misra RV, Lesschen JP, Smaling EMA. 2003. Assessment of soil nutrient balance. <http://www.fao.org/3/y5066e/y5066e00.htm>.
- Santamaría-Fernández M, Lübeck M. 2020. Production of leaf protein concentrates in green biorefineries as alternative feed for monogastric animals. *Anim. Feed Sci. Technol.*:114605. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0377840120305095>.

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



- Sills DL, Van Doren LG, Beal C, Raynor E. 2020. The effect of functional unit and co-product handling methods on life cycle assessment of an algal biorefinery. *Algal Res.* 46:101770.
- Spolaore P, Joannis-Cassan C, Duran E, Isambert A. 2006. Commercial applications of microalgae. *J. Biosci. Bioeng.* 101:87–96.
- Ulbig P, Hoburg D. 2002. Determination of the calorific value of natural gas by different methods. In: . *Thermochim. Acta.* Elsevier, Vol. 382, pp. 27–35.
- Voloshin RA, Rodionova M V., Zharmukhamedov SK, Nejat Veziroglu T, Allakhverdiev SI. 2016. Review: Biofuel production from plant and algal biomass. *Int. J. Hydrogen Energy.* Elsevier Ltd.
- De Vries JW, Groenestein CM, De Boer IJM. 2012. Environmental consequences of processing manure to produce mineral fertilizer and bio-energy. *J. Environ. Manage.* 102:173–183.
- Wankat P. 2017. Ingeniería de procesos de separación 2ª. <https://es.slideshare.net/yudaryeugenio/wankat-p-ingenieria-de-procesos-de-separacion-2ed>.
- Wu W, Cheng LC, Chang JS. 2020. Environmental life cycle comparisons of pig farming integrated with anaerobic digestion and algae-based wastewater treatment. *J. Environ. Manage.* 264:110512.



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

ANEXOS

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas,
para su valorización en biorrefinería.

Anexos

A.1 Cantidad de purines a tratar

En este apartado se dimensiona la cantidad de purines que se van a utilizar en este estudio. Para ello, se seleccionan los municipios de los cuales se va a utilizar el purín. Como ya se ha citado con anterioridad la zona seleccionada es Cuéllar debido a que es el municipio con más censo porcino de toda Castilla y León.

Para cada municipio de la zona de Cuéllar se muestran en la Tabla 65 los datos del número de cerdos (Junta de Castilla y León, 2019), los metros cúbicos de purín que se generan al año, la distancia a Cuéllar y su dirección respecto a Cuéllar.

Los metros cúbicos se han calculado considerando que del censo de animales en cebo el 30% son cerdos de entre 20 y 50 kg y que el 70% superan los 50 kg. Estos porcentajes han sido calculados a partir de los datos reportados por las Encuestas Ganaderas (Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación, 2019). Se sabe que la cantidad de metros cúbicos de estiércol que generan las hembras con lechones es de 6,12 m³/año, los cerdos de entre 20 kg y 50 kg generan 1,80 m³/año y los cerdos de entre 50 kg y 100 kg generan 2,50 m³/año (Real Decreto 324, 2000).

Tabla 65. Número de porcinos en la zona de Cuéllar.

MUNICIPIO	CENSO DE CERDAS REPRODUCTORAS	CENSO DE ANIMALES EN CEBO	m ³ /año	km a Cuéllar	Punto Cardinal
ABADES	963	6809	21486,2	66	S
ADRADOS	0	718	1644,2	20	E
AGUILAFUENTE	1245	13884	39413,8	32	SE
ALDEANUEVA DEL CODONAL	415	12	2567,3	45	SO
ALDEA REAL	1778	5945	24495,4	36	SE
ANAYA	319	825	3841,5	60	S
ARMUÑA	689	7220	20750,5	50	S
BERCIAL	24	0	146,9	80	S
BERNARDOS	13	4626	10673,1	44	S
CANTIMPALOS	834	9344	26501,8	47	S
CARBONERO EL MAYOR	2005	28571	77698,2	34	S

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



Tabla 65. (Continuación)

MUNICIPIO	CENSO DE CERDAS REPRODUCTORAS	CENSO DE ANIMALES EN CEBO	m ³ /año	km a Cuéllar	Punto Cardinal
COCA	2851	4090	26814,2	35	SO
CODORNIZ	217	434	2321,9	50	SO
CUELLAR	13840	70799	246830,5	0	-
CHAÑE	2802	7289	33840,1	14	SO
DOMINGO GARCIA	0	2070	4740,3	44	S
DONHIERRO	0	11778	26971,6	55	SO
ESCALONA DEL PRADO	1540	13780	40981,0	44	SE
ESCARABAJOSA DE CABEZAS	1484	3968	18168,8	42	S
ESCOBAR DE POLENDOS	890	2846	11964,1	50	S
FRESNEDA DE CUELLAR	0	3303	7563,9	17	SO
FRUMALES	141	768	2621,6	12	O
FUENTE EL OLMO DE ISCAR	0	3000	6870,0	23	SO
FUENTEPELAYO	1811	23002	63757,9	32	S
GARCILLAN	0	4450	10190,5	59	S
GOMEZSERRACIN	1385	6738	23906,2	15	S
HONTALBILLA	378	6727	17718,2	18	O
JUARROS DE RIOMOROS	315	1700	5820,8	66	S
JUARROS DE VOLTOYA	232	0	1419,8	55	S
LASTRAS DE CUELLAR	414	2553	8380,1	24	SO

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.

Tabla 65. (Continuación)

MUNICIPIO	CENSO DE CERDAS REPRODUCTORAS	CENSO DE ANIMALES EN CEBO	m ³ /año	km a Cuéllar	Punto Cardinal
LASTRAS DEL POZO	0	2400	5496,0	77	S
MARTIN MIGUEL	681	2608	10140,0	65	S
MARTIN MUÑOZ DE LA DEHESA	24	0	146,9	55	SO
MARTIN MUÑOZ DE LAS POSADAS	304	4608	12412,8	62	SO
MARUGAN	30	1002	2478,2	80	S
MATA DE CUELLAR	250	3179	8809,9	18	O
MELQUE DE CERCOS	0	750	1717,5	50	SO
MIGUELAÑEZ	730	3001	11339,9	44	S
MONTEJO DE AREVALO	0	15317	35075,9	54	SO
MOZONCILLO	2641	10463	40123,2	56	S
MUÑOVEROS	640	5427	16344,6	47	NO
NAVA DE LA ASUNCION	4190	4151	35148,6	34	SO
NAVALMANZANO	2114	10331	36595,7	25	S
NAVAS DE ORO	3521	10656	45950,8	27	SO
NIEVA	2733	8635	36500,1	49	S
OLOMBRADA	505	9711	25328,8	14	E
ORTIGOSA DE PESTAÑO	460	1200	5563,2	47	S
PINAREJOS	1542	3613	17710,8	17	S
PINARNEGRILLO	450	7877	20792,3	36	S
RAPARIEGOS	24	0	146,9	50	SO

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.

Tabla 65. (Continuación)

MUNICIPIO	CENSO DE CERDAS REPRODUCTORAS	CENSO DE ANIMALES EN CEBO	m ³ /año	km a Cuéllar	Punto Cardinal
RODA DE ERESMA	0	1550	3549,5	47	S
SAMBOAL	2393	18289	56527,0	19	SO
SAN CRISTOBAL DE CUELLAR	104	380	1506,7	16	O
SAN CRISTOBAL DE LA VEGA	186	2150	6061,8	48	SO
SANCHONUÑO	45	6160	14381,8	10	S
SANGARCIA	6	4158	9558,5	70	S
SAN MARTIN Y MUDRIAN	691	8910	24632,8	25	S
SANTA MARIA LA REAL DE NIEVA	1465	17280	48537,0	45	SO
SANTIUSTE DE SAN JUAN BAUTISTA	916	10234	29041,8	40	SO
SAUQUILLO DE CABEZAS	494	6270	17381,6	38	SE
TABANERA LA LUENGA	1725	7746	28295,3	38	S
TOLOCIRIO	0	2654	6077,7	50	SO
TUREGANO	4829	17861	70455,2	44	SE
VALVERDE DEL MAJANO	1493	2300	14404,2	61	S
VALLELADO	3580	19562	66706,6	14	O
VEGANZONES	2757	3950	25918,3	48	SE
VILLAVERDE DE ISCAR	12	1364	3197,0	27	SO
YANGUAS DE ERESMA	1145	3795	15698,0	45	S

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



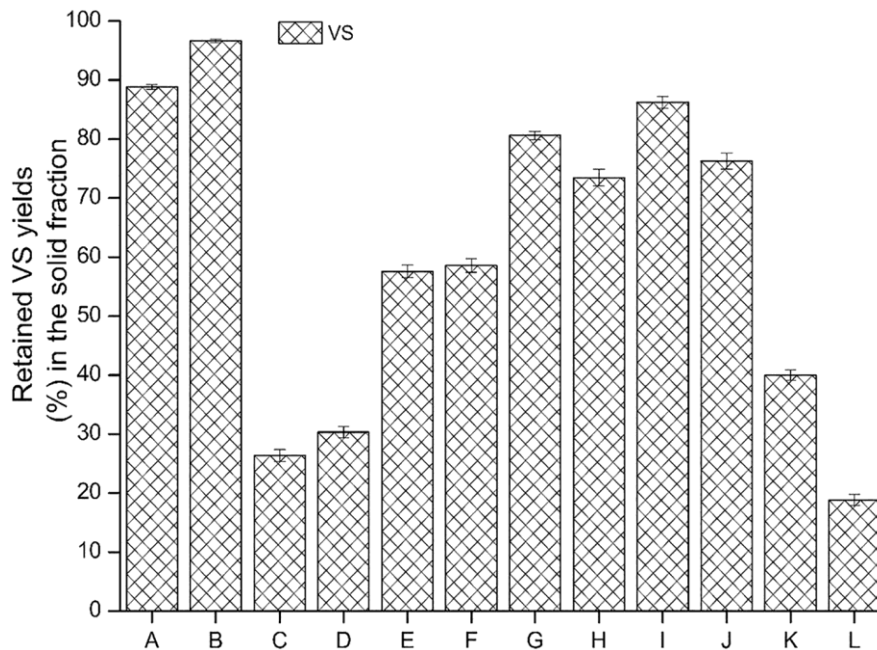
Tabla 65. (Continuación)

MUNICIPIO	CENSO DE CERDAS REPRODUCTORAS	CENSO DE ANIMALES EN CEBO	m ³ /año	km a Cuéllar	Punto Cardinal
ZARZUELA DEL PINAR	243	3285	9009,8	24	SO
MARAZOLEJA	610	0	3733,2	70	S

Dentro de la Tabla 65 se seleccionan los municipios que tienen un volumen de purines por encima de 20000 m³ y se encuentran a 15 km o menos de Cuéllar. Los municipios seleccionados son, por tanto, Cuéllar, Olombrada y Valledado. Los municipios escogidos tienen en total 17925 cerdas reproductoras y 100072 lo cual implica 338866 m³ de purín al año según lo calculado en el balance de materia anexo A.3.1.

A.2 Elección pretratamiento e hidrólisis enzimática

En este apartado se escoge el mejor tratamiento a llevar a cabo. Para ello se busca el mejor pretratamiento que se puede llevar a cabo. En la Gráfica 21, se observa el porcentaje de sólidos volátiles que quedan retenidos en la fracción sólida tras el pretratamiento sin tener en cuenta la hidrólisis enzimática.



Gráfica 21. Porcentaje de sólidos volátiles retenidos en las fracciones sólidas con respecto al contenido inicial de sólidos volátiles (Martín Juárez et al., 2018).

En la Gráfica 21 se representa con cada letra los distintos pretratamientos:

A - molino de bolas durante 5 min

G - disolución de H_2O_2 al 0,5%

B - molino de bolas 60 min

H - disolución de H_2O_2 al 7,5%

C - disolución de NaOH 0,5 M

I - ultrasonidos durante 5 min

D - disolución de NaOH 2 M

J - ultrasonidos durante 21 min

E - explosión de vapor a 130 °C

K - disolución de HCl 0,5 M

F - explosión de vapor 170 °C

L - disolución de HCl 2 M

Como se puede observar en la Gráfica 21, los pretratamientos que retienen menos sólidos volátiles en la fracción sólida son los correspondientes a las

letras C, D, K y L. Estas letras corresponden a los pretratamientos químicos que usan ácido y base como disolvente. El hecho de disponer de menos sólidos volátiles en la fase sólida quiere decir que se han recuperado más en la fracción líquida que es lo más beneficioso.

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



Para seleccionar entre uno entre todos los pretratamientos químicos, se realiza un análisis de sensibilidad. Para ello se utilizan los resultados obtenidos por el grupo de investigación del Departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente de la Universidad de Valladolid.

Para seleccionar uno se debe conocer la liberación de carbohidratos. El azúcar liberado es la fracción de este que se extrae del núcleo de la célula tras la ruptura de la pared celular con el pretratamiento. También, se debe conocer la recuperación de carbohidratos. El azúcar recuperado es la fracción de carbohidratos que se solubiliza en la fase líquida tras el pretratamiento. Además, se debe tener en cuenta la degradación de carbohidratos. El azúcar degradado es el azúcar liberado que no ha sido recuperado, es decir se queda retenido en la fracción sólida tras el pretratamiento. Otro factor que hay que tener en cuenta es la liberación de proteínas. Las proteínas liberadas son las que se extraen del núcleo de la célula tras la ruptura de la pared celular con el pretratamiento. Los lípidos liberados son los que se extraen del núcleo celular tras la ruptura de la pared celular con el pretratamiento. Todo esto se representa en la tanto Tabla 66 para el pretratamiento básico como para el ácido.

Tabla 66. Porcentaje medio de los parámetros característicos para los pretratamientos químicos (Martín-Juárez et al., 2019).

Pretratamiento	% Liberación carbohidratos	% Recuperación carbohidratos	% Degradación carbohidratos	% Liberación proteínas	% Liberación lípidos
NaOH	50,85	14,92	69,96	67,45	26,22
HCl	72,21	39,06	50,69	44,98	13,1

Como se puede observar en la Tabla 66, por lo que respecta al pretratamiento utilizado, se deduce que el pretratamiento ácido es mejor para la liberación y recuperación de carbohidratos. Además, reduce la degradación de carbohidratos y la liberación de lípidos. Sin embargo, el pretratamiento básico es mejor para la liberación de proteínas.

Con todo esto, se realiza un análisis exhaustivo buscando maximizar la liberación y recuperación de carbohidratos, y principalmente la liberación de proteínas. Además de minimizar la de degradación de carbohidratos y la liberación de lípidos. Se concluye que el mejor pretratamiento sin considerar la hidrólisis enzimática posterior es el realizado en las condiciones recogidas en la Tabla 67.

Tabla 67. Pretratamiento óptimo sin considerar la HE.

Pretratamiento	C _A	C _Q	T	t
HCl	50	0,5	120	30

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



Siendo, C_A es la concentración del alga seca en g/L, C_Q es la concentración de HCl en mol/L, T es la temperatura en el autoclave en °C y t es el tiempo en el autoclave en min.

Para saber si este es el pretratamiento seleccionado hace falta evaluar cómo reacciona después a la hidrólisis enzimática.

Por lo tanto, se comprueba si es necesaria una hidrólisis enzimática. Para ello se compara el resultado global obtenido después de someter a la microalga tanto al pretratamiento como a la hidrólisis enzimática, con el obtenido al realizar únicamente el pretratamiento. En la Tabla 68 se representan los mismos parámetros que en el caso anterior pero ahora considerando la hidrólisis enzimática.

Tabla 68. Porcentaje medio de los parámetros característicos para los pretratamientos químicos y una hidrólisis enzimática posterior (Martín-Juárez et al., 2019)

Pretratamiento	% Liberación carbohidratos	% Recuperación carbohidratos	% Degradación carbohidratos	% Liberación proteínas	% Liberación lípidos
NaOH	68,89	26,90	62,46	89,07	41,78
HCl	82,87	45,07	49,55	80,83	41,55

Se deduce de la Tabla 68 que la liberación y recuperación de carbohidratos mejoran si se aplica hidrólisis enzimática tras el pretratamiento. Además, también aumenta considerablemente la liberación de proteínas. Se decide, por tanto, aplicar esta etapa en la biorrefinería planteada.

Entre los experimentos realizados se elige el que maximiza la liberación y recuperación de carbohidratos, y, principalmente, la liberación de proteínas. El tratamiento seleccionado es el mostrado en la Tabla 15 y la hidrólisis enzimática seleccionada es la citada en el apartado de etapas de alternativa 2.

A.3 Balance de materia

A.3.1 Alternativa 1

Para esta alternativa el balance de materia es sencillo debido a que el purín obtenido de los porcinos se aplica directamente como fertilizante orgánico.

En toda la zona de Cuéllar en mayo de 2019 había 570194 porcinos (80118 cerdas y 490076 cerdos). Pero dentro de la zona los municipios seleccionados para tratar el purín tienen 117997 porcinos (17925 cerdas y 100072 cerdos). Dentro de los porcinos machos en cebo se considera que el 30% son cerdos de entre 20 y 50 kg y que el 70% superan los 50 kg. Se sabe que la cantidad de metros cúbicos de estiércol que generan las hembras con lechones es de 6,12 m³/año, los cerdos de entre 20 kg y 50 kg producen 1,80 m³/año y los cerdos de entre 50 kg y 100 kg generan 2,50 m³/año. Es decir, la cantidad de purín que se va a utilizar como fertilizante orgánico es 338866 m³ anuales.

A.3.2 Alternativa 2

En este apartado se desarrolla el balance de materia de la alternativa 2. Esta incluye el cultivo de las microalgas y la biorrefinería planteada.

A.3.2.1 Planta de tratamiento

En primer lugar, se sabe que la cantidad de purín diaria a tratar es 928,4 m³/d. En la Figura 7 se muestran las primeras etapas de la alternativa 2.



Figura 7. Diagrama de las primeras etapas de la alternativa 2.

El balance de materia en kg/d de estas etapas se observa en la Tabla 69.

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.

Tabla 69. Corrientes de la planta de tratamiento en kg/d.

Corriente	1	2	3	4
Total (kg/d)	928399,7	928399,7	1117992,7	9283996,7
Corriente	5	6	7	8
Total (kg/d)	2015000	7268996,7	7237604,3	31392,4

Estas corrientes se referencian a la unidad funcional en la Tabla 70.

Tabla 70. Corrientes planta de tratamiento referenciadas a la UF, 1 m³ de purín.

Corriente	1	2	3	4	5	6	7	8
Total (kg/m ³ purín)	1000,0	1000,0	1204,2	10000,0	2170,4	7829,6	7795,8	33,8

Las corrientes 1 y 2 se corresponden con la cantidad de purín que se trata. La corriente 3 es el agua fresca que es necesario a portar al día. La corriente 4 es el purín diluido al 10%. La corriente 5 es la cantidad de agua que se evapora en los canales abiertos, se considera en esta zona es de 6,5 l/m²·d de media anual. La corriente 6 es la salida de los canales abiertos que se dirige al proceso de deshidratación. La corriente 7 es la cantidad de agua que se recircula al tanque de dilución. La corriente 8 es la biomasa algal que se obtiene por m³ de purín, en este tipo de fotobiorreactor se generan 20 g/m²d de biomasa algal. Esto implica que entran en la biorrefinería 258,3 kg/h de biomasa algal seca.

La composición de la corriente 8 se encuentra en la Tabla 71 siguiendo los porcentajes de la Tabla 7.

Tabla 71. Composición de la corriente 8 en kg/h y referenciado a la UF.

Componente	Corriente 8 (kg/h)	Corriente 8 (kg/m ³ purín)
CH	57,6	1,5
PR	133,6	3,5
L	34,6	0,9
Ceniza	32,4	0,8
Humedad	1049,7	27,1

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.

La corriente 8 sigue las etapas de la biorrefinería propuestas. Estas etapas se muestran en la Figura 8.

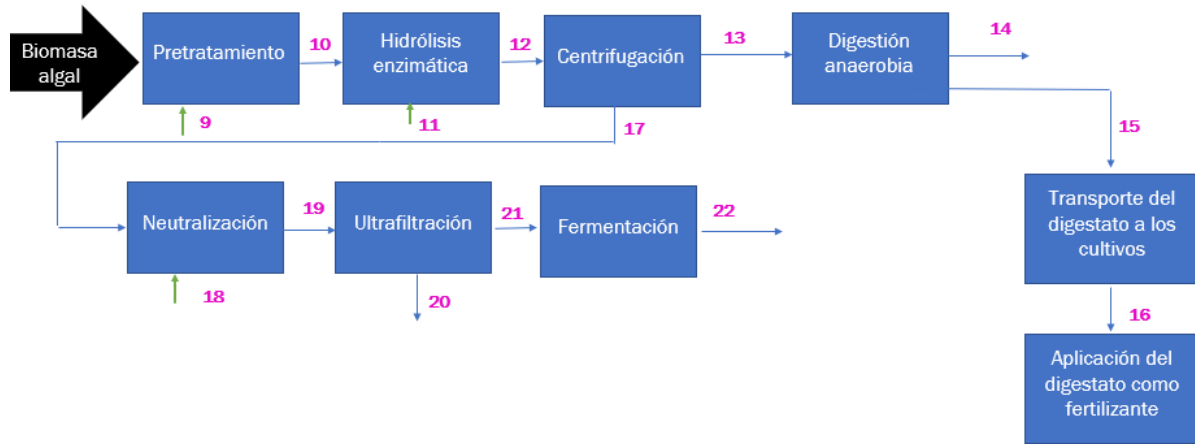


Figura 8. Diagrama con las etapas de la biorrefinería propuesta.

A.3.2.2 Pretratamiento

En segundo lugar, se lleva a cabo el pretratamiento. Para cumplir con las condiciones de pretratamiento de la Tabla 15 es necesario añadir 125,6 kg/h de disolución de HCl 1M (corriente 9). Usando los resultados de la Tabla 16 se conocen los carbohidratos, proteínas y lípidos liberados durante el pretratamiento, se obtienen los resultados de la Tabla 72.

Tabla 72. Composición de la corriente 10 en kg/h y referenciada a la UF.

Componente		Corriente 10 (kg/h)	Corriente 10 (kg/m ³ purín)
CH	Liberado	42,4	1,1
	No liberado	15,2	0,4
PR	Liberado	72,7	1,9
	No liberado	60,9	1,6
L	Liberado	0,8	0,0
	No liberado	33,8	0,9
Ceniza		32,4	0,8
Humedad		1049,7	27,1

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



A.3.2.3 Hidrólisis enzimática

En tercer lugar, se realiza la hidrólisis enzimática. Para cumplir con las condiciones de la hidrólisis es necesario añadir 21,1 kg/h de celulasa (corriente 11). Si se usan los valores de la Tabla 18, se obtienen los resultados de la Tabla 73.

Tabla 73. Composición de la corriente 12 en kg/h y referenciada a la UF.

Componente		Corriente 12 (kg/h)	Corriente 12 (kg/m ³ purín)
CH	Liberado	46,8	1,2
	No liberado	10,8	0,3
PR	Liberado	122,0	3,2
	No liberado	11,6	0,3
L	Liberado	5,5	0,1
	No liberado	29,1	0,8
Ceniza		32,4	0,8
Humedad		1049,7	27,1

A.3.2.4 Centrifugación

En cuarto lugar, se realiza la centrifugación. En la fracción líquida se encuentran los carbohidratos, las proteínas y los lípidos recuperados. El porcentaje de carbohidratos recuperados se encuentra en la Tabla 18; este valor está calculado respecto a la biomasa de entrada. Sin embargo, de los lípidos y proteínas aún no se han obtenido valores en el laboratorio. Por lo tanto, se ha aproximado que la recuperación de lípidos es igual que la de carbohidratos con respecto a los liberados, 93%; y que la recuperación de proteínas es algo menor, un 80% de las liberadas. También, se encuentran en la fracción líquida la humedad de la biomasa algal y la disolución empleada en el pretratamiento. Todo esto se resume en la Tabla 74.

Tabla 74. Composición de la corriente 17 en kg/h y referenciada a la UF.

Componente	Corriente 17 (kg/h)	Corriente 17 (kg/m ³ purín)
CH	43,7	1,1
PR	97,6	2,5
L	5,1	0,1
Ceniza	1,6	0,0
Humedad	997,2	25,8
Disolución HCl	119,3	3,1

En la fracción sólida se encuentran los componentes no liberados y los degradados. Además de lo citado, en esta fracción se encuentra la ceniza presente en la biomasa algal. También se encuentran un 5% de los líquidos porque la centrifugación no es ideal. Todo esto se resume en la Tabla 75.

Tabla 75. Composición de la corriente 13 en kg/h y referenciada a la UF.

Componente	Corriente 13 (kg/h)	Corriente 13 (kg/m ³ purín)
CH	14,0	0,4
PR	36,0	0,9
L	29,5	0,8
Ceniza	30,8	0,8
Humedad	52,5	1,4
Disolución HCl	6,3	0,2

A partir de este punto se trabaja de manera independiente con la fracción sólida y con la fracción líquida.

A.3.2.5 Neutralización

En quinto lugar, a la fracción líquida es necesario neutralizarla debido a que contiene la disolución de HCl 1M. Como se tienen 119,3 kg/h de HCl y la masa molecular del ácido clorhídrico es 36,46 kg/mol, implica 3,27 kmol/h. Por lo tanto, hay que utilizar la misma cantidad de moles de NaOH para neutralizar. Como tiene una masa molecular de 40,00

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



kg/mol, implica que es necesario añadir 130,9 kg/h de NaOH (corriente 18). Con esta adición la corriente 19 presenta la composición mostrada en la Tabla 76.

Tabla 76. Composición de la corriente 19 en kg/h y referenciada a la UF.

Componente	Corriente 19 (kg/h)	Corriente 19 (kg/m ³ purín)
CH	43,7	1,1
PR	97,6	2,5
L	5,1	0,1
Ceniza	1,6	0,0
Humedad	1.056,1	27,3
NaCl	191,2	4,9

A.3.2.6 Ultrafiltración

Una vez realizada la neutralización se pasa la fracción líquida por una membrana. En esta etapa se separan las proteínas del resto de componentes debido a que su tamaño es mayor. Se espera que queden retenidos el 1% de los carbohidratos, el 90% de las proteínas y el 15% de los lípidos. El retenido tiene la composición representada en la Tabla 77.

Tabla 77. Composición de la corriente 20 en kg/h y referenciada a la UF.

Componente	Corriente 20 (kg/h)	Corriente 20 (kg/m ³ purín)
CH	0,4	0,0
PR	87,9	2,3
L	0,8	0,0
Ceniza	1,6	0,0
NaCl	191,2	4,9

La composición de permeado es la que ha atravesado la membrana y está representada en la Tabla 78.



Tabla 78. Composición de la corriente 21 en kg/h y referenciada a la UF.

Componente	Permeado (kg/h)	Permeado (kg/m ³ purín)
CH	43,7	1,1
PR	9,8	0,3
L	4,4	0,1
Humedad	1.056,1	27,3

En esta corriente también se encuentra la humedad de la propia microalga más el agua formada durante la neutralización.

A.3.2.7 Fermentación

En sexto lugar, lugar, la corriente permeada entra en un fermentador para obtener bioetanol. En la fermentación se generan 0,551 g de bioetanol por gramo de glucosa y 0,449 g de CO₂ (Martín-Juárez et al., 2017) . Se considera que durante la hidrólisis enzimática el 90% de los carbohidratos se han transformado en glucosa. Además, se supone que la fermentación tiene un rendimiento del 95%. Se muestra la cantidad de bioetanol formado en la Tabla 79.

Tabla 79. Composición de la corriente 22 en kg/h y referenciada a la UF.

Componente	Corriente (kg/h)	Corriente (kg/m ³ purín)
Bioetanol	19,1	0,5
Humedad	1.056,1	27,3
CO ₂	18,3	0,5

Es importante destacar que tras la fermentación será necesario realizar una destilación para separar el agua, que saldrá por colas, y el bioetanol, que saldrá por cabezas. Esta agua se recircula a la zona de cultivo.

A.3.2.8 Digestión anaerobia

Por último, la fracción sólida se lleva a una digestión anaerobia para obtener biogás además se llevan los carbohidratos no transformados en la fermentación. Se sabe que para la fracción sólida de un pretratamiento con HCl 0,5M se obtienen 200 ml de metano por gramo de sólidos volátiles, y para una concentración de HCl 2M se obtienen 238 ml de metano por gramo de sólidos volátiles (Martín Juárez et al., 2018). Como se trabaja en ese

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



proyecto con una concentración de HCl 1M se interpola para conseguir un valor aproximado, 212,67 ml CH₄/g SV. Si el biogás está formado por el 62% en volumen de CH₄ y el 38% en volumen de CO₂. Todo lo que no se transforma en biogás se considera digestato. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 80.

Tabla 80. Composición de la corriente 14 en kg/h y referenciado a la UF.

Componente	Corriente 14 (kg/h)	Corriente 14 (kg/m ³ purín)
CH ₄	11,1	0,3
CO ₂	20,5	0,5

El biogás es la suma de metano y dióxido de carbono, es decir, 31,6 kg/h.

El resto se transforma en digestato, quedando la corriente 15 con la composición mostrada en la Tabla 81. Composición de la corriente 15 en kg/h y referenciado a la UF.

Tabla 81. Composición de la corriente 15 en kg/h y referenciado a la UF.

Componente	Corriente 15 (kg/h)	Corriente 15 (kg/m ³ purín)
Digestato	137,5	3,6



A.4 Dimensionado de equipos

A.4.1 Alternativa 1

En esta alternativa solo hace falta dimensionar las balsas para el almacenamiento de purines.

A.4.1.1 Balsas

Las balsas donde se almacene el purín deben ser cercadas e impermeables para evitar filtraciones y la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas. Además, el tiempo de residencia deberá ser de 3 meses, para poder realizar una gestión adecuada y poder usarlos como fertilizantes orgánicos (BOE, 2000). Para cumplir con las especificaciones las balsas de almacenajes se van a fabricar con PEHD (polietileno de alta densidad) de 1,5 mm de espesor. Este tiene un peso específico de 500 g/m².

El volumen de las balsas corresponde con el volumen de purines generado en cada municipio seleccionado durante 4 meses. Las balsas se consideran con geometría prismática, por lo tanto, su volumen sigue la siguiente ecuación:

$$V = w \cdot l \cdot h$$

Siendo w el ancho, l el largo y h la profundidad. Es importante fijar un factor de seguridad por las posibles fluctuaciones en la cantidad de purines durante el año. En este caso se elige un factor del 10%, siendo el volumen real el mostrado en la siguiente ecuación:

$$V_R = V \cdot 1,1$$

La profundidad seleccionada es de 2 m, y se considera que el ancho es dos veces el largo. Con estas especificaciones se diseñan los 338866 m³ necesarios repartidos por los municipios seleccionados.

Con estas consideraciones se obtiene los resultados mostrados en la Tabla 5. Es decir, son necesarios 65447 m² de lona de PEHD para cubrir la totalidad de las balsas.

Cuando pasen los meses de almacenaje los purines se distribuirán por los cultivos más cercanos a cada granja.

A.4.2 Alternativa 2

A.4.2.1 Planta de tratamiento

El cultivo de microalgas se lleva a cabo en un reactor en canal de rodadura (Raceway). En el cultivo se van a tratar a diario 928,4 m³ de purín. Debido a su alto contenido en nitrógeno y fósforo es necesario realizar una disolución al 10%. Por lo tanto, se requiere un volumen mínimo de 9284 m³ al día. Si se selecciona un tiempo de residencia de 5 días el reactor debe tener un volumen de 46420 m³. Además, se sabe que para los reactores descritos se obtiene una productividad media de 20 g/m²-d de biomasa algal (Acién et al., 2017).

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



Los canales abiertos están realizados en hormigón con garantía de 20 años superpuesto sobre geotextil de polipropileno (Huntley et al., 2015a). Tienen una capacidad de 1500 m³ y ocupan una superficie de 10000 m² cada uno, debido a que su profundidad es de 15 cm.

En este cultivo se utilizan 31 canales abiertos, es decir, el total de canales ocupa 310000 m².

La evaporación considerada en los canales abiertos es de 65 m³/(ha·d).

A.4.2.2 Tanques

Para diseñar los diferentes tanques es necesario conocer el caudal que entra y el tiempo de residencia del fluido en el tanque. Se considera además que la biorrefinería trabaja de forma continua y tiene suministros suficientes para evitar parar su producción.

El volumen de cada tanque se calcula con la siguiente ecuación:

$$V = Q \cdot t_R$$

Siendo V el volumen del tanque, Q el caudal y t_R el tiempo de residencia.

Además, se ha tenido en cuenta un factor de seguridad del 20% para evitar que los tanques colapsen. Por lo tanto, el volumen real será mayor:

$$V_R = V \cdot 1,2$$

Todos los tanques diseñados tienen geometría cilíndrica y la relación entre la altura del tanque (H) y el diámetro nominal (D) se elige según la función que desarrollan en la biorrefinería. La altura y el diámetro se calculan a partir de la relación H/D y la geometría cilíndrica:

$$V = \frac{\Pi \cdot D^2}{4} \cdot H = \frac{\Pi \cdot D^2}{4} \cdot \left(\frac{H}{D}\right) \cdot D$$

El siguiente paso es calcular el espesor. La forma de calcularlo varía en función de la presión del tanque.

Para los tanques que trabajan a presión atmosférica se aplica la norma API 650, cuyas bases de diseño son las siguientes:

- No abarca el diseño de tanques con P interna > 2,5 psig.
- Cuando 0 psig ≤ P interna ≤ 2,5 psig, el peso del techo debe ser mayor a esta.
- No se permite el diseño de tanques con presión externa o presión de vacío (presión máxima permisible de vacío = 1 pulg de H₂O).
- Es aplicable en tanques no refrigerados con T máxima = 93°C (200°F)
- Utiliza "Radiografía spot" como método de inspección, para juntas horizontales y verticales, en consecuencia, E = 1 para cálculos de esfuerzos circunferenciales y E = 0,85 para longitudinales.

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



- El diseño sísmico de los tanques está basado en el apéndice E de la norma API 650 año 2007.
- Solo es aplicable a tanques cuyo fondo está uniformemente soportado. Se recomienda utilizar junta frágil en la unión techo-cuerpo para tanques de techo cónico fijo.
- Capacidad de venteo de vapor normal y de emergencia.
- Si el tanque es diseñado con junta frágil, no requiere de venteo de emergencia.
- Solo es aplicable en el caso de tanques de acero.

El espesor de los tanques con diámetro nominal menor de 15 m debe ser en todo momento mayor o igual que 5mm. Se calculan los espesores por condiciones de diseño y por prueba hidrostática del tanque y se elige el más restrictivo, siempre y cuando este sea superior a los 5 mm. Para ello aplicamos las siguientes fórmulas:

$$t_d = \frac{4,9 \cdot D \cdot (H - 0,3) \cdot G}{S_d} + C_A$$
$$t_t = 4,9 \cdot D \cdot \frac{(H - 0,3)}{S_t}$$

siendo D el diámetro nominal en m, H la altura del tanque en m, G es la gravedad relativa del fluido en el interior del tanque, S_d y S_t son las presiones máximas permitidas para condiciones de diseño y de prueba hidrostática respectivamente expresadas en MPa, y C_A es la corrosión permitida en mm.

Los valores de S_d y S_t se buscan en las tablas del código API para el acero inoxidable SS-304 siendo S_d = 155,13 MPa y S_t = 186,16 MPa. Se conoce que la corrosión promedio para este tipo de acero es de 0,1mm/año y se asume que vida media del tanque de 20 años.

Una vez calculados estos espesores se elige el mayor entre ellos si son mayores de 5 mm, y si ninguno es mayor se elige el mínimo permitido por la normativa, es decir, 5mm.

Para los tanques que trabajan a presión, en este caso únicamente el del pretratamiento, se aplica la norma ASME BPVC Section VIII (American Society of Mechanical Engineers, 2019). La ecuación para el cálculo del espesor de pared frente a un esfuerzo circunferencial (juntas longitudinales) es la siguiente:

$$t = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0,6P}$$

siendo P la presión de diseño en psig, R el radio interno en m, S tensión máxima admisible por el material en psi y E eficiencia de las juntas.

Se considera el valor de la eficiencia de las juntas de 0,85 debido a que se supone una junta doblemente soldada. Para la determinación de la tensión máxima se utiliza la norma ASME que determina que el valor es de 15,85 kpsi para el acero inoxidable SS-304 a 100°C.

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



Una vez calculado el espesor se considera que la corrosión promedio para este tipo de acero es de 0,1mm/año y se asume que vida media del tanque de 20 años. Por lo tanto, hay que sumar 2 mm al resultado obtenido.

Para los tanques que tienen unas condiciones de temperatura específicas es necesario conocer el calor que es preciso aportar. Para calcular el calor en vatios requerido se utiliza la fórmula siguiente:

$$Q = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T$$

Siendo \dot{m} el flujo másico de entrada al tanque en kg/s, c_p el calor específico y ΔT la diferencia entre la temperatura que se quiere alcanzar y a la que se encuentra el fluido.

A.4.2.3 Membrana de ultrafiltración

Para realizar el proceso de ultrafiltración es necesaria una membrana con polarización de la concentración. La ecuación que caracteriza este tipo de membrana es la siguiente:

$$J = k \cdot \ln \left(\frac{c_g}{c_p} \right)$$

siendo J la densidad del flujo en $m^3/m^2/s$, k el coeficiente de transferencia de materia en $m^3/m^2/s$, c_g y c_p la concentración de las proteínas. La concentración de proteínas es del 3% y la concentración típica de un gel para proteínas es del 22% (Wankat, 2017).

Para calcular la k se relaciona con el número de Sherwood de la siguiente forma (van den Berg et al., 1989):

$$S_h = k \cdot d_h \cdot D$$

Siendo d_h el diámetro hidráulico del sistema y D el coeficiente de difusividad. Para el coeficiente se escoge al valor de la caseína debido a que es la única proteína de la que se ha hallado el valor (Cheryan and Cheryan, 1998). El diámetro hidráulico seleccionado es 2,5 cm.

La fórmula para calcular el número de Sherwood varía en función de si el flujo que atraviesa la membrana es turbulento o laminar. Con las condiciones de fluido el Reynolds obtenido es laminar. Para régimen laminar la ecuación varía en función de si la longitud de los tubos es mayor que la longitud de entrada. La longitud de los tubos seleccionada es de 0,5 m y la longitud de entrada se calcula de la siguiente forma:

$$L^* = 0,029 \cdot d_h \cdot Re$$

La L^* obtenida es 1,26 m que es mayor que la longitud de los tubos. Por lo tanto, se usa la ecuación de Grober:

$$S_h = 0,664 \cdot Re^{0,5} \cdot Sc^{0,33} \cdot \left(\frac{d_h}{L} \right)^{0,33}$$

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



Cuando se conoce el valor del número de Sherwood ya se puede calcular el coeficiente de transferencia de materia y con este el valor de la densidad de flujo. La densidad de flujo obtenida es de $9,29 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{s}$. Con este valor se obtiene el área de la membrana, usando el caudal que atraviesa la membrana en m^3/s , como se observa en la Tabla 38, la corriente que atraviesa la membrana es de $32,8 \text{ kg}/\text{m}^3$ de purín, como se sabe que la cantidad de purín diaria es $928,4 \text{ m}^3/\text{d}$ y la densidad es aproximadamente $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ se obtiene que el flujo en m^3/s es $3,53\text{E}-4$.

$$A_m = \frac{Q}{J}$$

Con este valor y el área de contacto de cada tubo se calcula el número de tubos necesarios en la membrana.

A.4.2.4 Bombas

Se pretende en este subapartado diseñar las bombas de la alternativa 2. Las bombas existentes en este proceso son las siguientes.

Para evaluar las pérdidas de carga que se producen en los tramos donde se encuentran las bombas, se debe tener en cuenta que existen pérdidas de fricción a través de las tuberías y pérdidas locales. Estas últimas pérdidas son producidas si se atraviesa un filtro, si en el tramo hay una entrada o una salida a un tanque o a un intercambiador, además de la caída de carga existente en los tubos del intercambiador. Los valores de las constantes de pérdidas se encuentran recogidos en la Tabla 82.

Tabla 82. Constante de pérdidas locales

Elemento	Constante de pérdida (adimensional)	Nombre de la constante
Filtro	8	K_f
Salida de un tanque	0,5	K_{st}
Entrada a un intercambiador	1	K_{ei}
Salida de un intercambiador	0,5	K_{si}
Entrada a un tanque	1	K_{er}

Para comenzar con el dimensionado se toma el caudal que circula a través de la bomba y a partir de la Ecuación de Bernoulli se calcula la altura a desarrollar:

$$\left(\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + u_1 \right) + g \cdot H_B = \left(\frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + u_2 \right) + g \cdot H_p$$

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



siendo H_B la altura manométrica de la bomba en m y H_p la altura de pérdidas. El punto 1 es el principio de la tubería y el punto 2 el final de la tubería en la que se encuentra la bomba. El término cinético se desprecia debido a que al ser un proceso continuo y tratarse de equipo de grandes dimensiones la velocidad en los puntos 1 y 2 es prácticamente nula, estado cuasiestacionario. El término debido a la energía potencial (u) se desarrolla como gravedad por altura. El caudal que circula a través de la bomba es el que pasa a través de las tuberías 1 y 2. Si se tiene todo esto en cuenta la ecuación de altura de la bomba queda de la siguiente forma:

$$H_B = \left(\frac{P_2 - P_1}{\rho \cdot g} \right) + (z_2 - z_1) + H_p$$

siendo los dos primeros términos de la ecuación correspondientes a la altura estática.

$$H_{\text{est}} = \left(\frac{P_2 - P_1}{\rho \cdot g} \right) + (z_2 - z_1)$$

Para calcular la H_p , altura de pérdidas se utiliza la ecuación:

$$H_p = H_{\text{pfricción}} + H_{\text{plocales}}$$

Siendo a su vez las pérdidas de fricción iguales a lo desarrollado en la ecuación:

$$H_{\text{pfricción}} = \left(\frac{8 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot g} \right) \cdot \left(\sum \frac{f_i \cdot L_i}{D_i^5} \right)$$

Y las pérdidas locales iguales a lo desarrollado en la ecuación:

$$H_{\text{plocales}} = \left(\frac{8 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot g} \right) \cdot \sum \frac{K_i}{D_i^4} + \frac{(-\Delta P_{\text{intercambiador}})}{\rho \cdot g}$$

La K_i es la suma de las pérdidas de fricción recogidas en la Tabla 82.

Con todo esto se calcula la altura de la bomba que es la que permite elegir una bomba del catálogo (Hidrostaal, 2020).

Una vez hallada la altura de la bomba se puede calcular la potencia desarrollada:

$$P_{\text{desarrollada}} = G \cdot H_B \cdot g$$

La potencia consumida se calcula en función de la desarrollada y el rendimiento de la bomba que viene dado en el catálogo:

$$P_{\text{consumida}} = \frac{P_{\text{desarrollada}}}{\eta}$$

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.

A.5 Análisis de inventario

En este apartado se desarrollan los cálculos e hipótesis realizados para la obtención de las emisiones en ambas alternativas.

A.5.1 Alternativa 1

A.5.1.1 Almacenamiento de purín

Para conocer las emisiones es necesario seguir una serie de pasos. En primer lugar, se caracteriza el estiércol. La caracterización depende del tipo de almacenamiento y de la región de estudio. Los parámetros que hay que definir son:

VS – sólidos volátiles excretados por día (kg VS/m³ purín)

B₀ – capacidad máxima de producción de metano (m³ CH₄/kg VS)

MCF – factor de conversión de metano para cada sistema de gestión

El tipo de almacenamiento se divide en dos grupos. En primer lugar, se almacena el purín por debajo del lugar de confinamiento de los porcinos durante menos de un mes. En segundo lugar, se almacena en la balsa como líquido fango durante al menos 3 meses.

Además se sabe que la temperatura media anual en Cuéllar es de 12 °C (IDAE, 2020). Con el tipo de almacenaje y la temperatura se entra al Cuadro 10.17 aportador por el IPCC para obtener el MCF (Dong et al., 2006), mostrado en la Tabla 83.

Tabla 83. Valores de MCF por temperatura para sistemas de gestión del estiércol (Dong et al., 2006).

Sistema ^a	Frio					Sistema ^a	Frio				
	≤ 10	11	12	13	14		≤ 10	11	12	13	14
Laguna anaeróbica no cubierta	66%	68%	70%	71%	73%	Pastura/Prado/Pradera	1,0%				
						Distribución diaria	0,1%				
						Almacenaje de sólidos	2,0%				
Almacenamiento en pozos por debajo de lugares de confinamiento animal	< 1 mes	3%				Corral de engorde	1,0%				
						Líquido/Fango	Con cobertura de costra natural	10%	11%	13%	14%

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.

Como se puede observar en la Tabla 83, en las condiciones citadas, el valor de MCF es del 3% para almacenamiento menor de un mes en las granjas y del 13% para almacenamiento como sólido.

En el Cuadro 10A-7 aportado por el IPCC se obtiene el valor de B_0 . Se representa el cuadro en la Tabla 84.

Tabla 84. Derivación de factores de emisión de metano por gestión del estiércol para porcinos de carne (Dong et al., 2006)

Región	Características de los porcinos de carne		
	Masa ^a kg	B_0 ^b m^3CH_4/kg VS	VS ^c kg/hd/día
América del Norte	46	0,48	0,27
Europa Occidental	50	0,45	0,3
Europa Oriental	50	0,45	0,3
Oceanía	45	0,45	0,28
América Latina	28	0,29	0,3
África	28	0,29	0,3
Oriente Medio	28	0,29	0,3
Asia	28	0,29	0,3
Subcontinente Indio	28	0,29	0,3

De la Tabla 84 se deduce que para Europa Occidental el valor de B_0 es $0,45 m^3 CH_4/kg$ VS.

El valor de los sólidos volátiles se obtiene de la Tabla 1.

En segundo lugar, se calculan las emisiones de metano debidas al almacenamiento de estiércol. Para ello, se utiliza la siguiente ecuación:

$$CH_4_{\text{estiércol}} = VS \cdot B_0 \cdot 0,67 \cdot MCF$$

Siendo estas las emisiones de metano por m^3 de purín.

En tercer lugar, se calculan las emisiones de óxido de nitrógeno debidas al almacenamiento de estiércol. Para calcular las emisiones, se utiliza el valor de nitrógeno de la Tabla 1. También es necesario conocer el factor de emisión para emisiones directas de N_2O del sistema de gestión elegido, EF_3 . Este valor se obtiene del Cuadro 10.21 del Volumen 4: Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra (Dong et al., 2006), representado en la Tabla 85.

Tabla 85. Factores de emisión por defecto para emisiones directas de N₂O de la gestión del estiércol.

Almacenamiento en pozos por debajo de lugares de confinamiento animal	Recogida y almacenamiento del estiércol, habitualmente con poco o ningún agregado de agua y comúnmente por debajo de un suelo emparrillado, en una instalación de confinamiento de animales.		0,002
Líquido/Fango	El estiércol se almacena tal como se excreta o con un agregado mínimo de agua para facilitar su manejo y se ubica en tanques o en estanques de tierra.	Con cobertura de costra natural	0,005
		Sin cobertura de costra natural	0

Como se puede observar en la Tabla 85 el valor de EF₃ es de 0,002 kg N₂O-N/kg de N excretado para el almacenaje debajo de los cerdos y EF₃ es de 0,005 kg N₂O-N/kg de N excretado para el almacenaje en las balsas.

Con estos valores se pueden calcular las emisiones directas de N₂O en kg N₂O/m³ purín, con la siguiente ecuación:

$$N_2O_{\text{directas}} = N \cdot EF_3 \cdot \frac{44}{28}$$

En cuarto lugar, se calculan las emisiones indirectas, N₂O_{indirectas}. Estas emisiones son las debidas a la volatilización de NH₃ y NO_x del estiércol. Para calcular las emisiones, se utiliza el valor de nitrógeno de la Tabla 1. También es necesario conocer el factor de emisión para emisiones indirectas de N₂O, EF_i. Este valor es igual a 0,00012 kg N₂O indirecto-N/kg de N excretado para el almacenaje debajo de los cerdos y es de 0,0003 kg N₂O indirecto-N/kg de N excretado para el almacenaje en las balsas (Wu et al., 2020). Con estos valores se pueden calcular las emisiones indirectas de N₂O en kg N₂O inidrecto/m³ purín, con la siguiente ecuación:

$$N_2O_{\text{indirectas}} = N \cdot EF_i \cdot \frac{44}{28}$$

En quinto lugar, se calculan las emisiones de N₂. Para calcular las emisiones, se utiliza el valor de nitrógeno de la Tabla 1. También es necesario conocer el factor de emisión para emisiones de N₂, EF₂. Este valor es igual a 0,006 kg N₂-N/kg de N excretado para el almacenaje debajo de los porcinos y 0,015 kg N₂-N/kg de N excretado para el almacenaje en balsas (Wu et al., 2020).



Con estos valores se pueden calcular las emisiones de N₂ en kg N₂/m³ purín, con la siguiente ecuación:

$$N_2 = N \cdot EF_2 \cdot \frac{28}{28}$$

En sexto lugar, se calculan las emisiones de NH₃. Para calcular las emisiones, se utiliza el valor de nitrógeno de la Tabla 1. También es necesario conocer el factor de emisión para emisiones de NH₃, EF₄. Este valor es igual a 0,008 kg NH₃-N/kg de N excretado para el almacenaje debajo de los porcinos y 0,02 kg NH₃-N/kg de N excretado para el almacenaje en balsas (Wu et al., 2020).

Con estos valores se pueden calcular las emisiones de NH₃ en kg NH₃/m³ purín, con la siguiente ecuación:

$$NH_3 = N \cdot EF_4 \cdot \frac{17}{14}$$

En séptimo lugar, se calcula las emisiones de NO_x. Para calcular las emisiones, se utiliza el valor de nitrógeno de la Tabla 1. También es necesario conocer el factor de emisión para emisiones de NO_x, EF₅. Este valor es igual a 0,002 kg NO_x-N/kg de N excretado para el almacenaje debajo de los porcinos y 0,005 kg NO_x-N/kg de N excretado para el almacenaje en balsas (Wu et al., 2020).

Con estos valores se pueden calcular las emisiones de NO_x en kg NO_x/m³ purín, con la siguiente ecuación:

$$NO_x = N \cdot EF_5 \cdot \frac{46}{14}$$

A.5.1.2 Transporte del purín

Existen dos emisiones de transporte, las debidas al traslado del purín a las balsas y las debidas al traslado del fertilizante a las tierras de cultivo.

Para calcular las emisiones del traslado del purín a las balsas se conoce la superficie de cada municipio; esta se muestra en la Tabla 86.

Tabla 86. Superficie municipios y camiones necesario.

Municipio	Superficie (km ²)	Radio (km)	Camiones
Cuéllar	350	10,5	24
Olombrada	66	4,6	3
Vallelado	35	3,4	7

Se obtiene con los valores de la Tabla 86 que es necesario trasladar 14303,4 tkm/d en Cuéllar, 91,64 tkm/d en Olombrada y 694,0 tkm/d en Vallelado. Estos valores

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



referenciados a la unidad funcional equivalen a 15,4 tkm/m³ de purín en Cuéllar, 9,9E-2 tkm/m³ de purín en Olombrada y 7,5E-1 tkm/m³ de purín en Valledado.

A.5.1.3 Aplicación del purín como fertilizante orgánico

En primer lugar, se calculan las emisiones debidas al traslado del purín a los cultivos. Para calcular las emisiones de transporte debidas al traslado de fertilizante a las zonas de cultivo es necesario conocer las hectáreas que se pueden fertilizar usando el purín. Por lo tanto, se necesita conocer la cantidad de nitrógeno que excreta de media un porcino al año.

Se sabe que la cantidad de nitrógeno que generan las hembras con lechones es de 18 kg N/año; los cerdos de entre 20 kg y 50 kg generan 6 kg N/año; y los cerdos de entre 50 kg y 100 kg generan 8,5 kg N/año (BOE, 2000). Al conocerse la cantidad de porcinos de cada categoría se puede calcular el valor promedio buscado, se obtiene el valor de 9,3 kg N/cabeza·año este valor se denomina N_{ex} . Con ese valor se puede calcular la cantidad de nitrógeno que generan los porcinos de la zona seleccionada:

$$N_{total} = N_{ex} \cdot N_T$$

Siendo N_T el número de porcinos totales de la zona. Es decir, en la zona seleccionada se generan 1098208 kg N/año. Además, la cantidad máxima de nitrógeno que se puede aplicar por hectárea es de 170 kg N/ha. Por lo tanto, con la cantidad de purín seleccionada se pueden cubrir 6460 ha. Para cubrir esta cantidad de hectáreas de superficie agrícola en Segovia es necesario recorrer 8761 ha, debido a que el porcentaje de superficie agrícola en esta provincia es el 74% de su superficie total (Instituto Nacional de Estadística, 2009). Esta superficie tiene un radio de 5,3 km. Esto y el número de camiones se muestra en la Tabla 87.

Tabla 87. Superficie cultivos y camiones necesario.

Superficie (ha)	Radio (km)	Camiones
8.761	5,3	46

Por lo tanto, es necesario transportar 24821,6 tkm/d. Si este valor se expresa con la referencia seleccionada, se obtienen 26,8 tkm/m³ de purín.

En segundo lugar, se calculan las emisiones de óxido de nitrógeno debidas al uso de los purines como fertilizante orgánico. Siendo EF_1 igual a 0,01 kg N₂O-N/kg de N, valor para abonos orgánicos según el Cuadro 11.1 aportado por el IPCC (Klein et al., 2006); este se muestra en la Tabla 88.

Tabla 88. Factor de emisión por defecto para estimar las emisiones directas de N₂O de los suelos gestionados.

Factor de emisión	Valor por defecto
EF ₁ para aportes de N de fertilizantes minerales, abonos orgánicos y residuos agrícolas, y N mineralizado de suelos minerales a causa de pérdida de carbono del suelo [kg N ₂ O-N (kg N) ⁻¹]	0,01

Las emisiones directas de N₂O se calculan con la fórmula siguiente:

$$N_2O_{\text{directas}} = N \cdot EF_1 \cdot \frac{44}{28}$$

Con esta ecuación se obtienen las emisiones directas de N₂O en kg N₂O indirecto/m³ purín.

En tercer lugar, se calculan las emisiones de óxido de nitrógeno indirectas debidas al uso de los purines como fertilizante orgánico. Estas emisiones son las debidas a la volatilización de NH₃ y NO_x del estiércol. Para calcular las emisiones, se utiliza el valor de nitrógeno de la Tabla 1. También es necesario conocer el factor de emisión para emisiones indirectas de N₂O, EF_i. Este valor es igual a 0,0007 kg N₂O indirecto-N/kg de N excretado (Wu et al., 2020). Con estos valores se pueden calcular las emisiones indirectas de N₂O en kg N₂O indirecto/m³ purín, con la siguiente ecuación:

$$N_2O_{\text{indirectas}} = N \cdot EF_i \cdot \frac{44}{28}$$

En cuarto lugar, se calculan las emisiones de N₂. Para calcular las emisiones, se utiliza el valor de nitrógeno de la Tabla 1. También es necesario conocer el factor de emisión para emisiones de N₂, EF₂. Este valor es igual a 0,047 kg N₂-N/kg de N excretado (Wu et al., 2020).

Con estos valores se pueden calcular las emisiones de N₂ en kg N₂/m³ purín, con la siguiente ecuación:

$$N_2 = N \cdot EF_2 \cdot \frac{28}{28}$$

En quinto lugar, se calculan las emisiones de NH₃. Para calcular las emisiones, se utiliza el valor de nitrógeno de la Tabla 1. También es necesario conocer el factor de emisión para emisiones de NH₃, EF₄. Este valor es igual a 0,07 kg NH₃-N/kg de N excretado (Wu et al., 2020).

Con estos valores se pueden calcular las emisiones de NH₃ en kg NH₃/m³ purín, con la siguiente ecuación:

$$NH_3 = N \cdot EF_4 \cdot \frac{17}{14}$$

En sexto lugar, se calculan las emisiones de NO_x. Para calcular las emisiones, se utiliza el valor de nitrógeno de la Tabla 1. También es necesario conocer el factor de emisión para

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



emisiones de NO_x , EF_5 . Este valor es igual a 0,001 kg $\text{NO}_x\text{-N/kg}$ de N excretado (Wu et al., 2020).

Con estos valores se pueden calcular las emisiones de NO_x en kg NO_x/m^3 purín, con la siguiente ecuación:

$$\text{NO}_x = N \cdot \text{EF}_5 \cdot \frac{46}{14}$$

En séptimo lugar, se calculan las emisiones debidas a la lixiviación a las aguas subterráneas de suelos gestionados. Estas se dividen en dos grupos las emisiones de nitratos y las emisiones de fósforo.

Para calcular las emisiones de nitratos, se utiliza el valor de nitrógeno de la Tabla 1. También es necesario conocer el factor de emisión para nitratos EF_6 . Este valor es igual a 0,129 kg nitrato/kg de N excretado (Roy et al., 2003).

Con estos valores se pueden calcular las emisiones de nitratos en kg nitrato/ m^3 purín, con la siguiente ecuación:

$$\text{Nitratos}_{\text{lix}} = N \cdot \text{EF}_6$$

Para calcular las emisiones de fósforo debidas a la lixiviación. Se utiliza el valor de fósforo de la Tabla 1. También es necesario conocer el factor de emisión para nitratos EF_7 . Este valor es igual a 0,0009 kg P/kg de N excretado (Nemecek, 2013).

$$P_{\text{lix}} = P \cdot \text{EF}_7$$

A.5.1.4 Infraestructura

Se calcula en este Anexo la infraestructura necesaria para llevar a cabo la primera alternativa. En primer lugar, es necesario transformar el terreno de pastos a industrial. Se calcula el espacio de terreno que van a ocupar estas balsas multiplicando el ancho y el largo de cada balsa. Se obtiene, utilizando los valores de la Tabla 5, que son necesarios 62125,4 m^2 de terreno.

En segundo lugar, es necesario calcular la cantidad de terreno que se va a excavar para realizar las balsas, para ello se suman los valores de volumen de la Tabla 5. Se obtiene que es necesario excavar 124251 m^3 de terreno.

En tercer lugar, se calcula el material necesario. Se sabe que el peso específico del PEHD laminado es 500 g/m^2 . Es necesario conocer los m^2 de cada balsa, para ello, se calcula el área del fondo y de las 4 paredes considerando todas ellas rectangulares. Con los valores de la Tabla 5, se obtienen los m^2 de superficie que hay que cubrir y los kilogramos de PEHD necesarios, los cuales se muestran en la Tabla 89.



Tabla 89. Superficie y kg de PEHD utilizado en las balsas.

Municipio	Superficie (m ²)	PEHD (kg)
Cuéllar	47057	23528,5
Olombrada	5222	2611
Vallelado	13168	6584

Este material PEHD granulado se somete a un proceso de laminación.

Esta infraestructura tiene una vida útil de 10 años. Sabiendo el purín que se almacena al año, 338866 m³/año, se conoce la porción de infraestructura que corresponde a un metro cúbico de purín: 2,95E-7 p/m³ de purín. Para poder comparar esta alternativa con la alternativa 2 se requiere 2 veces está infraestructura, es decir, 5,90 E-7 p/m³ debido a que la infraestructura de la segunda alternativa tiene una vida útil de 20 años.

A.5.1.5 Cargas evitadas

Para calcular la cantidad de fertilizante sintético que se sustituye por aplicar fertilizante orgánico se tiene en cuenta lo siguiente. En primer lugar, se selecciona el tipo de fertilizante sintético; en este caso se selecciona fosfato diamónico, DAP. En segundo lugar, se sabe que 1 kg de DAP posee 0,24 kg de P y 0,21 kg de N. De este fertilizante se asimila el 100%, tanto de nitrógeno como de fósforo, por los suelos (Corbala-Robles et al., 2018). En tercer lugar, se sabe la composición del purín Tabla 1, es decir, 3,24 kg de N y 0,91 kg de P por cada metro cúbico de purín. De este fertilizante se asimila el 60% del nitrógeno y el 100% del fósforo (Corbala-Robles et al., 2018). Con estos valores se obtiene que el equivalente a un metro cubico de purín en DAP es 9,3 kg DAP/m³ purín para el N y 3,8 kg DAP/m³ purín para el P. Es decir, el nutriente limitante es el fósforo.

A.5.2 Alternativa 2

A.5.2.1 Almacenamiento interno en granja

Se consideran las mismas emisiones que en el almacenamiento interno de la alternativa 1. Esto se debe a que el almacenamiento en las granjas no se va a alargar más de un mes antes de ser recogido y trasladado al tanque de dilución.

A.5.2.2 Traslado del purín al tanque de dilución

Para realizar el cálculo de toneladas por kilómetro se considera que la planta se encuentra en la granja con mayor producción de Cuéllar y que esta produce el 25% del purín diario en la planta. Además, se han tomado las distancias y los camiones necesarios mostrados en la Tabla 8. La distancia máxima que se recorre es de 14,8 km y la distancia mínima 0,5

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



km. Con estas consideraciones se obtienen 29496,2 tkm/d. Si estas se pasan a la unidad funcional se obtienen 31,8 tkm/m³ de purín.

A.5.2.3 Tanque de dilución

Para que entre el purín a la planta de tratamiento es necesario diluirlo. Para ello se mezcla con el agua que se evapora cada día más el agua que va a la biorrefinería junto a la biomasa algal. Por lo tanto, es necesario suministrar 1204,2 kg/m³ de purín. El suministro de esta agua requiere de un consumo energético elevado. Este consumo energético se corresponde con el bombeo del suministro de agua fresca. Se requiere de 12498 W de potencia como se puede observar en la Tabla 10. Está trabajando la bomba de manera continua a lo largo del día, por lo tanto, se requiere de 230 kWh/d. En consecuencia, se requiere de 3,2E-1 kWh/m³ de purín.

A.5.2.4 Planta de tratamiento

El consumo de trasladar la disolución hasta los canales abiertos se corresponde con el bombeo mostrado en la Tabla 11. Se requiere de 61678,4 W como la bomba funciona de forma continua a lo largo del día se necesitan de 1480,3 kWh/d. En consecuencia, se requiere de 1,59 kWh/m³ de purín.

Se sabe que para los canales abiertos con las características de la Tabla 12 son necesarios 93,88 kWh/(ha·d) de electricidad para mezclar (Huntley et al., 2015a). Es necesario realizar transformaciones a este valores debido a que, de las 100 ha de instalación, únicamente son canales abiertos el 76,6% (Huntley et al., 2015b). Al disponer la instalación de 31 ha para tratar el purín, se obtiene que la necesidad eléctrica en el cultivo para mezclar la disolución en el canal abierto es de 4,1 kWh/m³ de purín.

Para realizar la fotosíntesis las plantas absorben CO₂. Se selecciona un valor medio de 1,8 g CO₂/g alga en esta planta. Si se referencia a la unidad funcional se absorben 12,0 kg CO₂/m³ de purín. Además, el consumo eléctrico de la inyección de CO₂ es de 22,2 Wh/kg CO₂ (Kadam, 2002). Como en el proceso son necesarios 12,0 kg CO₂ por cada m³, se consumen 266,4 Wh/m³ de purín en la inyección.

En esta etapa se produce evaporación donde se pierden 65 m³/ha·d de agua, es decir, se evaporan 2015 m³/d; esto se traduce en 2,17 m³ agua/m³ de purín.

A.5.2.5 Deshidratación

Para trasladar la mezcla a la etapa de deshidratación se consumen 35212,7 W como se puede ver en la Tabla 13. Esta bomba trabaja a lo largo de todo el día por lo tanto se consumen 845,2 kWh/d. Si este valor se referencia a la UF se obtiene que se consumen 9,1E-1 kWh/m³ de purín.

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



El consumo eléctrico es de 3 kWh/(ha·d) para la deshidratación por filtro prensa en una instalación de 100 ha al día. Es necesario realizar transformaciones a este valor debido a que, de las 100 ha de instalación, únicamente son canales abiertos el 76,6% (Huntley et al., 2015b). Al disponer la instalación de 31 ha para tratar el purín, se obtiene que la necesidad eléctrica en el cultivo para la deshidratación es de 0,13 kWh/m³ de purín.

También es necesario recircular el agua al tanque de dilución. En este proceso se consumen 35060,6 W como se puede ver en la Tabla 13. Esta bomba trabaja a lo largo de todo el día, por lo tanto, se consumen 841,4 kWh/d. Si este valor se referencia a la UF se obtiene que se consumen 9,1E-1 kWh/m³ de purín.

A.5.2.6 Pretratamiento

Para realizar el pretratamiento se necesita añadir HCl. Es necesario añadir 125,6 kg/h de disolución de HCl. Para tratar un metro cúbico de purín son necesarios 3,2 kg de disolución de HCl.

El requerimiento eléctrico para el pretratamiento es de 0,7 MJ/kg de biomasa algal seca (Hossain et al., 2019). Por cada m³ de purín se obtienen 6,68 kg de alga seca; por lo tanto, se requiere de 4,7 MJ/m³ de purín.

Para calentar la corriente que entra al pretratamiento, es decir 0,4 kg/s, se requieren de 125 kW de calor. Este suministro se produce de manera continua, es decir, se necesita un aporte de calor de 3000 kWh/d. Como este valor se referencia a la unidad funcional, se requiere de 3,23 kWh/m³ de purín de calor.

A.5.2.7 Hidrólisis enzimática

Para realizar la hidrólisis enzimática son necesarios 68 µl de enzima celulosa por cada g de alga seca. La densidad de esta enzima es de 1,2 g/ml. Se obtienen 6,68 kg de alga seca por cada m³ de purín; por lo tanto, se requiere de 545 g de celulosa por cada m³ de purín.

También, se requiere un consumo energético de 0,05 MJ/kg de biomasa algal seca (Hossain et al., 2019). Por lo tanto, si se pasa este valor a la unidad funcional, se requieren 0,33 MJ/m³ de purín.

A.5.2.8 Centrifugación

En la Tabla 20 se muestra la potencia consumida por la centrifuga tanto en la parte delantera como trasera. Esta centrífuga está operando durante todo el día, por lo tanto, se consumen 168 kWh/d en la parte delantera y 72 kWh/d en la parte trasera. Como se tratan 928,4 m³ de purín al día. Se pueden obtener estos valores en función de la UF. Es decir, 1,8E-1 kWh/m³ purín en la parte delantera y 7,8E-2 kWh/m³ purín en la parte trasera.

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



A.5.2.9 Neutralización

Para realizar la neutralización es necesario añadir NaOH. La cantidad que es necesario añadir es de 130,9 kg/h de NaOH puro para neutralizar los 119,3 kg de HCl. Si este valor se referencia a la unidad funcional es necesario añadir 3,4 kg NaOH/m³ de purín.

La cantidad de NaCl que se forma en esta etapa es 191 kg/h. Si este valor se referencia a la unidad funcional se obtienen 4,9 kg NaCl/m³ purín.

Para conseguir que la neutralización sea eficaz se utiliza un agitador de 3 palas que funciona a 290 rpm. Se consumen en esta agitación 7,5 kW (NOVATEC, 2019); si este agitador trabaja durante todo el día se consumen 150 kWh/d. Si este valor se expresa en función de la unidad funcional se obtienen 1,6E-1 kWh/m³ de purín.

A.5.2.10 Ultrafiltración

El consumo energético que se produce en la membrana es el correspondiente a la bomba que permite que el fluido atraviese la membrana. Para atravesar la membrana se requiere de 397 W de potencia como se puede observar en la Tabla 23. Está trabajando la bomba de manera continua a lo largo del día, por lo tanto, se requiere de 9,5 kWh/d. Por lo tanto, se requiere de 1,0E-2 kWh/m³ de purín si se refiere el valor a la UF.

A.5.2.11 Fermentación

El consumo energético necesario en la fermentación viene dado como 0,05 MJ/kg de alga (Hossain et al., 2019). El 22% de la biomasa algal que entra en la biorrefinería va al fermentador. Esto se traduce en 7,33E-2 MJ/m³ de purín.

Además, durante la fermentación se producen emisiones de CO₂. Este CO₂ es biogénico debido a que se trata del CO₂ que han absorbido las microalgas para realizar la fotosíntesis. Se producen 0,489 g de CO₂/g de glucosa (Martín-Juárez et al., 2017). Se asume que el 90% de los carbohidratos después de la hidrólisis enzimática son glucosa. En este caso se producen 18,3 kg/h. Si este valor se referencia a la unidad funcional se obtienen 0,5 kg/m³ de purín.

A.5.2.12 Digestión anaerobia

Es necesario conocer el consumo energético que supone la mezcla en un digestor anaerobio de biomasa algal. Para la digestión anaerobia se consumen, para mezclar el digestor, 112,5 kW si se mezclan 25000 kg alga seca al día (Collet et al., 2011). En este caso la cantidad de alga seca que entra al digestor es de 110,3 kg/h, como se puede observar en la Tabla 75. Por lo tanto, la potencia necesaria para mezcla en el digestor es de 11,91 kW. Si este digestor trabaja durante todo el día se requieren de 285,9 kWh/d. Si este valor se refiere a la unidad funcional, se consumen 0,31 kWh/m³ de purín en la agitación.

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



Además, es necesario un requerimiento de calor para realizar la digestión. Se requiere de 708,3 kW para aportar calor al tratar 25000 kg alga seca/d (Collet et al., 2011). En este caso, la cantidad de alga seca que entra al digestor es de 110,3 kg/h como se puede observar en la Tabla 75. Por lo tanto, la potencia necesaria para calentar el digestor es de 75 kW. Si este digestor trabaja durante todo el día se requieren de 1800 kWh/d para aportar calor al digestor. Si este valor se refiere a la unidad funcional, se necesitan 1,94 kWh/m³ de purín.

Las emisiones de metano producidas en la digestión anaerobia se corresponden con el 1,5% del metano producido. Como se producen 0,3 kg de CH₄ por cada m³ de purín, se emiten a la atmosfera 4,5E-3 kg CH₄/m³ de purín.

Las emisiones de N₂O son 0,1 kg N₂O por cada TJ de electricidad producida. Se sabe que 1 m³ de biogás produce 5135 kcal, que su densidad es 1,22 kg/ m³ de biogás y que se producen 0,8 kg de biogás por metro cúbico de purín. Por lo tanto, se emiten 1,41E-6 kg N₂O/m³ de purín.

Se emiten 0,42 g de NO_x por cada m³ de biogás producido. Como se producen 0,8 kg de biogás por cada metro cúbico de purín, se emiten a la atmósfera 2,75E-4 kg NO_x/m³ de purín.

A.5.2.13 Aplicación del digestato como fertilizante orgánico

Para calcular las emisiones de transporte debidas al traslado del digestato a las zonas de cultivo es necesario conocer las hectáreas que se pueden fertilizar usando el purín. Por lo tanto, se necesita conocer la cantidad de nitrógeno que tienen los digestatos. Con los valores de la Tabla 27, y sabiendo que la producción por hora de digestato es de 137,2 kg/h, se deduce que se obtienen 420,1 kg N/año. Como, la cantidad máxima de nitrógeno que se puede aplicar por hectárea es de 170 kg N/ha, con la cantidad de digestato obtenida se pueden cubrir 2,5 ha. Para cubrir esta cantidad de hectáreas de superficie agrícola en Segovia es necesario recorrer 3,4 ha, debido a que el porcentaje de superficie agrícola en esta provincia es el 74% de su superficie total (Instituto Nacional de Estadística, 2009). Esta superficie tiene un radio de 0,1 km. Si se dispone de una máquina tractora con capacidad de 20 toneladas, será necesario que realice el recorrido cada 6 días.

Por lo tanto, es necesario transportar 41,2 tkm/6 d de digestato. Si este valor se expresa con la referencia seleccionada, se obtienen 8,4E-3 tkm/m³ de purín.

Se calculan las emisiones debidas al uso del digestato como fertilizante orgánico usando los mismos valores que en el Anexo A.5.1.3 que describe las emisiones debidas al uso de purín como biofertilizante.



A.5.2.14 Infraestructura

Se calcula la infraestructura necesaria para llevar a cabo la alternativa 2. La infraestructura se divide en 4 submontajes. Para cada submontaje se considera el área que ocupa, la transformación del terreno necesaria desde pastos a industrial y el tiempo de construcción de cada uno.

En primer lugar, se hace referencia al tanque de dilución. El tanque está construido en acero de 18 mm de espesor. Este material tiene un peso específico es de 141,3 kg/m² (Grupo Manni, 2019). El tanque presenta forma cilíndrica; por lo tanto, para calcular su área, se suma el área de las bases más el cuerpo del tanque. Se muestran los valores de superficie y de requerimiento de acero en la Tabla 90.

Tabla 90. Características del tanque de dilución.

Tanque	Volumen (m ³)	Diámetro (m)	Altura (m)	Superficie (m ²)	kg acero
Tanque de dilución	10164,0	25,8	19,4	2.622,2	370519,5

Con los datos de la Tabla 9 se obtiene que el tanque ocupa 524,4 m² y tiene una vida útil de 20 años. Este tanque se tarda en construir un mes.

En segundo lugar, se considera la planta de tratamiento. La planta de tratamiento está compuesta por los canales Raceway. Estos canales se aproximan a forma rectangular y están construidos en hormigón de 10 cm de espesor. Este hormigón tiene un peso específico de 230 kg/m². Además, poseen una aislante geotextil de polipropileno con un peso específico 100 g/m². Para realizar el geotextil es necesario laminar el polipropileno. La planta se tarda en construir un año. Se muestran los valores de superficie y de requerimiento de acero y geotextil en la Tabla 91.

Tabla 91. Superficie y hormigón necesario en los Raceway.

Tanque	Nº	Superficie (m ²)	kg hormigón	kg polipropileno
Raceway	31	10103,5	2323816,5	1010,4

La planta de tratamiento ocupa 34 ha, tiene una vida útil de 20 años y se tarda en construir un año.

En tercer lugar, se analizan los tanques de la biorrefinería. Estos tanques están hechos en acero de 7 mm de espesor. Este acero tiene un peso específico del acero es 54,95 kg/m² (Grupo Manni, 2019). Los tanques tienen formas cilíndricas; por lo tanto, para calcular su área, se suma el área de las bases más el cuerpo del tanque. Se muestran los valores de superficie y de requerimiento de acero en la Tabla 92.

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.

Tabla 92. Características de los tanques principales de biorrefinería.

Tanque	Volumen (m ³)	Diámetro (m)	Altura (m)	Superficie (m ²)	kg acero
Pretratamiento	1,7	1,0	2,1	8,3	458,5
Hidrólisis Enzima	20,6	3,3	2,5	42,1	2310,9
Centrífuga	0,8	0,7	2,2	5,2	287,9
Neutralización	0,4	0,9	0,7	3,1	171,8
Fermentador	96,2	6,3	3,1	123,0	6.758,9
Digestor Anaerobio	146,1	4,5	9,1	161,2	8858,4

Estos tanques tienen una vida útil de 20 años y se tardan en construir un año. La superficie industrial que se deja reservada para tanques es de 511,5 m².

Por último, se hace referencia a la membrana de ultrafiltración. Dicha membrana está elaborada con el material PSU. Este polímero tiene una densidad de 1,24 g/cm³ (elaplas, 2020). Como la membrana tiene una longitud de 50 cm, se llega al peso específico de 62 g/cm², es decir 620 kg/m². Se muestran los valores de superficie y de requerimiento de PSU en la Tabla 93.

Tabla 93. Superficie y PSU necesario de la membrana de ultrafiltración.

Membrana	Superficie (m ²)	kg PSU
Ultrafiltración	0,92	570,4

La membrana tiene una vida útil de 2 años.

Esta infraestructura tiene una vida útil de 20 años. Por lo tanto, con los años de vida propuestos solo es necesario cambiar la membrana de ultrafiltración. Se necesita cambiar este 10 veces, es decir, hacen falta 10 submontajes de la membrana. El total de la infraestructura viene definido en la unidad anteriormente mencionada *p*.

Sabiendo el purín que se trata, 338866 m³/año, se conoce la porción de infraestructura que corresponde a un metro cúbico de purín: 1,48E-7 *p*/m³ de purín.

A.5.2.15 Cargas evitadas

En primer lugar, se calculan las cargas evitadas de etanol. Para el etanol se asume que el bioetanol tiene las mismas propiedades que el etanol producido mediante métodos tradicionales. Por lo tanto, como se generan 0,5 kg de bioetanol por m³ de purín, se evita la producción de esa misma cantidad de etanol mediante métodos tradicionales.

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



En segundo lugar, se calculan las cargas evitadas de proteínas comerciales. La caracterización de las proteínas obtenidas se describe en la Tabla 26. Se ha seleccionado esta composición debido a que se ha realizado la extracción de microalgas cultivadas con estiércol porcino, al igual que en este trabajo. Como ninguna de las extracciones era exactamente la descrita en este trabajo se han obtenido los valores de la Tabla 26 calculando la media de los resultados de cada extracción. Los resultados de las distintas extracciones no diferían excesivamente entre sí, por lo tanto, se asume que la caracterización es una aproximación bastante razonable.

Para conocer la cantidad de proteínas comerciales que se evita producir, se sabe la cantidad de proteínas que debe contener un pienso para porcinos en crecimiento de manera ideal (Santamaría-Fernández and Lübeck, 2020). Estos valores se comparan con los representados en la Tabla 26 y se obtiene cuál de los aminoácidos esenciales es el limitante. Los valores ideales de composición porcina en función de la cantidad de lisina vienen representados en la Tabla 94. En esta tabla también aparecen reflejados los valores de aminoácidos en función de la lisina obtenidos en la biorrefinería.

Tabla 94. Valores ideales de aminoácidos en el pienso porcino y valores reales de aminoácidos obtenidos

Aminoácido	% g/g lisina ideales	% g/g lisina obtenidos
Histidina	32	35,5
Treonina	65	64,3
Arginina	42	118,3
Valina	70	105,1
Metionina + Cisteína	60	48,1
Fenilalanina +Tirosina	95	188,4
Isoleucina	53	84,0
Leucina	100	190,1
Lisina	100	100,0

Por lo tanto, los aminoácidos limitantes son la metionina y la cisteína. Como en lugar de tener 60 g de metionina más cisteína con respecto a 100 g de lisina en las proteínas obtenidas, se tienen 48,1 g, se sabe que el rendimiento de las proteínas obtenidas mediante la biorrefinería es el 80,2% de las proteínas comerciales para pienso de porcinos

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



en crecimiento. Como para un metro cúbico de purín se consiguen 2,3 kg de proteínas, se evita la producción de 1,8 kg proteínas comerciales.

En tercer lugar, se calculan las cargas evitadas de fertilizante sintético. Para ello, en este estudio se utiliza el fosfato diamónico (DAP) el cual posee un 23,5% de P y un 21,2 % de N. Por lo tanto, se sabe que 1 kg de DAP posee 0,24 kg de P y 0,21 kg de N. De este fertilizante se asimila el 100% tanto de nitrógeno como de fósforo por los suelos (Corbala-Robles et al., 2018).

La composición del digestato viene definida en la Tabla 27. Además, se sabe que la cantidad de materia seca para un digestato formado en las condiciones del digestor anaerobio para una biomasa algal pretratada con un ácido es del 2,1% (Martín Juárez et al., 2018). La eficiencia de asimilación de este digestato sólido es del 50% (Corbala-Robles et al., 2018). La cantidad de digestato que se forma por cada m³ de purín es de 3,9 kg de los cuales 1,39E-3 son de N y 1,64E-3 son de P. Con estos valores se obtiene que el equivalente a un metro cubico de purín en DAP es 4,0E-3 kg DAP/m³ purín para el N y 4,1E-3 kg DAP/m³ purín para el P. Es decir, el nutriente limitante es el nitrógeno, pero prácticamente no hay diferencia.

En cuarto lugar, para las cargas evitadas de gas natural se selecciona un gas natural con la composición y propiedades mostradas en la Tabla 95.

Tabla 95. Composición y propiedades gas natural (Ulbig and Hoburg, 2002).

Componente	%	Propiedades	
Metano	95,0	Densidad (kg/m ³)	0,753
Etano	2,1		
Propano	0,3	Poder calorífico (kcal/m ³)	9032
Nitrógeno	1,9		
Resto	0,7		

Como se sabe que el poder calorífico del biogás formado en el digestor anaerobio es de 21,5 MJ/m³, es necesario pasar este valor a las mismas unidades que presenta el gas natural en la Tabla 95 para poder compararlos. El poder calorífico del biogás es 5135 kcal/m³ de biogás. Por lo tanto, se generan 3367 kcal/m³ de purín. Esto quiere decir que se evitan 0,28 kg de gas natural por cada m³ de purín.



A.6 Evaluación de impacto del ciclo de vida

En este anexo se recogen los valores obtenidos a partir del software SimaPro.

A.6.1 Infraestructura

Se muestran en la Tabla 96 los valores obtenidos para cada categoría de impacto para las infraestructuras de la alternativa 1 y 2.

Tabla 96. Valores de las categorías de impacto para la infraestructura de las alternativas 1 y 2.

Categoría de impacto	Unidad	Alternativa 1_Montaje	Alternativa 2_Montaje
Cancerígenas	kg C ₂ H ₃ Cl eq	1,30E+03	9,56E+03
No cancerígenas	kg C ₂ H ₃ Cl eq	3,33E+03	1,66E+04
Inorgánicas respirables	kg PM2.5 eq	4,99E+02	2,17E+03
Radiación ionizante	Bq C-14 eq	1,37E+06	5,52E+07
Destrucción de la capa de ozono	kg CFC-11 eq	2,50E-02	2,15E-01
Orgánicas respirables	kg C ₂ H ₄ eq	2,14E+02	7,18E+02
Ecotoxicidad acuática	kg TEG water	1,96E+07	1,21E+08
Ecotoxicidad terrestre	kg TEG soil	3,79E+05	5,31E+07
Acidificación y eutrofización terrestre	kg SO ₂ eq	1,01E+04	5,60E+04
Uso del suelo	m ² org.arable	9,66E+05	5,56E+06
Acidificación acuática	kg SO ₂ eq	2,06E+03	1,07E+04
Eutrofización acuática	kg PO ₄ P-lim	1,62E+01	1,93E+02
Calentamiento global	kg CO ₂ eq	2,52E+05	4,61E+06

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.

Tabla 96. (Continuación)

Categoría de impacto	Unidad	Alternativa 1_Montaje	Alternativa 2_Montaje
Energías no renovables	MJ primary	7,12E+06	4,74E+07
Extracción de minerales	MJ surplus	4,11E+02	4,72E+05

Se muestran en la Tabla 97 los valores obtenidos para cada categoría de daño para las infraestructuras de la alternativa 1 y 2.

Tabla 97. Valores de las categorías de impacto para la infraestructura de las alternativas 1 y 2.

Categoría de daño	Unidad	Alternativa 1_Montaje	Alternativa 2_Montaje
Salud humana	DALY	3,63E-01	1,61E+00
Calidad de los ecosistemas	PDF*m ² *yr	1,07E+06	6,54E+06
Cambio climático	kg CO ₂ eq	2,52E+05	4,61E+06
Recursos	MJ primary	7,12E+06	4,78E+07

Se muestran en la Tabla 98 la normalización de las categorías de impacto para las infraestructuras de las alternativas 1 y 2.

Tabla 98. Normalización de las categorías de impacto para la infraestructura de las alternativas 1 y 2.

Categoría de impacto	Alternativa 1_Montaje	Alternativa 2_Montaje
Cancerígenas	5,13E-01	3,77E+00
No cancerígenas	1,31E+00	6,56E+00
Inorgánicas respirables	4,92E+01	2,14E+02
Radiación ionizante	4,05E-02	1,63E+00
Destrucción de la capa de ozono	3,70E-03	3,19E-02
Orgánicas respirables	6,43E-02	2,16E-01

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.

Tabla 98. (Continuación).

Categoría de impacto	Alternativa 1_Montaje	Alternativa 2_Montaje
Ecotoxicidad acuática	7,18E-02	4,43E-01
Ecotoxicidad terrestre	2,19E-01	3,07E+01
Acidificación y eutrofización terrestre	7,64E-01	4,25E+00
Uso del suelo	7,69E+01	4,42E+02
Acidificación acuática	0,00E+00	0,00E+00
Eutrofización acuática	0,00E+00	0,00E+00
Calentamiento global	2,54E+01	4,65E+02
Energías no renovables	4,69E+01	3,12E+02
Extracción de minerales	2,70E-03	3,11E+00

A.6.2 Alternativa 1

Se representan en la Tabla 99 las categorías de impacto de la categoría de daño a la salud humana para la alternativa 1.

Tabla 99. Las categorías de impacto de la categoría de daño a la salud humana para la alternativa 1.

Categoría de impacto	Cancerígena	No cancerígena	Inorgánicas respirables	Radiación ionizante	Destrucción de la capa de ozono	Orgánicas respirables
Unidad	kg C ₂ H ₃ Cl eq	kg C ₂ H ₃ Cl eq	kg PM _{2.5} eq	Bq C-14 eq	kg CFC-11 eq	kg C ₂ H ₄ eq
Total	1,22E+01	3,71E+02	5,77E-02	-7,04E+01	-4,67E-07	1,54E-02
Alternativa 1_Montaje	1,92E-04	4,91E-04	7,36E-05	2,02E-01	3,69E-09	3,16E-05
Almacenamiento interno del purín	0,00E+00	1,61E-03	6,54E-03	0,00E+00	0,00E+00	2,59E-03
Almacenamiento externo del purín	0,00E+00	4,02E-03	1,63E-02	0,00E+00	0,00E+00	1,12E-02
Transporte del purín a las balsas	5,07E-03	3,48E-02	2,21E-03	1,34E+01	3,60E-07	9,12E-04

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.

Se representan en la Tabla 100 las categorías de impacto de la categoría de daño a la calidad de los ecosistemas para la alternativa 1.

Tabla 100. Las categorías de impacto de la categoría de daño a la calidad de los ecosistemas para la alternativa 1.

Categoría de impacto	Ecotoxicidad acuática	Ecotoxicidad terrestre	Acidificación y eutrofización terrestre	Uso del suelo	Acidificación acuática	Eutrofización acuática
Unidad	kg TEG water	kg TEG soil	kg SO ₂ eq	m ² org.arable	kg SO ₂ eq	kg PO ₄ P-lim
Total	1,42E+06	9,09E+05	6,41E+00	-1,99E+00	7,37E-01	-2,02E-02
Alternativa 1_Montaje	2,89E+00	5,60E-02	1,48E-03	1,43E-01	3,04E-04	2,39E-06
Almacenamiento interno del purín	1,23E-01	3,09E-01	5,88E-01	0,00E+00	7,41E-02	0,00E+00
Almacenamiento externo del purín	3,07E-01	7,71E-01	1,47E+00	0,00E+00	1,85E-01	0,00E+00
Transporte del purín a las balsas	1,36E+02	1,58E+02	5,74E-02	7,89E-02	9,34E-03	1,56E-04
Aplicación del purín como fertilizante orgánico	1,42E+06	9,09E+05	4,29E+00	-2,21E+00	4,68E-01	-2,04E-02

Se representan en la Tabla 101 las categorías de impacto de las categorías de daño a los recursos y cambio climático para la alternativa 1.

Tabla 101. Las categorías de impacto de las categorías de daño a los recursos y cambio climático para la alternativa 1.

Categoría de impacto	Energías no renovables	Extracción de minerales	Calentamiento global
Unidad	MJ primary	MJ surplus	kg CO ₂ eq
Total	-8,24E+01	-7,34E-01	3,11E+01

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.

Tabla 101. (Continuación)

Categoría de impacto	Energías no renovables	Extracción de minerales	Calentamiento global
Alternativa 1_Montaje	1,05E+00	6,06E-05	3,72E-02
Almacenamiento interno del purín	0,00E+00	0,00E+00	5,01E+00
Almacenamiento externo del purín	0,00E+00	0,00E+00	1,85E+01
Transporte del purín a las balsas	3,02E+01	2,30E-03	1,85E+00
Aplicación del purín como fertilizante orgánico	-1,14E+02	-7,36E-01	5,69E+00

Se representan en la Tabla 102 las categorías de daño para la alternativa 1.

Tabla 102. Las categorías de daño para la alternativa 1.

Categoría de daño	Salud humana	Calidad de los ecosistemas	Cambio climático	Recursos
Unidad	DALY	PDF*m ² *yr	kg CO ₂ eq	MJ primary
Total	1,11E-03	7,27E+03	3,11E+01	-8,32E+01
Alternativa 1_Montaje	5,35E-08	1,57E-01	3,72E-02	1,05E+00
Almacenamiento interno del purín	4,59E-06	6,14E-01	5,01E+00	0,00E+00
Almacenamiento externo del purín	1,15E-05	1,53E+00	1,85E+01	0,00E+00
Transporte del purín a las balsas	1,66E-06	1,41E+00	1,85E+00	3,02E+01
Aplicación del purín como fertilizante orgánico	1,10E-03	7,26E+03	5,69E+00	-1,14E+02

Se representan en la Tabla 103 la normalización de las categorías de impacto de la categoría de daño a la salud humana para la alternativa 1.

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.

Tabla 103. Normalización de las categorías de impacto de la categoría de daño a la salud humana para la alternativa 1.

Categoría de impacto	Cancerígena	No cancerígena	Inorgánicas respirables	Radiación ionizante	Destrucción de la capa de ozono	Orgánicas respirables
Total	4,82E-03	1,46E-01	5,72E-03	-2,05E-06	-6,51E-08	4,65E-06
Alternativa 1_Montaje	7,57E-08	1,94E-07	7,26E-06	5,98E-09	5,46E-10	9,49E-09
Almacenamiento interno del purín	0,00E+00	6,35E-07	6,45E-04	0,00E+00	0,00E+00	7,78E-07
Almacenamiento externo del purín	0,00E+00	1,59E-06	1,61E-03	0,00E+00	0,00E+00	3,37E-06
Transporte del purín a las balsas	2,16E-06	1,48E-05	2,35E-04	4,28E-07	5,74E-08	2,95E-07
Aplicación del purín como fertilizante orgánico	4,82E-03	1,46E-01	3,22E-03	-2,49E-06	-1,23E-07	1,97E-07

Se representan en la Tabla 104 la normalización la categoría de daño a la calidad de los ecosistemas para la alternativa 1.

Tabla 104. Normalización de las categorías de impacto de la categoría de daño a la calidad de los ecosistemas la alternativa 1.

Categoría de impacto	Ecotoxicidad acuática	Ecotoxicidad terrestre	Acidificación y eutrofización terrestre	Uso del suelo	Acidificación acuática	Eutrofización acuática
Total	5,19E-03	5,25E-01	4,87E-04	-1,58E-04	0,00E+00	0,00E+00
Alternativa 1_Montaje	1,06E-08	3,23E-08	1,13E-07	1,13E-05	0,00E+00	0,00E+00
Almacenamiento interno del purín	4,50E-10	1,78E-07	4,46E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Almacenamiento externo del purín	1,13E-09	4,45E-07	1,12E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Transporte del purín a las balsas	5,35E-07	9,85E-05	4,69E-06	6,76E-06	0,00E+00	0,00E+00

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.

Tabla 104. (Continuación)

Categoría de impacto	Ecotoxicidad acuática	Ecotoxicidad terrestre	Acidificación y eutrofización terrestre	Uso del suelo	Acidificación acuática	Eutrofización acuática
Aplicación del purín como fertilizante orgánico	5,19E-03	5,25E-01	3,26E-04	-1,76E-04	0,00E+00	0,00E+00

Se representan en la Tabla 105 la normalización de las categorías de impacto de las categorías de daño a los recursos y cambio climático para la alternativa 1.

Tabla 105. Normalización de las categorías de impacto de las categorías de daño a los recursos y cambio climático para la alternativa 1.

Categoría de impacto	Calentamiento global	Energías no renovables	Extracción de minerales
Total	3,16E-03	-5,27E-04	-4,83E-06
Alternativa 1_Montaje	3,75E-06	6,91E-06	3,99E-10
Almacenamiento interno del purín	5,06E-04	0,00E+00	0,00E+00
Almacenamiento externo del purín	1,87E-03	0,00E+00	0,00E+00
Transporte del purín a las balsas	2,01E-04	2,14E-04	1,63E-08
Aplicación del purín como fertilizante orgánico	5,74E-04	-7,48E-04	-4,84E-06

A.6.3 Alternativa 2

Se representan en la Tabla 106 las categorías de impacto de la categoría de daño a la salud humana para la alternativa 2.

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.

Tabla 106. Las categorías de impacto de la categoría de daño a la salud humana para la alternativa 2.

Categoría de impacto	Cancerígena	No cancerígena	Inorgánicas respirables	Radiación ionizante	Destrucción de la capa de ozono	Orgánicas respirables
Unidad	kg C ₂ H ₃ Cl eq	kg C ₂ H ₃ Cl eq	kg PM _{2.5} eq	Bq C-14 eq	kg CFC-11 eq	kg C ₂ H ₄ eq
Total	1,41E-01	9,15E-01	2,31E-02	3,33E+02	4,21E-06	4,61E-03
Alternativa 2_Montaje	1,41E-03	2,45E-03	3,20E-04	8,14E+00	3,18E-08	1,06E-04
Almacenamiento interno del purín	0,00E+00	1,61E-03	6,54E-03	0,00E+00	0,00E+00	2,59E-03
Transporte del purín al tanque de dilución	9,92E-03	6,82E-02	4,32E-03	2,63E+01	7,05E-07	1,78E-03
Tanque de dilución	1,96E-03	6,70E-04	1,71E-04	6,39E+00	1,89E-08	1,37E-05
Planta de tratamiento	3,64E-02	1,25E-02	3,18E-03	1,19E+02	3,52E-07	2,55E-04
Deshidratación	1,19E-02	4,09E-03	1,04E-03	3,90E+01	1,15E-07	8,33E-05
Pretratamiento	1,00E-01	2,60E-02	2,34E-03	7,18E+01	9,22E-07	6,13E-04
Hidrólisis enzimática	5,61E-04	1,92E-04	7,01E-04	1,83E+00	5,42E-09	1,10E-03
Centrifugación	1,58E-03	5,40E-04	1,38E-04	5,16E+00	1,52E-08	1,10E-05
Neutralización	6,22E-02	3,64E-02	8,10E-03	5,70E+01	2,18E-06	4,69E-04
Ultrafiltración	-3,15E-02	1,77E-02	-3,53E-03	-6,62E+00	-1,02E-07	-1,27E-03
Fermentación	-4,57E-02	-1,91E-03	-3,12E-04	-2,68E-01	-1,03E-08	-1,03E-03
Digestión anaerobia	-4,15E-02	-4,85E-03	6,58E-05	5,26E+00	-2,10E-08	-1,10E-04
Aplicación del digestato	3,36E-02	7,51E-01	-1,92E-06	-1,20E-01	-1,75E-09	-2,10E-06

Se representan en la Tabla 107 las categorías de impacto de la categoría de daño a la calidad de los ecosistemas para la alternativa 2.

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.

Tabla 107. Las categorías de impacto de la categoría de daño a la calidad de los ecosistemas para la alternativa 2.

Categoría de impacto	Ecotoxicidad acuática	Ecotoxicidad terrestre	Acidificación y eutrofización terrestre	Uso del suelo	Acidificación acuática	Eutrofización acuática
Unidad	kg TEG water	kg TEG soil	kg SO ₂ eq	m ² org. arable	kg SO ₂ eq	kg PO ₄ P-lim
Total	1,09E+03	1,40E+03	8,16E-01	-2,80E+00	1,48E-01	5,41E-03
Alternativa 2_Montaje	1,78E+01	7,84E+00	8,27E-03	8,20E-01	1,58E-03	2,84E-05
Almacenamiento interno del purín	1,23E-01	3,09E-01	5,88E-01	0,00E+00	7,41E-02	0,00E+00
Transporte del purín al tanque de dilución	2,65E+02	3,10E+02	1,12E-01	1,54E-01	1,83E-02	3,05E-04
Tanque de dilución	4,94E+00	9,89E-01	2,67E-03	1,63E-03	9,24E-04	1,53E-05
Planta de tratamiento	9,20E+01	1,84E+01	4,97E-02	3,04E-02	1,72E-02	2,84E-04
Deshidratación	3,01E+01	6,02E+00	1,63E-02	9,94E-03	5,63E-03	9,30E-05
Pretratamiento	1,30E+02	3,28E+01	3,88E-02	3,06E-02	1,41E-02	4,53E-04
Hidrólisis enzimática	1,42E+00	2,83E-01	9,12E-03	4,67E-04	8,62E-03	5,13E-03
Centrifugación	3,98E+00	7,97E-01	2,15E-03	1,32E-03	7,45E-04	1,23E-05
Neutralización	1,73E+02	5,02E+01	7,37E-02	4,28E-02	2,22E-02	7,53E-04
Ultrafiltración	1,24E+01	1,28E+02	-8,17E-02	-3,89E+00	-1,33E-02	-1,10E-03
Fermentación	-1,04E+01	-2,47E+00	-6,78E-03	-2,12E-03	-1,91E-03	-5,43E-04
Digestión anaerobia	-9,94E+00	7,92E-01	1,86E-03	1,28E-03	-1,82E-04	7,51E-06
Aplicación del digestato como fertilizante orgánico	3,76E+02	8,50E+02	1,61E-03	-2,33E-03	1,21E-04	-1,99E-05

Se representan en la Tabla 108 las categorías de impacto de las categorías de daño a los recursos y cambio climático para la alternativa 2.

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.

Tabla 108. Las categorías de impacto de las categorías de daño a los recursos y cambio climático para la alternativa 2.

Categoría de impacto	Energías no renovables	Extracción de minerales	Calentamiento global
Unidad	MJ primary	MJ surplus	kg CO ₂ eq
Total	2,38E+02	9,28E-02	1,80E+01
Alternativa 2_Montaje	6,99E+00	6,97E-02	6,80E-01
Almacenamiento interno del purín	0,00E+00	0,00E+00	5,01E+00
Transporte del purín al tanque de dilución	5,90E+01	4,49E-03	3,61E+00
Tanque de dilución	2,81E+00	1,22E-04	1,34E-01
Planta de tratamiento	5,22E+01	2,27E-03	2,49E+00
Deshidratación	1,71E+01	7,42E-04	8,15E-01
Pretratamiento	5,52E+01	1,81E-02	2,60E+00
Hidrólisis enzimática	2,93E+01	3,49E-05	2,28E+00
Centrifugación	2,26E+00	9,82E-05	1,08E-01
Neutralización	5,25E+01	3,33E-03	3,71E+00
Ultrafiltración	-1,24E+01	-5,33E-03	-2,65E+00
Fermentación	-2,18E+01	-1,38E-04	-5,05E-01
Digestión anaerobia	-5,30E+00	9,14E-05	-3,10E-01
Aplicación del digestato como fertilizante orgánico	-1,92E-01	-7,76E-04	-4,05E-03

Se representan en la Tabla 109 las categorías de daño a la calidad de los ecosistemas y a los recursos para la alternativa 2.

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.

Tabla 109. Las categorías de daño a la calidad de los ecosistemas y a los recursos para la alternativa 2.

Categoría de daño	Salud humana	Calidad de los ecosistemas	Cambio climático	Recursos
Unidad	DALY	PDF*m ² *yr	kg CO ₂ eq	MJ primary
Total	1,92E-05	8,96E+00	1,80E+01	2,38E+02
Alternativa 2_Montaje	2,37E-07	9,65E-01	6,80E-01	7,06E+00
Almacenamiento interno del purín	4,59E-06	6,14E-01	5,01E+00	0,00E+00
Transporte del purín al tanque de dilución	3,25E-06	2,75E+00	3,61E+00	5,90E+01
Tanque de dilución	1,28E-07	1,26E-02	1,34E-01	2,81E+00
Planta de tratamiento	2,39E-06	2,35E-01	2,49E+00	5,22E+01
Deshidratación	7,81E-07	7,69E-02	8,15E-01	1,71E+01
Pretratamiento	2,01E-06	3,40E-01	2,60E+00	5,52E+01
Hidrólisis enzimática	4,95E-07	1,23E-02	2,28E+00	2,93E+01
Centrifugación	1,03E-07	1,02E-02	1,08E-01	2,26E+00
Neutralización	5,96E-06	5,29E-01	3,71E+00	5,25E+01
Ultrafiltración	-2,51E-06	-3,31E+00	-2,65E+00	-1,24E+01
Fermentación	-3,54E-07	-2,94E-02	-5,05E-01	-2,18E+01
Digestión anaerobia	-8,30E-08	9,09E-03	-3,10E-01	-5,30E+00
Aplicación del digestato como fertilizante orgánico	2,20E-06	6,74E+00	-4,05E-03	-1,92E-01

Se representan en la

Tabla 110 la normalización de las categorías de impacto de la categoría de daño a la salud humana para la alternativa 2.

Tabla 110. Normalización de las categorías de impacto de la categoría de daño a la salud humana para la alternativa 2.

Categoría de impacto	Cancerígena	No cancerígena	Inorgánicas respirables	Radiación ionizante	Destrucción de la capa de ozono	Orgánicas respirables
Alternativa 2_Montaje	5,57E-07	9,67E-07	3,16E-05	2,41E-07	4,71E-09	3,18E-08

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.

Tabla 110. (Continuación)

Categoría de impacto	Cancerígena	No cancerígena	Inorgánicas respirables	Radiación ionizante	Destrucción de la capa de ozono	Orgánicas respirables
Almacenamiento interno del purín	0,00E+00	6,35E-07	6,45E-04	0,00E+00	0,00E+00	7,78E-07
Transporte del purín al tanque de dilución	3,92E-06	2,69E-05	4,27E-04	7,78E-07	1,04E-07	5,36E-07
Tanque de dilución	7,73E-07	2,65E-07	1,68E-05	1,89E-07	2,80E-09	4,10E-09
Planta de tratamiento	1,44E-05	4,93E-06	3,14E-04	3,53E-06	5,22E-08	7,65E-08
Deshidratación	4,71E-06	1,61E-06	1,03E-04	1,15E-06	1,71E-08	2,50E-08
Pretratamiento	3,96E-05	1,02E-05	2,31E-04	2,13E-06	1,36E-07	1,84E-07
Hidrólisis enzimática	2,21E-07	7,58E-08	6,92E-05	5,43E-08	8,02E-10	3,30E-07
Centrifugación	6,23E-07	2,13E-07	1,36E-05	1,53E-07	2,26E-09	3,31E-09
Neutralización	2,46E-05	1,44E-05	8,00E-04	1,69E-06	3,23E-07	1,41E-07
Ultrafiltración	-1,24E-05	7,00E-06	-3,48E-04	-1,96E-07	-1,51E-08	-3,82E-07
Fermentación	-1,81E-05	-7,55E-07	-3,08E-05	-7,93E-09	-1,52E-09	-3,10E-07
Digestión anaerobia	-1,64E-05	-1,92E-06	6,49E-06	1,56E-07	-3,11E-09	-3,31E-08
Aplicación del digestato como fertilizante orgánico	1,33E-05	2,97E-04	-1,90E-07	-3,54E-09	-2,60E-10	-6,30E-10

Se representan en la Tabla 111 la normalización las categorías de impacto de la categoría de daño a la calidad de los ecosistemas para la alternativa 2.

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.

Tabla 111. Normalización de las categorías de impacto de la categoría de daño a la calidad de los ecosistemas para la alternativa 2.

Categoría de impacto	Ecotoxicidad acuática	Ecotoxicidad terrestre	Acidificación y eutrofización terrestre	Uso del suelo	Acidificación acuática	Eutrofización acuática
Alternativa 2_Montaje	6,53E-08	4,52E-06	6,28E-07	6,53E-05	0,00E+00	0,00E+00
Almacenamiento interno del purín	4,50E-10	1,78E-07	4,46E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Transporte del purín al tanque de dilución	9,73E-07	1,79E-04	8,52E-06	1,23E-05	0,00E+00	0,00E+00
Tanque de dilución	1,81E-08	5,71E-07	2,03E-07	1,30E-07	0,00E+00	0,00E+00
Planta de tratamiento	3,37E-07	1,06E-05	3,77E-06	2,42E-06	0,00E+00	0,00E+00
Deshidratación	1,10E-07	3,48E-06	1,23E-06	7,91E-07	0,00E+00	0,00E+00
Pretratamiento	4,75E-07	1,89E-05	2,95E-06	2,43E-06	0,00E+00	0,00E+00
Hidrólisis enzimática	5,19E-09	1,64E-07	6,92E-07	3,72E-08	0,00E+00	0,00E+00
Centrifugación	1,46E-08	4,60E-07	1,63E-07	1,05E-07	0,00E+00	0,00E+00
Neutralización	6,34E-07	2,90E-05	5,59E-06	3,41E-06	0,00E+00	0,00E+00
Ultrafiltración	4,55E-08	7,42E-05	-6,21E-06	-3,10E-04	0,00E+00	0,00E+00
Fermentación	-3,80E-08	-1,42E-06	-5,15E-07	-1,69E-07	0,00E+00	0,00E+00
Digestión anaerobia	-3,64E-08	4,57E-07	1,41E-07	1,02E-07	0,00E+00	0,00E+00
Aplicación del digestato como fertilizante orgánico	1,38E-06	4,91E-04	1,22E-07	-1,85E-07	0,00E+00	0,00E+00

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.

Se representan en la Tabla 112 la normalización de las categorías de impacto de las categorías de daño a los recursos y cambio climático para la alternativa 2.

Tabla 112. Normalización de las categorías de impacto de las categorías de daño a los recursos y cambio climático para la alternativa 2.

Categoría de impacto	Energías no renovables	Extracción de minerales	Calentamiento global
Alternativa 2_Montaje	4,60E-05	4,59E-07	6,87E-05
Almacenamiento interno del purín	0,00E+00	0,00E+00	5,06E-04
Transporte del purín al tanque de dilución	1,08E-03	8,23E-08	1,02E-03
Tanque de dilución	1,85E-05	8,02E-10	1,35E-05
Planta de tratamiento	3,44E-04	1,49E-08	2,52E-04
Deshidratación	1,12E-04	4,88E-09	8,24E-05
Pretratamiento	3,63E-04	1,19E-07	2,63E-04
Hidrólisis enzimática	1,93E-04	2,30E-10	2,30E-04
Centrifugación	1,49E-05	6,46E-10	1,09E-05
Neutralización	3,46E-04	2,19E-08	3,75E-04
Ultrafiltración	-8,16E-05	-3,51E-08	-2,68E-04
Fermentación	-1,43E-04	-9,11E-10	-5,10E-05
Digestión anaerobia	-3,49E-05	6,02E-10	-3,13E-05
Aplicación del digestato como fertilizante orgánico	-1,26E-06	-5,10E-09	-4,09E-07

A.6.4 Comparación alternativas 1 y 2

Se muestran en la Tabla 113 los valores obtenidos para cada categoría de impacto para las infraestructuras de la alternativa 1 y 2.

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.



Tabla 113. Valores de las categorías de impacto para las alternativas 1 y 2.

Categoría de impacto	Unidad	Alternativa 1	Alternativa 2
Cancerígenas	kg C ₂ H ₃ Cl eq	1,22E+01	1,41E-01
No cancerígenas	kg C ₂ H ₃ Cl eq	3,71E+02	9,15E-01
Inorgánicas respirables	kg PM2.5 eq	5,77E-02	2,31E-02
Radiación ionizante	Bq C-14 eq	-7,04E+01	3,33E+02
Destrucción de la capa de ozono	kg CFC-11 eq	-4,67E-07	4,21E-06
Orgánicas respirables	kg C ₂ H ₄ eq	1,54E-02	4,61E-03
Ecotoxicidad acuática	kg TEG water	1,42E+06	1,09E+03
Ecotoxicidad terrestre	kg TEG soil	9,09E+05	1,40E+03
Acidificación y eutrofización terrestre	kg SO ₂ eq	6,41E+00	8,16E-01
Uso del suelo	m ² org.arable	-1,99E+00	-2,80E+00
Acidificación acuática	kg SO ₂ eq	7,37E-01	1,48E-01
Eutrofización acuática	kg PO ₄ P-lim	-2,02E-02	5,41E-03
Calentamiento global	kg CO ₂ eq	3,11E+01	1,80E+01
Energías no renovables	MJ primary	-8,24E+01	2,38E+02
Extracción de minerales	MJ surplus	-7,34E-01	9,28E-02

Se muestran en la Tabla 114 los valores obtenidos para cada categoría de daño para las alternativas 1 y 2.

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.

Tabla 114. Valores de las categorías de daño para las alternativas 1 y 2.

Categoría de daño	Unidad	Alternativa 1	Alternativa 2
Salud humana	DALY	1,11E-03	2,50E-05
Calidad de los ecosistemas	PDF*m ² *yr	7,27E+03	1,39E+01
Cambio climático	kg CO ₂ eq	3,13E+01	2,44E+01
Recursos	MJ primary	-8,09E+01	3,43E+02

Se muestran en la Tabla 115 la normalización de las categorías de impacto para las alternativas 1 y 2.

Tabla 115. Normalización de las categorías de impacto para las alternativas 1 y 2.

Categoría de impacto	Alternativa 1	Alternativa 2
Cancerígenas	4,82E-03	5,57E-05
No cancerígenas	1,46E-01	3,61E-04
Inorgánicas respirables	5,70E-03	2,28E-03
Radiación ionizante	-2,08E-06	9,86E-06
Destrucción de la capa de ozono	-6,92E-08	6,23E-07
Orgánicas respirables	4,63E-06	1,38E-06
Ecotoxicidad acuática	5,19E-03	3,98E-06
Ecotoxicidad terrestre	5,25E-01	8,11E-04
Acidificación y eutrofización terrestre	4,87E-04	6,19E-05
Uso del suelo	-1,58E-04	-2,23E-04
Acidificación acuática	0,00E+00	0,00E+00
Eutrofización acuática	0,00E+00	0,00E+00
Calentamiento global	3,14E-03	1,82E-03
Energías no renovables	-5,42E-04	1,56E-03
Extracción de minerales	-4,83E-06	6,11E-07

Evaluación ambiental mediante ACV del tratamiento de purín porcino con microalgas, para su valorización en biorrefinería.