



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**Estudio ambiental mediante ACV de la valorización como
biofertilizante de la biomasa algal cultivada en aguas residuales de
explotaciones porcinas.**

Autor: D. Pablo Germán Arauzo
Tutores: D. Rubén Irusta Mata
Dña. Silvia Bolado Rodríguez

Valladolid, 7 de septiembre, 2022



RESUMEN

En el presente trabajo se ha realizado un análisis del ciclo de vida (ACV) de la valorización como biofertilizante de la biomasa obtenida tras realizar un tratamiento mediante microalgas a los purines obtenidos de diferentes explotaciones porcinas. En él se han contabilizado todas las emisiones, procesos y materiales utilizados desde el momento en que el purín es deyectado por el cerdo hasta que la biomasa es aplicada al suelo.

Para la realización de este ACV se ha utilizado el software SimaPro 8 y el método de evaluación de impacto IMPACT 2002+. La característica de este método es que divide el impacto ambiental en 4 categorías principales de daño y en 15 categorías de impacto. Los resultados que se han obtenido se han analizado en las 15 categorías, para así poder determinar cómo se veía afectado cada uno.

Finalmente, se han comparado los resultados con dos casos de estudio en los que también se realizaba un análisis del ciclo de vida para un tratamiento con microalgas y, además, se han realizado 3 análisis de sensibilidad en los que se ha estudiado la influencia de la electricidad, del almacenamiento del purín y del tiempo de retención hidráulico.

SUMMARY

In this work, a life cycle analysis (LCA) of the valorisation as a biofertiliser of the biomass obtained after treatment with microalgae of the slurry obtained from different pig farms has been carried out. All emissions, processes and materials used from the moment the slurry is dejected by the pig until the biomass is applied to the soil have been accounted for.

The LCA was carried out using SimaPro 8 software and the IMPACT 2002+ impact assessment method. The characteristic of this method is that it divides the environmental impact into 4 main damage categories and 15 impact categories. The results obtained were analysed in the 15 categories in order to determine how each one was affected.

Finally, the results were compared with two case studies in which a life cycle analysis was also carried out for a microalgae treatment and, in addition, 3 sensitivity analyses were carried out in which the influence of electricity, slurry storage and hydraulic retention time were studied.



ÍNDICE

1. MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN	1
2. OBJETIVO	2
3. INTRODUCCIÓN	3
4. MÉTODOS	5
4.1. OBJETIVO Y ALCANCE DEL ACV	5
4.2. ANÁLISIS DE INVENTARIO	8
4.2.1. Características del purín	9
4.2.2. Tratamiento biológico con microalgas	10
4.2.3. Consumos eléctricos	11
4.2.4. Consumos de fondo	11
4.2.5. Emisiones	15
4.2.6. Cargas evitadas de fertilizante químico	19
4.2.7. Análisis de ciclo de vida de referencia	20
4.3. EVALUACIÓN DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA	20
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	23
5.1. ANÁLISIS DE EVALUACIONES DE DAÑO	24
5.2. CATEGORÍAS DE IMPACTO	26
5.2.1. Carcinógenos	28
5.2.2. No-carcinógenos	29
5.2.3. Efectos respiratorios por sustancias inorgánicas	29
5.2.4. Radiación ionizante	30
5.2.5. Destrucción de la capa de ozono	31
5.2.6. Efectos respiratorios por sustancias orgánicas	31
5.2.7. Ecotoxicidad acuática	32
5.2.8. Ecotoxicidad terrestre	33
5.2.9. Acidificación/eutrofización terrestre	34
5.2.10. Ocupación de terreno	35
5.2.11. Acidificación acuática	36
5.2.12. Eutrofización acuática	37
5.2.13. Calentamiento global	37
5.2.14. Energía no renovable	38
5.2.15. Extracción de minerales	39
5.3. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	40
5.4. INFLUENCIA DE LA INFRAESTRUCTURA	42
5.5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	42
5.5.1. Análisis electricidad	42



5.5.2. Almacenamiento del purín	44
5.5.3. Influencia del tiempo de retención hidráulico (TRH)	45
6. CONCLUSIÓN.....	47
7. BIBLIOGRAFÍA.....	48
ANEXO I. BALANCE DE MATERIA	53
ANEXO II. CÁLCULO ELECTRICO.....	59
II.I. CÁLCULO BOMBEO.....	59
II.II. MEZCLADOR.....	60
II.III. CENTRÍFUGA	61
ANEXO III. CÁLCULO MATERIALES CONSTRUCCIÓN	62
III.I. Balsa de Almacenamiento de Purín	62
III.II. Balsa de Dilución.....	63
III.III. THIN LAYER	63
III.IV. CENTRÍFUGA.....	64
III.V. BOMBAS.....	64
III.VI. CISTERNA ALMACENAMIENTO BIOMASA	64
ANEXO IV. CÁLCULO DE EMISIONES	66
IV.I. ALMACENAMIENTO PURÍN	66
IV.II. ALMACENAMIENTO BIOMASA	69
IV.III. APLICACIÓN AL SUELO	69
ANEXO V. CARGAS EVITADAS.....	72
ANEXO VI. RESUMEN INVENTARIO.....	75



1. MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN

Durante el máster y, más concretamente, en la asignatura “Herramientas de Gestión Sostenible”, se realizó un Análisis del Ciclo de Vida (ACV) de una planta de tratamiento de aguas residuales con el programa informático SimaPro. Nada más conocerlo me resultó un tema muy interesante ya que cumplía con mis intereses acerca del cuidado y mantenimiento del medio ambiente y, además, creía que era un trabajo muy interesante para mi futuro y para ampliar mi conocimiento.

Igualmente, realizar el trabajo con mi compañero Alberto Manuel Ruiz González también ha supuesto un ayuda a la hora de realizarlo. Él, al igual que yo, pensó en hacer el TFM sobre un ACV lo que ha supuesto un aprendizaje mayor a la hora de trabajar en grupo y coordinarnos para ayudarnos mutuamente.



2. OBJETIVO

El objetivo principal de este trabajo es realizar un análisis acerca del impacto al medioambiente que tiene un tratamiento de aguas residuales de explotaciones porcinas con microalgas y la posterior aplicación de la biomasa obtenida al terreno. Además de este objetivo principal, se han planteado otra serie de objetivos secundarios:

- Definir las etapas del proceso y el alcance del sistema.
- Plantear un balance de materia que cumpliera con la legislación de vertido y con la idea de tratamiento.
- Determinar la planta que iba a tratar esa agua residual, al igual que su ubicación y las granjas que iban a alimentar a la planta.
- Calcular las emisiones generadas durante todo el proceso de tratamiento con ayuda del software SimaPro 8.
- Realizar un análisis de sensibilidad.
- Calcular la energía necesaria para realizar el tratamiento.



3. INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la población mundial en las últimas décadas sumado a los cada vez menores recursos para obtener alimento supone un problema muy grande a escala mundial. Este aumento de la población conlleva un aumento en la producción de diferentes materiales y, teniendo en cuenta que el terreno cultivable es cada vez menor, hace que la producción ganadera tenga que aumentar. La Unión Europea produce en torno al 17% de toda la carne de cerdo a nivel global, lo que significa que es el segundo mayor productor de este alimento solo por detrás de China (Tres3, 2019).

Además de los problemas medioambientales que acarrearán estos animales por todo el alimento y espacio que necesitan, generan un problema todavía mayor, los purines. Estos purines suponen un problema muy grande al medioambiente y, debido a que estas granjas generalmente se encuentran concentradas en zonas muy concretas, potencian este problema allí donde se ubican. Concretamente, en el municipio de Cuéllar (Segovia, Castilla y León, España), donde se ha ubicado el presente trabajo, ocurre esa problemática. La provincia de Segovia concreta a más de 100 granjas distribuidas de manera diferente por su provincia, siendo este municipio uno de los más importantes (acueducto2.com, 2020).

Los purines suponen un problema real y muy importante en determinadas zonas de España. Históricamente estos se han usado directamente como fertilizantes, aplicándolos directamente en el suelo, sin embargo, esta técnica genera problemas muy graves en el suelo y en las aguas subterráneas debido a la alta concentración en nitrógeno que tienen. Este problema ha llegado al punto de que una parte importante de la población de una determinada zona se ha visto afectada llegando al punto de no poder utilizar el agua del grifo (El Norte de Castilla, 2019). Por tanto, la técnica de aplicarlo directamente no es una solución.

Son varias las tecnologías que se pueden utilizar para realizar el tratamiento de los purines generados en estas granjas (Condorchem Envitech, n.d.):

- La primera de ellas es la que se ha comentado anteriormente y es no realizar ningún tratamiento y aplicarla al terreno directamente. Esta técnica solo es posible a muy pequeña escala, sin embargo, a escala industrial es inviable.
- Otra técnica, pero que tampoco es viable, es el secado térmico directo. Esta técnica consigue secar los purines mediante calor tras quemar gas. Con este purín secado lo que se realiza es un compostaje posterior para posteriormente utilizar el compost como biofertilizante.
- Una técnica más usada es el tratamiento biológico aerobio combinado con un tratamiento físico-químico. Debido a la relación de DBO5/DQO (entre 0,2 y 0,4) y la elevada relación entre el nitrógeno y el carbono hace que solo el proceso



aerobio no sea suficiente para tratar el purín, por lo que hay que aplicarle un tratamiento físico-químico.

- La alternativa más común es el tratamiento de biometanización y evaporación del digestato. Debido a la baja concentración de materia orgánica en los purines, para conseguir un mejor resultado, es mejor mezclarlos con otro residuo que contenga una gran cantidad de materia carbonosa. Como resultado de esta técnica se obtiene una fracción sólida, estabilizada e higienizada, ideal para utilizar directamente en el terreno; una fracción líquida (digestato) que tras un tratamiento de evaporación, se puede separar el agua limpia de un residuo concentrado que se puede usar como biofertilizante; por último, se obtiene también una fracción gaseosa, biogás, la cual puede utilizarse como biocombustible en un proceso de cogeneración en el cual se produzca tanto calor como electricidad.
- Finalmente, la última técnica es tratar estos purines mediante un tratamiento con microalgas. Estos microorganismos crecen alimentándose a base del purín en un medio en el cual el purín se encuentra muy diluido en agua. Tras realizarse este tratamiento, la salida del reactor se centrifuga para separar el agua de la biomasa, la cual se utiliza como biofertilizante.

La técnica empleada en el presente trabajo ha sido la última, la correspondiente al tratamiento con microalgas. Mediante esta técnica se obtiene una biomasa rica en nitrógeno, principalmente, pero también en fósforo y otros nutrientes. Sin embargo, nunca un biofertilizante va a tener las propiedades que tiene un fertilizante químico. Pese a esto, ambientalmente resulta mejor utilizar el biofertilizante porque de esta forma se transforma un residuo en materia prima.

A la hora de aplicar este biofertilizante en el suelo hay que tener en cuenta que Cuéllar está catalogado dentro de una zona vulnerable limitando así a una aplicación máxima de 170 kilogramos de nitrógeno por hectárea y año. Esto significa que esta zona es vulnerable a la contaminación de las aguas por nitratos procedentes de fuentes de origen agrícola y ganadero. Esta denominación viene determinada en el Decreto 5/2020, de 25 de junio (BOCYL, 2020).

En este tratamiento también se producen emisiones atmosféricas (NH_3 , N_2O ...) y vertidos al agua y al suelo. Estos contaminantes generan diferentes problemas como pueden ser el calentamiento global, la eutrofización, toxicidad de los seres humanos o del medio, etc.

En este trabajo se han tenido en cuenta todas las emisiones asociadas al proceso de tratamiento mediante un Análisis del Ciclo de Vida (ACV).



4. MÉTODOS

4.1. OBJETIVO Y ALCANCE DEL ACV

El Análisis del Ciclo de Vida (ACV) tiene como función principal analizar el impacto ambiental causado por un producto o un proceso durante todo su ciclo de vida. En este caso se va a analizar mediante ACV la valorización como biofertilizante de la biomasa algal cultivada en aguas residuales de explotaciones porcinas con ayuda del software SimaPro 8, versión 8.3.0.0.

El ACV se encuentra definido dentro de la norma ISO 14040:2006 donde vienen descritos los principios (ISO, 2006a) y el marco de referencia para el ACV y la norma ISO 14044:2006 en la cual se especifican los requisitos y directrices para la realización del ACV (ISO, 2006b).

Para la realización de este análisis se han tenido en cuenta todas las entradas y salidas al sistema, además de las diferentes transformaciones y transportes dentro de éste. El alcance de este sistema aparece mostrado en la figura 1.

Descripción del “sistema de producto”: el estudio comprende todo el ciclo de vida del purín, desde que se genera hasta que se desecha convenientemente tratado. Es decir, desde que se produce la deyección del purín por parte de los cerdos en la granja hasta que el efluente tratado se vierte al medio receptor. Debe señalarse que en este proceso se obtiene también un co-producto, la biomasa cultivada que es necesario purgar. Por tanto, para determinar el impacto ambiental imputable exclusivamente al proceso de tratamiento del purín es necesario extraer el impacto ambiental correspondiente a la biomasa generada que puede ser empleada como biofertilizante. Esta asignación de cargas ambientales se ha realizado mediante el método de “expansión del sistema”, sustrayendo al impacto total del proceso de tratamiento del purín, acondicionamiento y aplicación de la biomasa, el impacto de la producción y aplicación de un fertilizante químico equivalente sustituido.

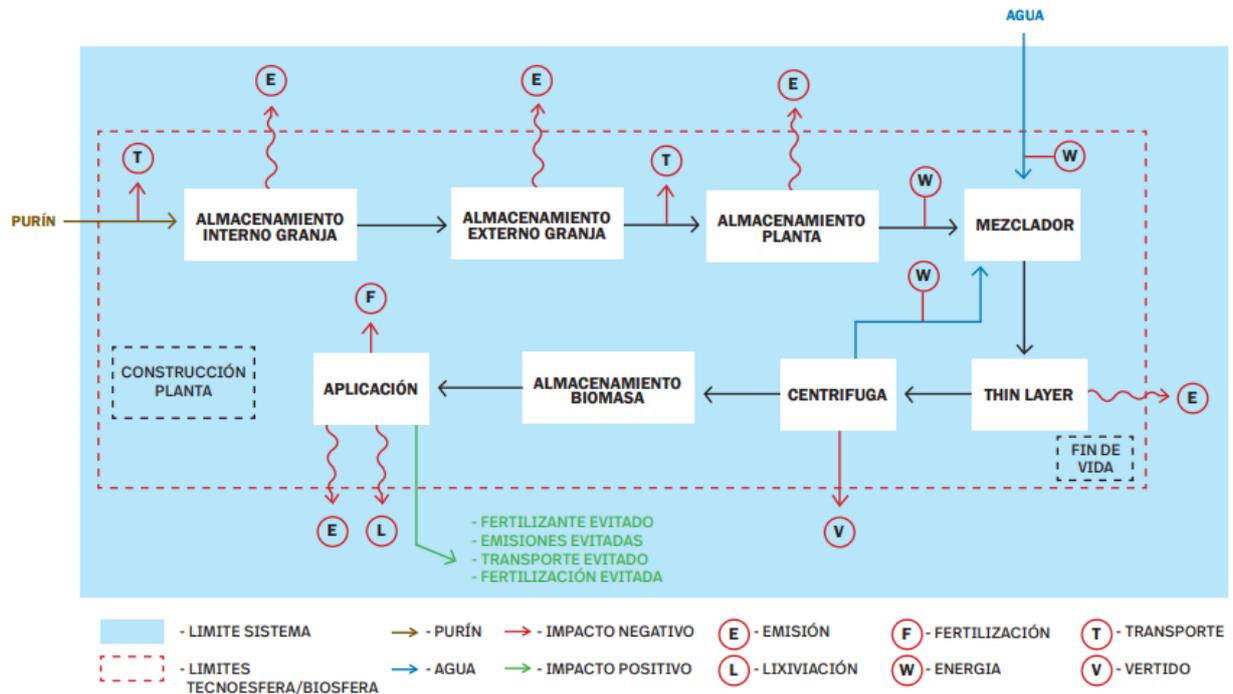


Figura 1. Diagrama alcance del sistema

Dentro del complejo de la granja se han tenido en cuenta los almacenamientos tanto internos como externos, obviándose los métodos empleados para el transporte de este purín dentro de las propias granjas. Posteriormente el purín se lleva a una planta de tratamiento centralizada mediante camiones cisterna, transporte que se ha contabilizado debido a su importancia y que aparecen mostradas en la tabla 1 las distancias aproximadas desde la planta de tratamiento a cada una de las explotaciones porcinas generadoras del purín. En esta parte se realiza el almacenamiento inicial hasta poder ser tratado, una vez pasa el tiempo de almacenamiento se diluye con agua en una balsa de dilución y esta mezcla pasa al fotobiorreactor de capa fina (thin-layer) donde se produce el tratamiento con microalgas. El cultivo de biomasa generado, que debe ser purgado, se centrifuga para separar el sólido del líquido, almacenando la biomasa parcialmente deshidratada obtenida para posteriormente aplicarla como biofertilizante. En el estudio se han contabilizado todas las emisiones a la atmósfera, al agua y al suelo, así como todos los materiales necesarios para construir las infraestructuras, así como las materias primas y los consumos eléctricos necesarios en la etapa de operación. Así mismo, se han tenido en cuenta los principales procesos de transporte involucrados y el acondicionamiento y aplicación de la biomasa como biofertilizante en unas zonas de cultivos próximas a las granjas de cerdos.



Tabla 1. Distancia desde las explotaciones porcinas hasta la planta de tratamiento (Google Maps, 2022)

GRANJAS	Distancia a planta de tratamiento (km)
Julia Cabrero Martín	5,2
Inversiones Ganaderas de Páramo	5,3
Diego Tejero Pascual	8,1
Sonlleva XXI S.L.	7,3
Torregutierrez	8,8
Los Albares	8,8
La Gabina, ESPJ	4,1
Sociedad Civil Pozuelo	6,9
Pinos Albos	10,9
Juan Antonio Nieto Montalvillo	12,8
El Cigüeñal	14,3

En la figura 2 se muestra un diagrama de bloques en el cual se muestran los procesos por los que se lleva a cabo el purín en la planta de tratamiento. Nada más salir del almacenamiento en la planta, el purín es bombeado a la llamada balsa de dilución en la cual se mezcla con una gran cantidad de agua limpia y una pequeña cantidad de agua recirculada del final del proceso hasta conseguir un 5% de dilución del purín (Collao et al., 2022). El porcentaje de agua recirculada varía según se decida, sin embargo, está limitada por las concentraciones finales del efluente debido a los límites de vertido. A pesar de ello, sí que interesa que la cantidad de agua recirculada sea lo más alta posible para disminuir al máximo posible la necesidad de agua limpia, por esta razón se ha realizado con un 30% de agua recirculada, ya que de esta manera sí cumplía con los límites de vertido de nitrógeno, debido a que era el limitante.

La razón por la que es necesario utilizar la menor cantidad de agua posible es que esta se trata de una materia prima. A diferencia del agua, el purín no considera como tal ya que se trata de un residuo y, al tratarlo, se está realizando una transformación con el objetivo de obtener un bien a cambio, por lo que no se considera como materia prima.

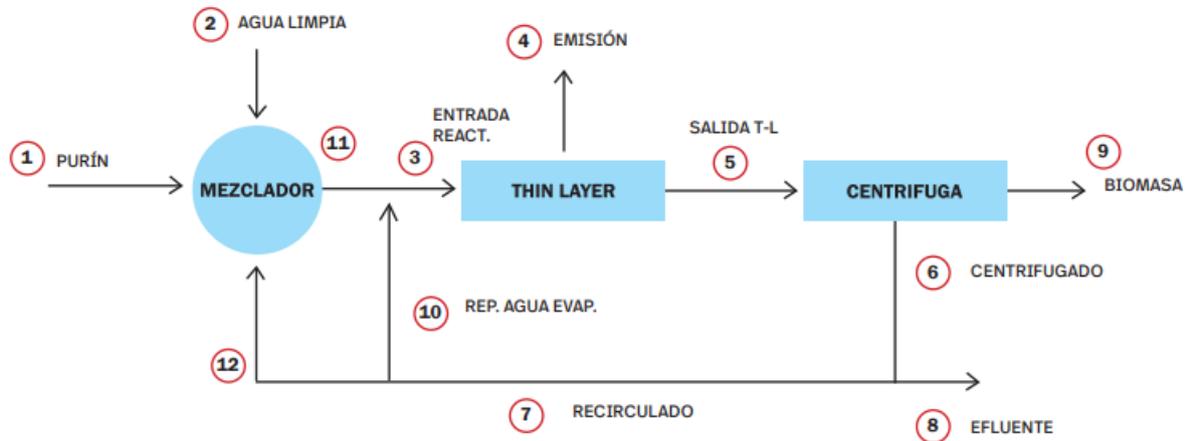


Figura 2. Diagrama de bloques

Por último, para llevar a cabo la asignación de cargas ambientales por el método de expansión del sistema, se han tenido en cuenta las cargas evitadas que produce el tratamiento. Esto es, la fabricación de fertilizante químico evitado, su transporte, su aplicación al terreno y las emisiones evitadas por la no aplicación de este.

Para la realización del estudio se ha adoptado como unidad funcional (UF) **1 m³ de purín no tratado**, ya que ésta es una unidad funcional ampliamente utilizada en otros estudios de ACV, lo que permitirá establecer algunas comparaciones con estos estudios.

4.2. ANÁLISIS DE INVENTARIO

Como ya se ha comentado, la planta se va a ubicar en el municipio de Cuéllar (Segovia), exactamente en las siguientes coordenadas: 41°23'09.2"N 4°19'05.2"W. La ubicación de esta planta ha sido elegida tras haber seleccionado previamente las granjas suministradoras de purín. Estas granjas aparecen mostradas en la tabla 1, así como su ubicación en la figura 3. Las granjas, así como su capacidad máxima de cerdos, han sido extraídos del inventario de instalaciones emisoras de contaminantes del Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes (PRTR) del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MTERD, n.d.). Como se observa el caudal tratado es de 75.546,7 m³ y el número máximo de cerdos es de 35.138. Para la obtención de este caudal se ha supuesto que cada cerdo produce, aproximadamente, 2,15 m³ de purín al año (Arza Ingeniería, 2015).

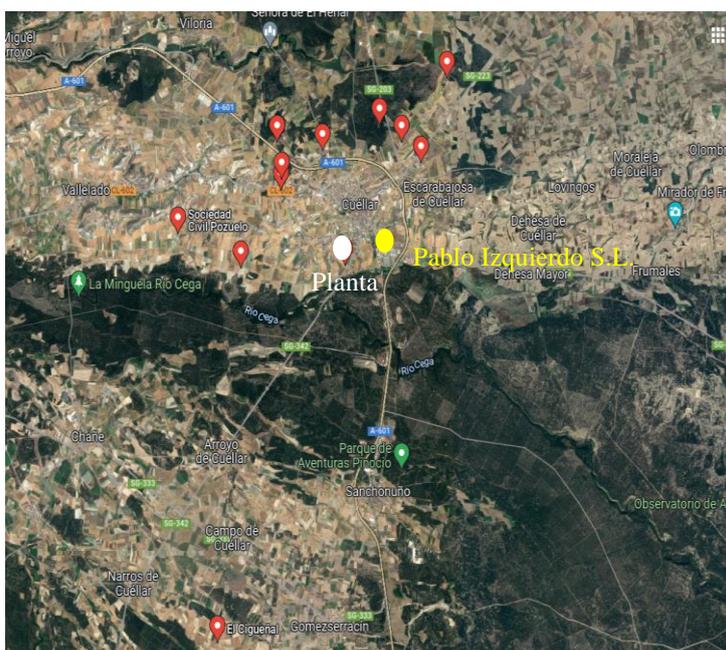


Figura 3. Ubicaciones de las granjas, de la planta de tratamiento y del proveedor de fertilizante químico

Tabla 2. Explotaciones porcinas incluidas en el estudio

GRANJAS	Cabezas de cerdo (Capacidad Máxima)	Purín producido (m ³ /año)
Julia Cabrero Martín	2460	5289
Inversiones Ganaderas de Páramo	3952	8497
Diego Tejero Pascual	3536	7602
Sonlleva XXI S.L.	3843	8262
Torregutierrez	2774	5964
Los Albares	4240	9116
La Gabina, ESPJ	2520	5418
Sociedad Civil Pozuelo	2344	5040
Pinos Albos	3500	7525
Juan Antonio Nieto Montalvillo	2609	5609
El Cigüeñal	3360	7224
TOTAL	35138	75547

4.2.1. Características del purín

Respecto a las concentraciones del purín de partida, se han obtenido de bibliografía (Collao et al., 2022) en la cual aparecen mostradas al 5% de dilución, por lo que se ha hecho la transformación a concentraciones puras. Los purines están siempre compuestos por una gran cantidad de materia orgánica y nutrientes, entre los que destacan el nitrógeno, el fósforo y el potasio. Para caracterizar el purín se ha buscado el valor de los sólidos totales suspendidos (SST), carbono orgánico total (COT), nitrógeno total (NT) y, por último, fósforo total (PT), además de la

concentración de otros nutrientes, metales pesados y medicamentos, ya que también se ha realizado el análisis para ellos debido a su importancia ambiental.

Tabla 3. Características purín

CARACTERIZACIÓN PURÍN		
Parámetro	Unidades	Purín fresco
SST ¹	mg/L	8400
COT ¹	mg/L	14260
NT ¹	mg/L	5120
TP ¹	mg/L	76
Arsénico ²	mg/L	0,12
Cadmio ³	mg/L	0,32
Cromo ⁴	mg/L	1,90
Cobre ³	mg/L	14,29
Plomo ³	mg/L	1,00
Manganeso ³	mg/L	22,62
Mercurio ²	mg/L	4 E-04
Niquel ⁴	mg/L	5,00
Zinc ³	mg/L	59,52
Calcio ³	mg/L	3900,00
Magnesio ³	mg/L	833,33
Cloro ³	mg/L	3095,24
Potasio ³	mg/L	3500,00
Sodio ³	mg/L	798,00
Boro ³	mg/L	36,91
Molibdeno ³	mg/L	0,33
Hierro ³	mg/L	190,48
Selenio ²	mg/L	0,04
Tetracycline ⁵	mg/L	143
Oxytetracycline ⁵	mg/L	191
Chlortetracycline ⁵	mg/L	55
Doxycycline ⁵	mg/L	37

1: (Collao et al., 2022)

2: (Casassas, 2004)

3: (ASAE, 2003)

4: (Valdecantos et al., 2002)

5: (Osorio et al., 2021)

4.2.2. Tratamiento biológico con microalgas

El purín, diluido al 5%, es tratado biológicamente mediante microalgas en un fotobiorreactor Thin-layer. La característica principal de este tipo de fotobiorreactores es que se trata de un reactor con una superficie muy grande y con una profundidad muy baja, con una pequeña pendiente que oscila entre el 1 y el 3 % (Acién Fernández



et al., 2013). La concentración del cultivo ha de ser muy baja para que la luz puede penetrar sin ningún problema para que las microalgas puedan realizar adecuadamente la fotosíntesis.

En cuanto al tiempo de retención hidráulico (TRH) se ha fijado en 3 días (Martín Juárez et al., 2016). La profundidad se ha fijado en 5 centímetros, lo que conduce a un área de fotobiorreactor de 12.419 m².

4.2.3. Consumos eléctricos

4.2.3.1. Consumo eléctrico del bombeo del purín y del agua

Los cálculos detallados de los consumos eléctricos aparecen mostrados en el anexo II. Para disminuir estos consumos se ha considerado que los movimientos dentro de la planta se producen por gravedad. Únicamente va a haber bombeo en la parte inicial del proceso: para llevar el purín desde la balsa de almacenamiento hasta la balsa de dilución, para captar el agua desde una acequia/canal exterior hasta la balsa y para subir el agua centrifugada desde el final del proceso hasta la balsa inicial. Los consumos son: 0,082 kWh/UF, 0,911 kWh/UF y 0,350 kWh/UF para el bombeo del purín, bombeo de agua y bombeo de agua recirculada, respectivamente.

4.2.3.2. Consumo eléctrico del mezclador

El purín, antes de introducirlo al reactor, es necesario diluirlo con una gran cantidad de agua. Este proceso se realiza en la llamada balsa de dilución. Para facilitar y mejorar esta mezcla es necesario introducir un mezclador en el fondo de la balsa. La potencia de esta máquina es de 2,2 kW (WAM Group, 2022). Respecto al tiempo de funcionamiento se supone que se activa el mezclador 30 minutos cada media hora, por lo que funciona durante 12 horas al día. El consumo de energía supone 0,128 kWh/UF.

4.2.3.3. Consumo de la bomba centrífuga

El último consumo eléctrico calculado para la planta es el de la bomba centrífuga para separar la biomasa del agua. Esta fase es una de las más importantes de la planta y de las que más consume, por lo que su importancia dentro de la planta es muy alta. La potencia del aparato seleccionado varía entre 132 kW y 355 kW dependiendo de lo que sea requerido. Para el cálculo se ha supuesto una potencia media de 243,5 kW, por lo que finalmente se consumen 28,235 kWh/UF.

4.2.4. Consumos de fondo

Los consumos de fondo son aquellos consumos que hay dentro de la planta y que son igual o más importantes que los eléctricos.



4.2.4.1. Producción de electricidad

La producción de electricidad seleccionada ha sido la de *voltage {ES}, market for, Alloc Def.*, especificada en la base de datos *Ecoinvent 3*. Este conjunto de datos describe la electricidad disponible en el nivel de media tensión en España. En este sistema están incluidas: las entradas de electricidad producidas en España y procedentes de importaciones y transformadas a media tensión, la red de transporte, las emisiones directas a la atmósfera y las pérdidas durante el transporte. A su vez, no tiene en cuenta: las pérdidas durante la transformación de alta a media tensión, las fugas de aceite aislante de los cables y equipos electrotécnicos y las emisiones de SF6 durante la producción y desmantelación de la subestación de control.

4.2.4.2. Materiales de construcción

En el Anexo III se encuentran en detalle las dimensiones de cada una de las infraestructuras presentes en la planta: balsa de almacenamiento de purín, tanque de dilución, fotobiorreactor thin layer y cisterna de almacenamiento de la biomasa. También se encuentra en este anexo los materiales de la diferente maquinaria: bombas, centrífuga y mezclador.

El material más empleado ha sido el hormigón ya que tanto el tanque en el que se realiza la dilución como el fotobiorreactor están fabricados con este material. Para ambos se ha supuesto un grosor de 0,1 m y una densidad de 1.400 kg/m³.

Además del hormigón, para la balsa de almacenamiento del purín el material empleado ha sido un plástico, en concreto el PEHD (*High Density Polyethylene*), y para la maquinaria los materiales han sido diferentes aceros. El material correspondiente a la cisterna de almacenamiento de la biomasa ha sido PVC (*Polyvinyl Chloride*).

Respecto al tiempo de vida de la planta de tratamiento se ha considerado de 25 años (Corominas et al., 2013).

En cuanto al tratamiento de los materiales una vez se han convertido en residuos se ha supuesto que el 80% del PVC y de los diferentes metales se recicla. Esto significa que, según la base de datos de SimaPro, por cada kg de estos materiales reciclados se evita la creación de un kg de este material. Esta es la razón por la que no se ha elegido el 100% de los kg que se utilizan. En cuanto a los materiales de obra, si bien es cierto que en muchos casos se recicla, esta base de datos no aparece en SimaPro, por lo que se ha optado por su aplicación en vertedero. Lógicamente esta acción supone un impacto negativo mucho mayor al que tendría reciclándose.



4.2.4.3. Transporte

El transporte supone un proceso crucial dentro del Análisis del Ciclo de Vida. Es por esto que la planta se ha ubicado en una zona cercana a las explotaciones porcinas con el objetivo de disminuir los kilómetros a recorrer por parte del camión. Todos los transportes se han realizado en un camión cisterna de 20.000 L de capacidad y, para el fertilizante químico, una furgoneta de máximo 3.500 kg.

En la tabla 4 aparecen mostrados los tkm/UF calculados para cada una de las granjas en base a la generación de purín de cada una de las explotaciones porcinas y el valor final para todas ellas. Estos valores corresponden al trayecto de ida y vuelta del camión desde la planta hasta las diferentes granjas para recoger el purín.

Tabla 4. Transporte de la UF de purín (Google Maps, 2022)

GRANJAS	tkm/UF
Julia Cabrero Martín	0,729
Inversiones Ganaderas de Páramo	1,192
Diego Tejero Pascual	1,634
Sonlleva XXI S.L.	1,6
Torregutierrez	1,393
Los Albares	2,124
La Gabina, ESPJ	0,588
Sociedad Civil Pozuelo	0,92
Pinos Albos	2,175
Juan Antonio Nieto Montalvillo	1,904
El Cigüeñal	2,74
	17,001

Respecto a la biomasa obtenida, solo se realiza un transporte al año debido a que la fertilización del terreno solo se va a hacer en una época del año. En la tabla 5 aparecen las toneladas-kilometro (tkm) del transporte de la biomasa desde la planta de tratamiento al terreno y, en la tabla 6, los tkm evitados debido al fertilizante químico evitado.

Tabla 5. Transporte de la biomasa parcialmente deshidratada (referido a la UF de purín)

GRANJAS	tkm/UF
Julia Cabrero Martín	0,013
Inversiones Ganaderas de Páramo	0,020
Diego Tejero Pascual	0,027
Sonlleva XXI S.L.	0,028
Torregutierrez	0,025
Los Albares	0,034
La Gabina, ESPJ	0,010
Sociedad Civil Pozuelo	0,017
Pinos Albos	0,037
Juan Antonio Nieto Montalvillo	0,031
El Cigüeñal	0,048
	0,290

Tabla 6. Transporte de fertilizante químico evitado (referido a la UF de purín)

GRANJAS	tkm/UF
Julia Cabrero Martín	0,000324
Inversiones Ganaderas de Páramo	0,000674
Diego Tejero Pascual	0,001005
Sonlleva XXI S.L.	0,000916
Torregutierrez	0,000534
Los Albares	0,001068
La Gabina, ESPJ	0,000445
Sociedad Civil Pozuelo	0,000623
Pinos Albos	0,001322
Juan Antonio Nieto Montalvillo	0,000788
El Cigüeñal	0,002467
	0,01017

Para el cálculo de estos tkm evitados por la no aplicación del fertilizante químico se ha tomado como proveedor de ellos la empresa Pablo Izquierdo S.L.

4.2.4.4. Aplicación sobre el terreno

Para la aplicación de la biomasa en el terreno se han seleccionado zonas colindantes a cada una de las granjas. El tamaño de estas zonas se supone proporcional al caudal de purín que aportan a la planta. Se ha realizado de esta forma ya que se trata del modo de operación típico en estas instalaciones. La superficie total disponible para fertilizar es de 79,58



ha, superficie de cultivo obtenida teniendo en cuenta el valor máximo de nitrógeno permitido legalmente aplicar de 170 kgN/(ha*año) (BOE, 1996) (BOCYL, 2018).

Tabla 7. Superficie cultivable necesaria para la aplicación de fertilizantes

GRANJAS	Superficie cultivable (ha/año)
Julia Cabrero Martín	5,57
Inversiones Ganaderas de Páramo	8,95
Diego Tejero Pascual	8,01
Sonlleva XXI S.L.	8,70
Torregutierrez	6,28
Los Albares	9,60
La Gabina, ESPJ	5,71
Sociedad Civil Pozuelo	5,31
Pinos Albos	7,93
Juan Antonio Nieto Montalvillo	5,91
El Cigüeñal	7,61
	79,58

4.2.5. Emisiones

Van a ser muchos los procesos que van a provocar emisiones, las cuales tienen una importante influencia en el impacto ambiental que tiene el tratamiento. En el Anexo IV aparecen desarrollados los cálculos realizados en cada una de las etapas.

4.2.5.1. Emisiones al aire en almacenamiento del purín

La etapa en la que más tiempo se encuentra el purín es en los diferentes almacenamientos en lo que se encuentra. En todo el proceso estudiado en el presente trabajo son hasta 3 almacenamientos diferentes.

El primero de ellos es el almacenamiento interior en fosas de suelo enrejillado. Este es el primero de todo el proceso y es el que ocurre en el interior de la explotación porcina. En las fosas se almacena una mezcla constituida por excrementos, orina, agua de limpieza, agua vertida desde los bebederos y restos de alimentos.

El segundo almacenamiento se produce en el exterior de la explotación porcina, pero en la balsa de almacenamiento. La diferencia con el anterior es, además de la ubicación, el tiempo que se encuentra almacenado debido a que en el primer caso es muy poco tiempo y en este segundo supera el mes de almacenamiento, siendo el máximo 2 meses (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010).

El último de los almacenamientos de purines se produce una vez éste ha sido transportado a la planta de tratamiento. Aquí el purín se encuentra a la espera de ser tratado. El tiempo de retención en estas balsas se ha fijado en 2 meses como máximo.

Estos son todos los almacenamientos que sufre el purín en crudo, aunque hay otro almacenamiento que no se ha comentado aún y es el de la biomasa. Este, al tratarse de un caudal menor que el purín y al ser una materia prima posterior, se almacena en unas cisternas cerradas que evitan las emisiones de gases.

Para el cálculo de estas emisiones las ecuaciones se han empleado las ecuaciones [Ec. 1] a [Ec. 7]:

- CH₄: para el cálculo del metano se emplea la siguiente fórmula (IPPC, 2006).

$$EF_{(T)} \left(\frac{kg CH_4}{UF} \right) = (VS_{(T)} \cdot 365) \cdot \left[B_{0(T)} \cdot 0.67 \cdot \sum_{s,k} MCF_{(sk)} \cdot MS_{(T,s,k)} \right] * \frac{1}{Q_{purin}} \quad [Ec. 1]$$

Donde $ET_{(T)}$ son las emisiones anuales de metano por animal, en $\frac{kg CH_4}{animal.yr}$, $VS_{(T)}$ son los sólidos volátiles excretados, expresados como $\frac{kg VS}{animal.d}$, $B_{0(T)}$ es la capacidad máxima de producción de metano del purín en $\frac{m^3 CH_4}{kg VS}$, 0,67 es la densidad del metano en $\frac{kg CH_4}{m^3 CH_4}$, $MCF_{(sk)}$ es el factor de conversión de metano por región climática y $MS_{(T,s,k)}$ es el factor de purín manejada mediante el sistema de gestión de purines en la región climática.

- N₂O directo: (IPPC, 2006).

$$N_2O_{D(mm)} \left(\frac{kg N_2O_D}{UF} \right) = \left[\sum_s \left[\sum_T (N_{(T)} \cdot N_{ex(T)} \cdot MS_{(T,s)}) \right] \cdot EF_{3(s)} \right] \cdot \frac{44}{28} * \frac{1}{Q_{purin}} \quad [Ec. 2]$$

Donde $N_2O_{(mm)}$ son las emisiones directas de óxido nitroso en $\frac{kg N_2O}{yr}$, $N_{(T)}$ es el número de cerdos, $N_{ex(T)}$ es la excreción media anual de N por cerdo en el país en $\frac{kg N}{animal.yr}$, $MS_{(T,s)}$ es la fracción de la excreción total anual de nitrógeno para cada cerdo que se gestiona en el sistema de gestión del purín en el país, EF_3 es el factor de emisión para las emisiones directas de N_2O del sistema de gestión del purín en el país expresado en $\frac{kg N_2O-N}{kg N_{Manure}}$ y $44/28$ es el factor para convertir 1 kg de N_2O-N en 1 kg de gas N_2O ($\frac{kg N_2O}{kg N_2O-N}$).

- N₂O indirecto: (IPPC, 2006).

Respecto a óxido nitroso indirecto (N_2O_G), primeramente, se calcula la cantidad de nitrógeno que se pierde debido a la volatilización de NH_3 y NO_x , este valor viene definido en $N_{volatilization-MMS}$ expresado en $\frac{kg NH_3-N+NO_x-N_{Volatilized}}{animal.yr}$.

$$N_{volatilization-MMS} = \sum_s \left[\sum_T [(N_{(T)} \cdot Nex_{(T)} \cdot MS_{(T,S)}) \cdot Frac_{GasMS(T,S)}] \right] \quad [Ec. 3]$$

$$N_2O_G(mm) \left(\frac{kg N_2O_G}{UF} \right) = (N_{volatilization-MMS} \cdot EF_4) \cdot \frac{44}{28} * \frac{1}{Q_{purin}} \quad [Ec. 4]$$

Donde $Frac_{GasMS(T,S)}$ es el porcentaje del nitrógeno del estiércol de cerdo que se volatiliza como NH_3 y NO_x en el sistema de gestión del estiércol, en $\frac{kg NH_3 - N + NO_x - N_{Volatilized}}{kg N_{Manure}}$, $N_2O(g)$ son las emisiones indirectas de N_2O debidas a la volatilización de N en $\frac{kg N_2O}{yr}$, EF_4 es el factor de emisión para las emisiones de N_2O procedentes de la deposición atmosférica de nitrógeno en los suelos y las superficies de agua en $\frac{kg N_2O - N}{kg NH_3 - N + NO_x - N_{Volatilized}}$.

- NH_3 : (EMEP-EEA, 2009).

$$NH_3 \left(\frac{kg NH_3}{UF} \right) = EF * N - NH_4 * \frac{1}{Q_{purin}} \quad [Ec. 5]$$

Donde EF son los kg de $NH_3-N/kgTAN$ (*Total Ammonia Nitrogen*) y $N-NH_4$ el nitrógeno amoniacal presente en el purín.

- NO: (EMEP-EEA, 2009).

$$NO \left(\frac{kg NO}{UF} \right) = EF * NT * \frac{1}{Q_{purin}} \quad [Ec. 6]$$

Donde EF son los kg de NO/kg TAN y NT el nitrógeno total contenido en el purín.

- N_2 : (Wesnaes et al., 2009).

$$N_2 \left(\frac{kg N_2}{UF} \right) = 3 * N_2O_{Directo} * \frac{1}{Q_{purin}} \quad [Ec. 7]$$

4.2.5.2. Emisiones al aire en el fotobiorreactor

El reactor thin layer es una fuente muy importante de emisiones dentro del sistema. La amplia superficie y la baja profundidad son unas características que favorecen las emisiones de diferentes compuestos al igual que la evaporación del agua.

Las microalgas, en la fotosíntesis, absorben dióxido de carbono. Sin embargo, esto no significa que en el proceso global haya una sustracción neta de CO_2 de la atmósfera debido a que también emiten este compuesto en su propia respiración y a que en la dilución también se encuentran microorganismos aerobios que lo emiten.

El otro compuesto que se emite en este proceso es amoniacal, favorecido por lo anteriormente comentado relativo a las dimensiones del reactor.

Estas emisiones se han calculado mediante el balance de materia del sistema, el cual se recoge en el Anexo I.

4.2.5.3. Emisiones al aire por la aplicación de la biomasa

La biomasa, al igual que cuando está almacenada, emite una serie de compuestos cuando se aplica al suelo como biofertilizante. Al igual que en el almacenamiento, los cálculos detallados aparecen en el Anexo IV. Las ecuaciones empleadas han sido:

- N₂O directo: (IPPC, 2006).

$$N_2O_{Direct} - N \left(\frac{kg N_2O_D}{UF} \right) = (F_{SN} + F_{ON}) \cdot EF_1 \cdot \frac{44}{28} * \frac{1}{Q_{purin}} \quad [Ec. 8]$$

Donde F_{SN} es la cantidad de fertilizante químico aplicado al suelo en $\frac{kg N_{input}}{yr}$, F_{ON} es la cantidad de biofertilizante aplicado en $\frac{kg N_{input}}{yr}$, EF₁ es el factor de emisión para las emisiones de N₂O, expresado en $\frac{kg N_2O-N}{kg N_{input}}$, y 44/28 es la conversión de N₂O-N a N₂O gas, $\frac{kg N_2O}{kg N_2O-N}$.

- N₂O indirecto: (IPPC, 2006).

$$N_2O_{Indirect} \left(\frac{kg N_2O_I}{UF} \right) = F_{ON} \cdot Frac_{GasM} \cdot EF_4 \cdot \frac{44}{28} * \frac{1}{Q_{purin}} \quad [Ec. 9]$$

Donde Frac_{GasM} es la fracción de nitrógeno de la biomasa que se volatiliza como NH₃ y NO_x, en $\frac{kg NH_3-N+NO_x-N_{Volatilized}}{kg N_{input}}$, EF₄ es el factor de emisión para las emisiones de N₂O procedentes de la deposición atmosférica de nitrógeno en suelo y superficies de agua expresado en $\frac{kg N_2O-N}{kg NH_3-N+NO_x-N_{Volatilized}}$.

- NH₃: (EMEP-EEA, 2009).

$$NH_3 \left(\frac{kg NH_3}{UF} \right) = EF * N - NH_4 * \frac{1}{Q_{purin}} \quad [Ec. 10]$$

- NO_x: (IPPC, 2006).

$$NO_x \left(\frac{kg NO_x}{UF} \right) = 0,21 * (N_2O_{Directo} + N_2O_{Indirecto}) * \quad [Ec. 11]$$

4.2.5.4. Vertidos al agua

En cuanto a los vertidos que se producen de forma directa al agua, es decir, por vertido del efluente centrifugado, se ha decidido que el agua se vierte directamente a un río, por lo que debe cumplir la legislación de vertido. Los valores de emisión de nitrógeno, fósforo, sólidos totales, COT y diferentes nutrientes y metales aparecen mostrados en el Anexo I en los balances de materia.

4.2.5.5. Emisiones al suelo

La biomasa aplicada al suelo genera un impacto importante en éste. Los metales pesados aplicados al suelo aparecen en el Anexo I en el balance de materia correspondiente a éstos. Lo mismo ocurre con el nitrógeno total, el fósforo, los sólidos totales y el carbono orgánico total.

La aplicación al suelo produce una lixiviación hacia las aguas subterráneas de nitrógeno y fósforo. Esta es una de las razones por las que la aplicación del nitrógeno está regulada. Para el cálculo de estos valores se han utilizado las siguientes ecuaciones:

- Lixiviación de nitrógeno: (Brockmann et al., 2014).

$$NO_3 - N_{leach} \left(\frac{kgNO_3}{UF} \right) = \frac{N_{applied} \cdot (0.021 \cdot P_{prec+irr} - 3.90) \cdot \frac{1}{100}}{V_{Raw\ manure}} \quad [Ec. 12]$$

Donde $N_{applied}$ es el nitrógeno aplicado contenido en la biomasa, en $\frac{kg\ N}{d}$, $P_{prec+irr}$ es la precipitación media anual en la ubicación seleccionada, expresada en $\frac{mm}{year}$, y $V_{raw\ manure}$ es el caudal de purín tratado, en $\frac{m^3}{d}$.

- Lixiviación de fósforo: (Brockmann et al., 2014).

$$P_{leach} \left(\frac{kgP_2O_5}{UF} \right) = \frac{P_{applied} \cdot P_{lost}}{V_{Raw\ manure}} \quad [Ec. 13]$$

Donde $P_{applied}$ es el fósforo aplicado contenido en la biomasa, en $\frac{kg\ P_2O_5}{d}$, y P_{lost} es la cantidad media de fósforo que se pierde por escorrentía hacia las aguas superficiales y/o por lixiviación del fósforo hacia las aguas subterráneas, expresado en $\frac{kg\ P}{kg\ P_2O_5}$.

4.2.6. Cargas evitadas de fertilizante químico

La aplicación de la biomasa al suelo como biofertilizante conlleva que se evite la aplicación en este mismo terreno de un fertilizante químico. Las características de este fertilizante han de ser lo más parecidas al biofertilizante aplicado, siendo imposible que sean con las mismas condiciones.

En España solo existe regulación de aplicación de nitrógeno (BOCYL, 2020), por lo que se ha tomado este como compuesto de referencia. Para ello el primer paso es conocer el nitrógeno total que contiene la biomasa para así poder conocer las hectáreas máximas que se pueden fertilizar con él y que sustituirán al fertilizante químico equivalente para esas hectáreas. Estas se calculan con el nitrógeno total



de la biomasa y el límite de aplicación, en este caso 170 kgN/ha/año, límite máximo en zonas vulnerables, obteniéndose 79,6 ha.

Respecto a los fertilizantes químicos, los tres escogidos han sido urea (46% nitrógeno), *calcium ammonium nitrate* (27% N) y *ammonium sulphate* (21% N). Lo más común es utilizar una mezcla de los tres, de manera que el porcentaje de nitrógeno va a depender de la cantidad en la que se utilice cada uno y, por tanto, los kg finales evitados de cada uno de ellos.

Además de los kg de fertilizante químico evitado, se han calculado también las emisiones evitadas que generarían la aplicación de estos fertilizantes, al igual que los lixiviados que provocaría. También, como se ha comentado en el punto 4.2.4.3. relativo al transporte, se han cálculos los tkm equivalentes al traslado del fertilizante a las diferentes zonas de aplicación.

Las características de estos fertilizantes aparecen mostradas y los cálculos realizados en el Anexo V.

4.2.7. Análisis del ciclo de vida de referencia

El escenario de referencia utilizado para la discusión de los resultados ha sido el escenario presentado en el trabajo "*Environmental assessment of nutrient recycling from biological pig slurry treatment – Impact of fertilizer substitution and field emissions*" (Brockmann et al., 2014). En este proceso se ha estudiado un análisis del ciclo de vida de un tratamiento de purines mediante procesos aeróbicos para su posterior utilización como biofertilizante, tanto el fango primario como el fango secundario. La planta está dimensionada para un caudal de 15 m³/d, para un límite de aplicación al suelo de 170 kgN/(ha*año) y el fango secundario es transportado a 3 km y el primario a 450 km. Respecto a la unidad funcional, esta es de 1 m³ de purín no tratado.

También se ha utilizado el trabajo "*Life cycle assessment of biological pig manure treatment versus direct land application – a trade-off story*" (Corbala-Robles et al., 2018). En este se compara el impacto ambiental causado por el tratamiento de unos purines frente al no tratamiento de estos y la aplicación al suelo de los diferentes productos. Para ello se ha utilizado una planta dimensionada para tratar 80 m³/d y para un límite de aplicación al suelo de 170 kgN/(ha*año). La unidad funcional es de 1 m³ de purín no tratado.

4.3. EVALUACIÓN DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

La evaluación del impacto del análisis del ciclo de vida ha sido llevada a cabo en el software SimaPro, versión 8.3.0.0. SimaPro se trata de un programa con el cual

es posible medir la sustentabilidad de diferentes productos o servicios desde el punto de vista medioambiental (Simapro, n.d.).

Para ello se utilizó el método Impact 2002+ (*Impact Assessment of Chemical Toxics*), el cual es un método basado en categorías de daño y categorías de impacto del punto medio a la salud humana, calidad de los ecosistemas, cambio climático y recursos, tal y como aparece en la siguiente tabla.

Tabla 8. Categorías de impacto y de daño del método 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
	Ocupación de terreno
Cambio climático	Calentamiento global
Daños a los recursos	Minerales
	Energías no renovables

El método Impact 2002+ es una combinación del método Eco-indicador 99 (Goedkoop & Spriensma, 2001) del cual saca las categorías de daño, y de la metodología del Centro de Estudios Medioambientales de la Universidad de Leiden (Guinée et al., 2001), CML, de la cual se obtiene las categorías de impacto. La diferencia principal consiste en que, en este nuevo método, en las categorías correspondientes a los impactos toxicológicos y ecotoxicológicos en el ser humano se han actualizado mediante el empleo de los niveles de producción agrícola y ganadera, también se pueden comparar las emisiones de aire interior y exterior y se tiene en cuenta el carácter intermitente de las precipitaciones. Es decir, ahora se basan en respuestas medias en lugar de suposiciones conservadoras (Jolliet et al., 2003).

Los factores de caracterización del punto medio se basan en los principios de equivalencia, lo que quiere decir que las puntuaciones de cada categoría se expresan en kg-equivalentes del compuesto tomado como referencia para cada una de las categorías. En la tabla 9 aparecen mostrados estos compuestos de referencia.



Tabla 9. Compuestos de referencia de las categorías de impacto

Categorías de impacto	Compuestos de referencia
Carcinógenos	kg _{eq} cloroetileno en el aire
No carcinógenos	kg _{eq} cloroetileno en el aire
Sustancias inorgánicas respiratorias	kg _{eq} PM2.5 en el aire
Radiación ionizante	Bq _{eq} Carbono-14 en el aire
Sustancias orgánicas respiratorias	kg _{eq} etileno en el aire
Destrucción de la capa de ozono	kg _{eq} CFC-11 en el aire
Ecotoxicidad acuática	kg _{eq} trietilenglicol en el agua
Ecotoxicidad terrestre	kg _{eq} trietilenglicol en el agua
Acidificación/eutrofización terrestre	kg _{eq} SO ₂ en el aire
Ocupación de terreno	m ² _{eq} terreno orgánico cultivable por año
Eutrofización acuática	kg _{eq} PO ₄ ³⁻ en el agua
Acidificación acuática	kg _{eq} SO ₂ en el aire
Calentamiento global	kg _{eq} CO ₂ en el aire
Energía no renovable	MJ totales primarios no renovables o kg _{eq} petróleo crudo
Extracción de minerales	MJ energía adicional o kg _{eq} de hierro (en el mineral)

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores calculados anteriormente han sido introducidos en SimaPro con las categorías descritas en el Anexo VI y los valores de cada una de ellas. Estos valores están calculados respecto a la Unidad Funcional (UF) de 1 m³ de purín, sin embargo, para el cálculo de las diferentes emisiones se ha realizado con el valor del caudal diario de purín tratado, 207 m³/d, por lo que los resultados obtenidos son las emisiones que se producen en un día en el funcionamiento de la planta.

A la hora de introducir los resultados obtenidos dentro de SimaPro, estos se han introducido dentro de dos procesos distintos. En el primero de ellos se han introducido los diferentes materiales y recursos (terreno necesario, excavación...) para la construcción de la planta. En el otro, el que engloba a toda la planta, se han introducido todas emisiones, vertidos, consumos, etc. que son necesarios durante el proceso de tratamiento y la parte de la infraestructura correspondiente relativa a la unidad funcional. La razón de realizarlo de esta manera es que facilita la introducción de los datos dentro del programa y el posterior análisis de sensibilidad.

En las siguientes figuras aparecen mostradas dos ejemplos de los valores introducidos en SimaPro. La primera de ellas (figura 4) es la correspondiente a la base de datos de la infraestructura y la segunda (figura 5) se corresponde a la base de datos del tratamiento del purín.

Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos y co-productos							
Nombre	Cantidad	Ud.	Cantidad	Asignación %	Categoría	Comentario	
Agua residual_INFRAESTRUCTURA	1	p	Amount	100 %	Water		
(Insertar línea aquí)							
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos evitados							
Nombre	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^*DS	Min	Máx	Comentario
(Insertar línea aquí)							
Entradas							
Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos)							
Nombre	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^*DS	Min	
Occupation, construction site	land	1,5*(12478,31016+3160,54+4608+4608)*1 = 3,73E4	m2a				
Transformation, from pasture and meadow	land	1,5*(12478,31016+3160,54+4608+4608) = 3,73E4	m2				
Transformation, to industrial area, built up	land	(12478,31016+3160,54+4608+4608) = 2,49E4	m2				
Transformation, to industrial area, vegetation	land	1,5*(12478,31016+3160,54+4608+4608)-(12478,31016+3160,54+4608+4608) = 1,24E4	m2				
Occupation, industrial area, built up	land	(12478,31016+3160,54+4608+4608)*25 = 6,21E5	m2a				
Occupation, industrial area, vegetation	land	25*(1,5*(12478,31016+3160,54+4608+4608)-(12478,31016+3160,54+4608+4608)) = 3,11E5	m2a				
(Insertar línea aquí)							
Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles)							
Nombre	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^*DS	Min	Máx	Comentario
Concrete, normal {CH} market for Alloc Def, S	617,19	m3	Indefinido				Balsa mezcla
Concrete, normal {CH} market for Alloc Def, S	1249,31	m3	Indefinido				Thin layer
Steel, unalloyed {GLO} market for Alloc Def, S	19000	kg	Indefinido				Centrifuga
Cast iron {RER} production Alloc Rec, U	120	kg	Indefinido				Mezclador
Excavation, hydraulic digger {GLO} market for Alloc Def, U	1871,746524+13850,22833+12591,12+13850,22E	m3					Excavación
Steel, stainless 304, scrap/kg/GLO	66	kg	Indefinido				Bomba purín
Steel, stainless 304, scrap/kg/GLO	72	kg	Indefinido				Bomba agua limpia
Steel, stainless 304, scrap/kg/GLO	61	kg	Indefinido				Bomba agua recirculada
Polyethylene high density granulate (PE-HD), production mix, at plant RER	10287,3600+10287,3600 = 2,06E4	kg					Balsa almacenamiento purín (granj)
PVC pipe E	13015,527	kg	Indefinido				Cisterna biomasa
Extrusion, plastic pipes {RER} production Alloc Def, U	13015,527+10287,3600+10287,3600 = 3,36E4	kg					Extrusión PVC + PEHD
Electricity, medium voltage {ES} market for Alloc Def, U	1,5*24*365*25 = 3,29E5	kWh					Electricidad extrusión

Figura 4. Base de datos de la infraestructura en SimaPro

Productos									
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos y co-productos									
Nombre	Cantidad	Ud.	Cantidad	Asignación %	Categoría	Comentario			
Agua residual de tratamiento de purines con microalgas_NUEVO	1	m3	Volume	100 %	Water				
(Insertar línea aquí)									
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos evitados									
Nombre	Cantidad	Ud.	Distribución	D5^2 or 2*DS	Min	Máx	Comentario		
Delivery van <3.5t	0,010166297096	tkm	Indefinido				Transporte fertilizante		
Fertilising, by broadcaster {CH} processing Alloc Rec, 5	0,384462653	ha	Indefinido				Spreading evitado		
Urea, as N {GLO} market for Alloc Def, U	0,180196170649	kg	Indefinido						
Calcium nitrate {GLO} market for Alloc Def, U	0,23557971018338	kg	Indefinido						
Ammonium sulfate, as N {GLO} market for Alloc Def, U	0,08681685518914	kg	Indefinido						
(Insertar línea aquí)									
Entradas									
Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos)									
Nombre	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	D5^2 or 2*DS	Min	Comentario		
Water (with river silt)		13,36513	ton	Indefinido					
(Insertar línea aquí)									
Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles)									
Nombre	Cantidad	Ud.	Distribución	D5^2 or 2*DS	Min	Máx	Comentario		
Transport, truck >20t, EURO2, 100%LF, default/GLO Economic	17,00127051	tkm	Indefinido				Transporte purin a planta		
Fertilising, by broadcaster {CH} processing Alloc Def, U	0,384462653	ha	Indefinido				Spreading		
Agua residual_INFRAESTRUCTURA	1((25*75546,7) = 5,29E-7	p							
Transport, truck >20t, EURO2, 100%LF, default/GLO Economic	0,2900256338028	tkm	Indefinido						
(Insertar línea aquí)									
Entradas conocidas desde la tecnósfera (electricidad/calor)									
Nombre	Cantidad	Ud.	Distribución	D5^2 or 2*DS	Min	Máx	Comentario		
Electricity, medium voltage {ES} market for Alloc Def, U	0,08175	kWh	Indefinido				Bombeo purin		
Electricity, medium voltage {ES} market for Alloc Def, U	0,910499481250	kWh	Indefinido				Bombeo agua		
Electricity, medium voltage {ES} market for Alloc Def, U	0,12755024376	kWh	Indefinido				Mezclador		
Electricity, medium voltage {ES} market for Alloc Def, U	28,2349857770	kWh	Indefinido				Centrifugación		
Electricity, medium voltage {ES} market for Alloc Def, U	0,35005758750	kWh	Indefinido				Bombeo agua recirculada		

Figura 5. Base de datos del tratamiento del purín en SimaPro

5.1. ANÁLISIS DE EVALUACIONES DE DAÑO

Las evaluaciones de daño dentro del análisis aparecen mostradas en la Figura 6 y son: los daños a la salud humana, los impactos a la calidad del ecosistema, el cambio climático y, por último, los recursos. Como se muestra en esta figura, la cual esta normalizada para ver el que afecta en mayor medida, son las afecciones al ecosistema las mayores.

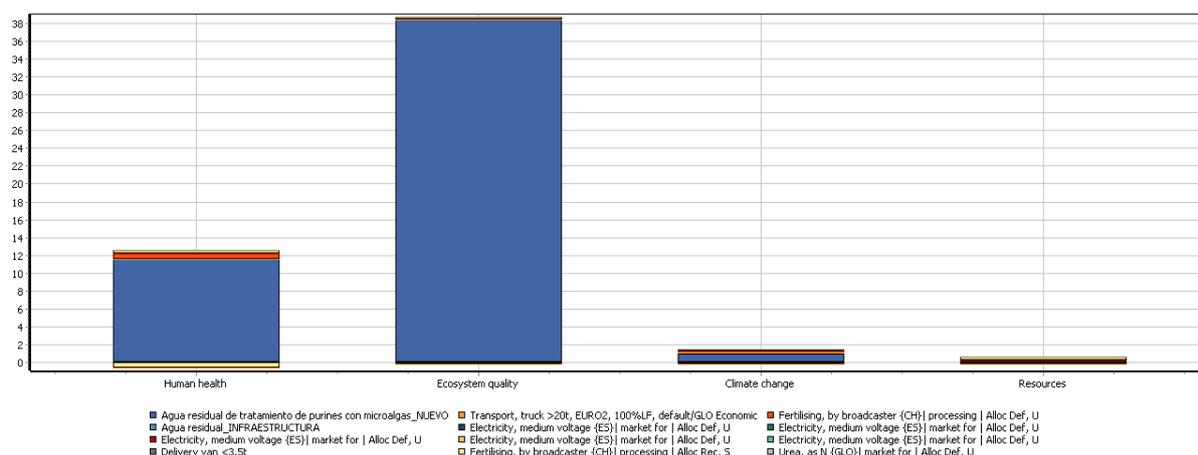


Figura 6. Evaluaciones de daño

En los 3 primeros procesos, como se puede observar, el proceso que más influye es el propio tratamiento de las aguas. Dentro de este tratamiento se encuentran incluidas todos los procesos comprendidos en la base de datos y, además, todas las demás bases de datos que se han utilizado para construir esta base de datos. Esto significa que, por ejemplo, para el caso del transporte están incluidos el combustible,



los materiales empleados para la fabricación del camión, la construcción de la carretera... y, a su vez, dentro de estos, las bases de datos para obtener el combustible, los materiales, etc. Es decir, dentro de cada material o proceso seleccionado hay un número muy alto de bases de datos. Esta es la razón por la que en este gráfico aparece resumido en el propio tratamiento de aguas sin especificar de una manera más exacta.

En la afección a la salud humana se encuentran, además del propio tratamiento, como impactos relevantes, el proceso de fertilización y las producciones de electricidad mediante quema de carbón y lignito. En los daños al ecosistema está, prácticamente el 100%, relacionado con el tratamiento del agua. Al igual que en las otras dos evaluaciones de daño.

Dentro de los procesos referentes a la salud humana, como puede observarse en la tabla 10, las emisiones más importantes son las de zinc (84,82%) al suelo, producida por la aplicación de la biomasa a este. Además, el molibdeno (6,93%) y el cadmio (1,91%) tiene cierta importancia también, pero no al nivel del zinc.

Tabla 10. Daños a la salud humana

No	Sustancia	Compartimento	Unidad	Total
	El total de todos los compartimentos		DALY	0,0843
	Substancias remanentes		DALY	0,000268
1	Zinc	Suelo	DALY	0,0715
2	Molybdenum	Suelo	DALY	0,00584
3	Cadmium	Suelo	DALY	0,00161
4	Zinc	Agua	DALY	0,00149
5	Particulates, < 2.5 um	Aire	DALY	0,000964
6	Nitrogen oxides	Aire	DALY	0,000782
7	Sulfur dioxide	Aire	DALY	0,000671
8	Arsenic	Agua	DALY	0,00062
9	Copper	Suelo	DALY	0,000367
10	Nickel	Suelo	DALY	0,000134
11	Hydrocarbons, aromatic	Aire	DALY	8,8E-5

En cuanto a la afectación al ecosistema el principal causante sigue siendo el tratamiento del agua y dentro de los materiales causantes de esto, el zinc (74,00%), el cobre (22,58%) y el níquel (1,99%) al suelo, aunque ya esté en mucha menor medida. Los metales son los principales causantes de los problemas ocasionados al ecosistema.

Sin embargo, y como cabía esperar, para el cambio climático es diferente. Esta categoría, según puede apreciarse en la tabla 11, se ve mucho más afectada por las emisiones a la atmósfera y no por las provocadas al suelo o al agua. El principal causante de las emisiones de efecto invernadero es el metano (55,95%), proveniente de los diferentes almacenamientos del purín sin tratar, el óxido nitroso (22,4%) emitido también en los almacenamientos, del dióxido de carbono tanto del tratamiento en el reactor como el producido en la generación de electricidad, transporte y fertilización,

siendo en su totalidad de un 21,19%. El metano, pese a no ser el mayor emitido en masa en términos absolutos, posee un poder de calentamiento global (GWP, *Global Warming Potencial*) igual a 28, lo que supone que su impacto sea mucho más importante.

Tabla 11. Cambio climático

No	Sustancia	Compartimento	Unidad	Total	Agua residual de tratamiento de
	El total de todos los compartimentos		kg CO2 eq	1,21E4	9,51E3
	Substancias remanentes		kg CO2 eq	14,4	0
1	Methane	Aire	kg CO2 eq	6,77E3	6,76E3
2	Dinitrogen monoxide	Aire	kg CO2 eq	2,71E3	2,75E3
3	Carbon dioxide, fossil	Aire	kg CO2 eq	2,36E3	x
4	Carbon dioxide	Aire	kg CO2 eq	203	x
5	Methane, fossil	Aire	kg CO2 eq	75,5	x
6	Sulfur hexafluoride	Aire	kg CO2 eq	24	x

Por último, la evaluación de daños a los recursos, determina que los causantes de estos problemas son las materias primas empleadas para la obtención de la energía eléctrica necesaria durante el funcionamiento de la planta. El principal causante de este daño es el uranio (36,66%), el gas natural (25,05%) y el carbón (23,59%).

Tabla 12. Daños a los recursos

No	Sustancia	Compartimento	Unidad	Total
	El total de todos los compartimentos		MJ primary	5,51E4
	Substancias remanentes		MJ primary	9,45
1	Uranium	Crudo	MJ primary	2,02E4
2	Gas, natural/m3	Crudo	MJ primary	1,38E4
3	Coal, hard	Crudo	MJ primary	1,3E4
4	Oil, crude	Crudo	MJ primary	3,94E3
5	Energy, from oil	Crudo	MJ primary	2,87E3
6	Coal, brown	Crudo	MJ primary	828
7	Energy, from gas, natural	Crudo	MJ primary	259
8	Gas, mine, off-gas, process, coal mining/m3	Crudo	MJ primary	241

5.2. CATEGORÍAS DE IMPACTO

En cuanto al análisis por categorías de impacto, aquí se analizan las emisiones según las categorías mostradas en la tabla 9. En la figura 7 aparecen todas las categorías de impacto con los porcentajes de la relevancia que tienen los diferentes procesos y, en la figura 8, el diagrama de red en el que se ven los porcentajes de influencia de los procesos más relevantes. Deben señalarse que los impactos negativos que aparecen en la figura 7 son debidos a las cargas evitadas como consecuencia de la utilización de materiales reciclados en la construcción de infraestructuras o el reciclado de materiales procedentes del desmantelamiento de las infraestructuras. En el impacto por extracción mineral debidos a que, en los tratamientos finales, se ha supuesto que un gran porcentaje de los materiales empleados son reciclados. Pese a que las hectáreas equivalentes a fertilizar sean

igual para la biomasa que para el fertilizante químico, su impacto no es igual. En la biomasa se tienen en cuenta los impactos asociados al transporte, la aplicación como biofertilizante y el proceso de aplicación; para el fertilizante químico también se tiene en cuenta el transporte, pero es diferente, al igual que la aplicación al terreno, los procesos de aplicación sí que se suponen iguales. Además, en el fertilizante químico se tiene en cuenta también su fabricación. Por último, las concentraciones de metales pesados en la biomasa son diferentes a las del fertilizante químico. Por todo esto, aunque los impactos referidos a la fertilización parezcan iguales, no lo son.

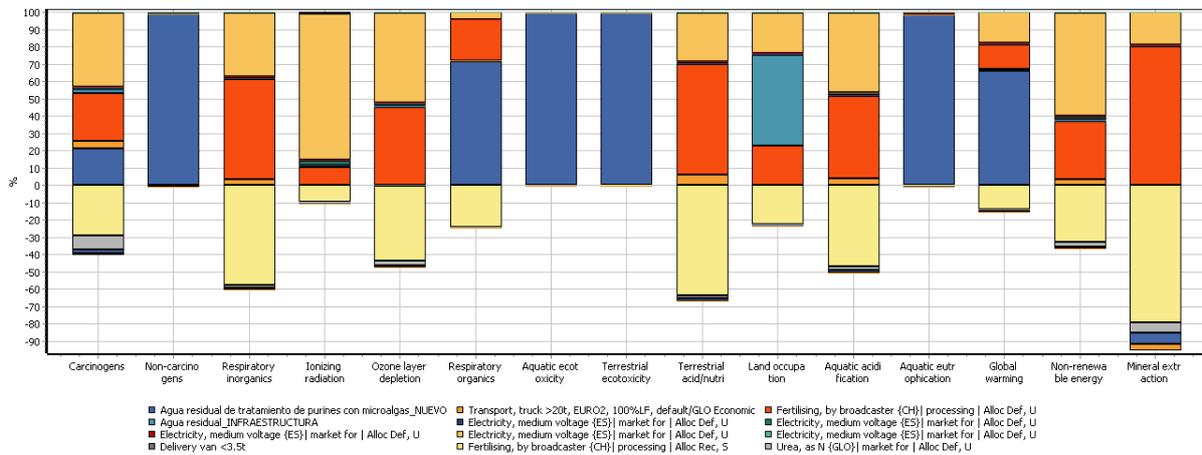


Figura 7. Caracterización categorías de impacto

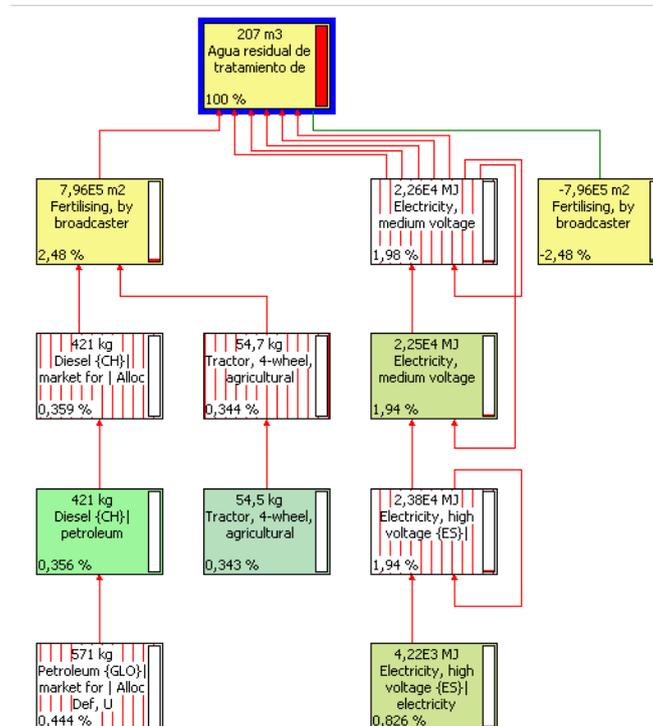


Figura 8. Diagrama de red

5.2.1. Carcinógenos

Las sustancias carcinógenas son aquellas sustancias que al exponerse a tejidos vivos son potencialmente capaces de producir cáncer (NIH, 2021b). En este proceso su influencia es mínima comparado con otros procesos. La producción que más relevancia tiene es la generación de energía eléctrica por quema de gas natural (44,55%) y las sustancias generadas en la propia planta (35,86%). Cabe destacar también que la fertilización evitada tiene una importancia muy alta, evitando casi lo correspondiente al 50% del total.

Tabla 13. Procesos productores de carcinógenos

No	Proceso	Proyecto	Unidad	Total
	El total de todos los procesos		kg C2H3Cl eq	54,2
	Procesos remanentes		kg C2H3Cl eq	9,39
1	Natural gas, high pressure {RoW} natural gas production Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg C2H3Cl eq	24,1
2	Agua residual de tratamiento de purines con microalgas_NUEVO	TFM BIOFERTILIZANTES_	kg C2H3Cl eq	19,4
3	Natural gas, high pressure {US} natural gas production Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg C2H3Cl eq	7,56
4	Fertilising, by broadcaster {CH} processing Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg C2H3Cl eq	5,35
5	Coke {RoW} coking Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg C2H3Cl eq	5,03
6	Transport, truck >20t, EURO2, 100%LF, default GLO Economic	Agri-footprint - economic	kg C2H3Cl eq	3,8
7	Water discharge from petroleum/natural gas extraction, onshore {GLO} trea	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg C2H3Cl eq	2,26
8	PVC pipe E	Industry data 2.0	kg C2H3Cl eq	1,67
9	Steel, low-alloyed {RoW} steel production, electric, low-alloyed Alloc Def, L	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg C2H3Cl eq	1,24
10	Sinter, iron {GLO} production Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg C2H3Cl eq	1,09
11	Fertilising, by broadcaster {CH} processing Alloc Rec, S	Ecoinvent 3 - allocation, r	kg C2H3Cl eq	-26,7

En cuanto a los compuestos que provocan estos problemas los más importantes son los hidrocarburos aromáticos (58,04%) emitidos al aire por procesos de combustión y el arsénico (35,86%) emitido al agua en el vertido del efluente. El resto de sustancias tienen una influencia mucho menor en comparación con estas dos.

Los hidrocarburos aromáticos, como pueden ser el tolueno, naftaleno, benzopireno o fenantreno, son los más peligrosos debido a que tienden a acumularse en las grasas, por lo que son difícilmente eliminables por el organismo. Los efectos se pueden diferenciar en tres: los letales, los subletales y los indirectos. Los letales son aquellos que causan la muerte debido a que impiden la respiración o modificar la resistencia térmica (muy problemático en el caso de las aves marinas). Los subletales son aquellos que provocan alteraciones genéticas, bioquímicas o fisiológicas por la ingestión de estos compuestos; la bioacumulación de los contaminantes genera este efecto. Por último, los efectos indirectos se definen como perturbaciones sobre los ecosistemas causados por las alteraciones generadas sobre la estructura biológica y sobre el hábitat. Algunos de las problemáticas que genera son: alteración del hábitat, cambios en las relaciones entre depredador y presa y entre competidores, variaciones en los niveles de productividad y alteraciones en las redes tróficas (Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, n.d.).

Tabla 14. Sustancias carcinógenas

No	Sustancia	Compartimento	Unidad	Total
	El total de todos los compartimentos		kg C2H3Cl eq	54,2
	Substancias remanentes		kg C2H3Cl eq	0,0173
1	Hydrocarbons, aromatic	Aire	kg C2H3Cl eq	31,5
2	Arsenic	Agua	kg C2H3Cl eq	19,4
3	Dioxin, 2,3,7,8 Tetrachlorodibenzo-p-	Aire	kg C2H3Cl eq	1,37
4	Dioxin, 2,3,7,8 Tetrachlorodibenzo-p-	Agua	kg C2H3Cl eq	0,851
5	PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	Aire	kg C2H3Cl eq	0,599
6	Hydrocarbons, aromatic	Agua	kg C2H3Cl eq	0,333
7	Arsenic	Aire	kg C2H3Cl eq	0,305
8	Arsenic	Suelo	kg C2H3Cl eq	0,206
9	Aldrin	Suelo	kg C2H3Cl eq	0,0734
10	Chromium	Aire	kg C2H3Cl eq	0,0695
11	Benzo(a)pyrene	Aire	kg C2H3Cl eq	-0,531

5.2.2. No-carcinógenos

Estas sustancias, como su propio nombre indican, pese a no ser potencialmente cancerígenas no significa que no sean dañinas para el ser humano. A diferencia de las cancerígenas estas sí que tienen una influencia mucho mayor en el proceso. En el caso anterior las sustancias afectaban principalmente al aire y al agua, en este caso no es así, y lo producen el impacto en el suelo.

Estas emisiones son, debidas a la aplicación de la biomasa al suelo como biofertilizante y al vertido del efluente tratado. En cuanto a la sustancias, son los metales pesados aquellos que afectan al suelo en mayor medida y al agua en menor. El mayor causante, como se ha visto anteriormente en los daños al ecosistema, es el zinc (87,33% al suelo y 1,83% al agua) y el molibdeno liberado en el suelo (7,12%).

Tabla 15. Sustancias no carcinógenas

No	Sustancia	Compartimento	Unidad	Total	Agua residual de tratamiento de
	El total de todos los compartimentos		kg C2H3Cl eq	2,92E4	2,92E4
	Substancias remanentes		kg C2H3Cl eq	76,2	57,5
1	Zinc	Suelo	kg C2H3Cl eq	2,55E4	2,55E4
2	Molybdenum	Suelo	kg C2H3Cl eq	2,08E3	2,08E3
3	Cadmium	Suelo	kg C2H3Cl eq	576	576
4	Zinc	Agua	kg C2H3Cl eq	533	533
5	Arsenic	Agua	kg C2H3Cl eq	202	202
6	Copper	Suelo	kg C2H3Cl eq	131	131
7	Nickel	Suelo	kg C2H3Cl eq	47,8	47,8

5.2.3. Efectos respiratorios por sustancias inorgánicas

Los inorgánicos son aquellas sustancias que se pueden clasificar como partículas en suspensión en el aire o que tienen una afección parecida a las generadas por las partículas. Estas son generadas, en la mayoría de las ocasiones, por combustiones de diferentes combustibles fósiles.

Las partículas inferiores a 2,5 µm (39,88%) y los óxidos de nitrógeno (32,37%) son los principales causantes de estas emisiones. En la tabla 16 los diferentes procesos que producen este tipo de emisiones. El proceso principal es la fertilización por la utilización de combustible fósil, diésel en concreto. También la quema de carbón y lignito para producir electricidad tiene cierta influencia. A su vez, la fertilización evitada tiene una importancia muy alta.

Tabla 16. Procesos emisores de partículas

No	Proceso	Proyecto	Unidad	Total
	El total de todos los procesos		kg PM2.5 eq	3,46
	Procesos remanentes		kg PM2.5 eq	1,47
1	Fertilising, by broadcaster {CH} processing Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg PM2.5 eq	4,03
2	Electricity, high voltage {ES} electricity production, hard coal Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg PM2.5 eq	1,82
3	Electricity, high voltage {ES} electricity production, lignite Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg PM2.5 eq	0,648
4	Transport, truck >20t, EURO2, 100%LF, default/GLO Economic	Agri-footprint - economic	kg PM2.5 eq	0,267
5	Electricity, high voltage {ES} electricity production, oil Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg PM2.5 eq	0,199
6	Electricity, high voltage {IN} electricity production, lignite Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg PM2.5 eq	0,186
7	Fertilising, by broadcaster {CH} processing Alloc Rec, S	Ecoinvent 3 - allocation, r	kg PM2.5 eq	-5,16

5.2.4. Radiación ionizante

La radiación ionizante es un tipo de radiación de alta energía que tiene el poder de eliminar un electrón de un átomo o molécula, es decir, de causar su ionización. Esta produce daños en las células y en el ADN (NIH, 2021a).

Las sustancias que provocan esto son sustancias radiactivas, en concreto en este caso el carbono-14 (33,06%) emitido al aire o el radón-222 (65,08%) emitido al aire también. Estos compuestos no provienen del propio tratamiento de los purines, sino, como ocurre con las partículas, de las generaciones de energía eléctrica, en este caso la nuclear.

Tabla 17. Sustancias causantes de la radiación ionizante

No	Sustancia	Compartimento	Unidad	Total
	El total de todos los compartimentos		Bq C-14 eq	1,24E5
	Substancias remanentes		Bq C-14 eq	192
1	Radon-222	Aire	Bq C-14 eq	8,07E4
2	Carbon-14	Aire	Bq C-14 eq	4,1E4
3	Cesium-137	Agua	Bq C-14 eq	2,06E3
4	Cobalt-60	Agua	Bq C-14 eq	142

El proceso que más afecta es la disposición como residuo de la molienda del uranio (65,08%).

Tabla 18. Procesos emisores de radiación ionizante

No	Proceso	Proyecto	Unidad	Total
	El total de todos los procesos		Bq C-14 eq	1,24E5
	Procesos remanentes		Bq C-14 eq	1,22E3
1	Tailing, from uranium milling {GLO} treatment of Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	Bq C-14 eq	8,07E4
2	Low level radioactive waste {CH} treatment of, plasma torch incineration Al	Ecoinvent 3 - allocation, c	Bq C-14 eq	1,77E4
3	Spent nuclear fuel {RoW} treatment of, reprocessing Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	Bq C-14 eq	1,43E4
4	Electricity, high voltage {ES} electricity production, nuclear, boiling water re	Ecoinvent 3 - allocation, c	Bq C-14 eq	1,27E4
5	Electricity, high voltage {ES} electricity production, nuclear, pressure water r	Ecoinvent 3 - allocation, c	Bq C-14 eq	8,41E3
6	Uranium ore, as U {RNA} uranium mine operation, underground Alloc Def, L	Ecoinvent 3 - allocation, c	Bq C-14 eq	948
7	Uranium ore, as U {RoW} uranium mine operation, underground Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	Bq C-14 eq	895
8	Concrete, normal {CH} market for Alloc Def, S	Ecoinvent 3 - allocation, c	Bq C-14 eq	370
9	Uranium, in yellowcake {RoW} production Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	Bq C-14 eq	267
10	Electricity, high voltage {CH} electricity production, nuclear, boiling water re	Ecoinvent 3 - allocation, c	Bq C-14 eq	169
11	Fertilising, by broadcaster {CH} processing Alloc Rec, S	Ecoinvent 3 - allocation, r	Bq C-14 eq	-1,36E4

5.2.5. Destrucción de la capa de ozono

Las sustancias destructoras de la capa de ozono son, principalmente, compuestos clorofluorocarbonados (CFC). El principal proceso que afecta a esta categoría de impacto es la producción del petróleo y gas natural y, en menor medida, la producción del uranio.

Tabla 19. Procesos generadores de sustancias destructoras de la capa de ozono

No	Proceso	Proyecto	Unidad	Total
	El total de todos los procesos		kg CFC-11 eq	0,000364
	Procesos remanentes		kg CFC-11 eq	0,000103
1	Petroleum {RoW} petroleum and gas production, on-shore Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg CFC-11 eq	0,000121
2	Petroleum {RME} production, onshore Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg CFC-11 eq	0,00012
3	Uranium, enriched 4.2%, per separative work unit {US} uranium production,	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg CFC-11 eq	0,000109
4	Transport, pipeline, long distance, natural gas {RoW} processing Alloc Def,	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg CFC-11 eq	5,7E-5
5	Petroleum {RU} production, onshore Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg CFC-11 eq	5,14E-5
6	Transport, pipeline, onshore, long distance, natural gas {DZ} processing All	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg CFC-11 eq	4,73E-5
7	Uranium, enriched 3.8%, per separative work unit {US} uranium production,	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg CFC-11 eq	4E-5
8	Petroleum {RoW} production, onshore Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg CFC-11 eq	1,58E-5
9	Fertilising, by broadcaster {CH} processing Alloc Rec, S	Ecoinvent 3 - allocation, r	kg CFC-11 eq	-0,000301

5.2.6. Efectos respiratorios por sustancias orgánicas

Las sustancias orgánicas respiratorias son las últimas dentro de la evaluación de daño que afecta a la salud humana. Estas sustancias se producen, como puede verse en la tabla 21, en un 95,20% el proceso de tratamiento de depuración, esto se debe a que el metano (95,20%) es el principal causante de estas emisiones. El metano producido se genera en el tratamiento, principalmente, en los almacenamientos de purín en las diferentes balsas. Esta es una de las razones por las que almacenar el purín durante largos periodos de tiempo supone un impacto al medio ambiente con una cierta importancia. Además, influyen otros factores como son la temperatura de la zona, estando favorecido por las altas temperaturas.

Tabla 20. Sustancias causantes de los efectos respiratorios por sustancias orgánicas

No	Sustancia	Compartiment	Unidad	Total
	El total de todos los compartimentos		kg C2H4 eq	5,62
	Substancias remanentes		kg C2H4 eq	0,0556
1	Methane	Aire	kg C2H4 eq	5,35
2	NMVOOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	Aire	kg C2H4 eq	0,153
3	Ethane	Aire	kg C2H4 eq	0,015
4	Xylene	Aire	kg C2H4 eq	0,0146
5	Pentane	Aire	kg C2H4 eq	0,00925
6	Propane	Aire	kg C2H4 eq	0,00916
7	Hydrocarbons, aromatic	Aire	kg C2H4 eq	0,00878
8	Butane	Aire	kg C2H4 eq	0,00837

Tabla 21. Procesos orgánicos respiratorios

No	Proceso	Proyecto	Unidad	Total
	El total de todos los procesos		kg C2H4 eq	5,62
	Procesos remanentes		kg C2H4 eq	0,528
1	Agua residual de tratamiento de purines con microalgas_NUEVO	TFM BIOFERTILIZANTES_	kg C2H4 eq	5,35
2	Fertilising, by broadcaster {CH} processing Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg C2H4 eq	0,686
3	Tractor, 4-wheel, agricultural {RoW} production Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg C2H4 eq	0,377
4	Natural gas, vented {GLO} natural gas venting from petroleum/natural gas p	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg C2H4 eq	0,217
5	Coke {RoW} coking Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg C2H4 eq	0,116
6	Agricultural machinery, unspecified {RoW} production Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg C2H4 eq	0,0883
7	Lubricating oil {RoW} production Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg C2H4 eq	0,0593
8	Fertilising, by broadcaster {CH} processing Alloc Rec, S	Ecoinvent 3 - allocation, r	kg C2H4 eq	-1,8

5.2.7. Ecotoxicidad acuática

Las sustancias ecotóxicas tienen la propiedad de poder dañar a los organismos presentes en el agua, de ahí que esté incluida dentro de los impactos al ecosistema, pero también pueden dañar a las personas.

Los metales pesados son los principales causantes de este problema debido a su capacidad de bioacumularse en la cadena trófica a través de los microorganismos que pueda haber en el suelo (Casassas, 2004). Esto supone un gran problema para la salud tanto de los seres vivos como de los seres humanos.

Como se puede sospechar y, al igual que ocurría con las sustancias no carcinógenas, son los metales aplicados al suelo y los vertidos al agua los mayores causantes. En la tabla 22 se puede apreciar que la disposición del cobre, tanto en suelo (54,83%) como en agua (21,08%), es la causante principal de este problema y, en menor medida, el zinc en el suelo (14,55%) y en el agua (7,04%).

Tabla 22. Compuestos ecotoxicidad acuática

No	Sustancia	Compartimento	Unidad	Total
	El total de todos los compartimentos		kg TEG water	7,97E7
	Substancias remanentes		kg TEG water	2,09E5
1	Copper	Suelo	kg TEG water	4,37E7
2	Copper	Agua	kg TEG water	1,68E7
3	Zinc	Suelo	kg TEG water	1,16E7
4	Zinc	Agua	kg TEG water	5,61E6
5	Nickel	Agua	kg TEG water	8,08E5
6	Nickel	Suelo	kg TEG water	5,06E5
7	Cadmium	Agua	kg TEG water	1E5
8	Cadmium	Suelo	kg TEG water	9,36E4
9	Chromium	Agua	kg TEG water	9,23E4
10	Chromium	Suelo	kg TEG water	8,53E4

5.2.8. Ecotoxicidad terrestre

En esta categoría van a ser prácticamente los mismos materiales que en la categoría correspondiente a la ecotoxicidad acuática los que produzcan los impactos, es decir, los metales pesados. Y, concretamente, el zinc (74,43%) y el cobre (22,39%). No es casualidad que estos dos metales sean los mayores causantes porque, además de ser los dos cuya concentración es mayor, tienen tendencia a bioacumularse.

En la figura 9 se puede observar que la ecotoxicidad terrestre es la categoría de impacto que tiene mayor relevancia dentro de todas las categorías una vez normalizados los valores.

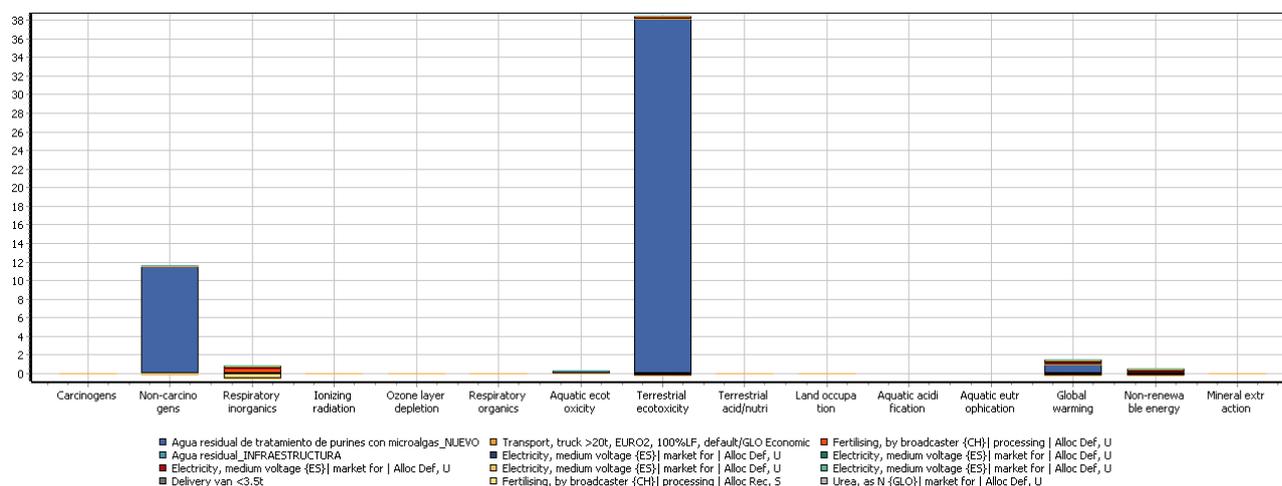


Figura 9. Categorías de impacto normalizada

Es la disposición de los metales al suelo el proceso que tiene una mayor relevancia. Si bien es cierto, el tratamiento de agua, en el cual se incluye la aplicación de la biomasa, es el principal causante de la ecotoxicidad terrestre, llama la atención que la fertilización resulta compensada por la fertilización evitada, demostrando la importancia de incluir los procesos evitados.

Tabla 23. Compuestos que generan ecotoxicidad terrestre

No	Sustancia	Compartimento	Unidad	Total
	El total de todos los compartimentos		kg TEG soil	6,61E7
	Substancias remanentes		kg TEG soil	2,52E4
1	Zinc	Suelo	kg TEG soil	4,92E7
2	Copper	Suelo	kg TEG soil	1,48E7
3	Nickel	Suelo	kg TEG soil	1,32E6
4	Chromium	Suelo	kg TEG soil	4,27E5
5	Cadmium	Suelo	kg TEG soil	1,7E5
6	Lead	Suelo	kg TEG soil	1,35E5

Tabla 24. Procesos ecotoxicidad terrestre

No	Proceso	Proyecto	Unidad	Total
	El total de todos los procesos		kg TEG soil	6,61E7
	Procesos remanentes		kg TEG soil	7,45E4
1	Agua residual de tratamiento de purines con microalgas_NUEVO	TFM BIOFERTILIZANTES_	kg TEG soil	6,61E7
2	Fertilising, by broadcaster {CH} processing Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg TEG soil	4,24E5
3	Fertilising, by broadcaster {CH} processing Alloc Rec, S	Ecoinvent 3 - allocation, r	kg TEG soil	-4,54E5

Como se ha comentado, el zinc es el principal causante de este impacto debido a que, salvo condiciones muy concretas, no se disuelve en el agua (ATSDR, 2005), por lo que permanece en el suelo, aumentando cada vez más su concentración en él. Según el tipo de suelo puede liberarse de este, lixiviándose así a las aguas subterráneas, provocando de esta forma toxicidad acuática, no obstante, esto es menos común; de ahí que la relevancia mostrada en la figura 9 sea sustancialmente mayor en el suelo que en el agua.

El cobre, el cual afecta en menor medida que el zinc, también tiene puede adherirse fuertemente a la fracción orgánica presente en el suelo y, en las partes superiores del suelo, a componentes como pueden ser la arcilla, limo, arena, etc. (ATSDR, 2004).

5.2.9. Acidificación/eutrofización terrestre

La acidificación, como su propio nombre indica, se produce cuando el suelo se vuelve más ácido, es decir, cuando su pH disminuye por debajo de los valores a los que debería estar. En cuanto a la eutrofización, esta se produce por un aumento de los nutrientes en el suelo o en el agua, lo cual hace que las plantas y otros organismos aumenten su tamaño más de lo normal. La consecuencia de esto es que consumen gran cantidad de oxígeno disuelto y, además, aportan una gran cantidad de materia orgánica. Si bien es cierto, este proceso es más grave en el agua que en el suelo, como se puede observar en el punto 5.2.12.

Al tratarse de un aumento en los nutrientes, es de suponer que el principal causante va a ser el nitrógeno, en concreto los óxidos de nitrógeno (82,42%) emitido

al aire, seguido del dióxido de azufre (20,99%), el cual es el elemento empleado para cuantificar este impacto.

Tabla 25. Compuestos causantes de la acidificación/eutrofización terrestre

No	Sustancia	Compartimento	Unidad	Total
	El total de todos los compartimentos		kg SO2 eq	58,6
	Substancias remanentes		kg SO2 eq	-0,00714
1	Nitrogen oxides	Aire	kg SO2 eq	48,3
2	Sulfur dioxide	Aire	kg SO2 eq	12,3
3	Nitrogen dioxide	Aire	kg SO2 eq	0,325
4	Ammonia	Aire	kg SO2 eq	-2,39

Respecto a los procesos más influyentes, destaca la biofertilización (86,16%) debido a la combustión del combustible por la diferente maquinaria empleada (tabla 26).

Tabla 26. Procesos acidificación/eutrofización terrestre

No	Proceso	Proyecto	Unidad	Total
	El total de todos los procesos		kg SO2 eq	58,6
	Procesos remanentes		kg SO2 eq	19,4
1	Fertilising, by broadcaster {CH} processing Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg SO2 eq	101
2	Electricity, high voltage {ES} electricity production, hard coal Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg SO2 eq	32,6
3	Transport, truck >20t, EURO2, 100%LF, default/GLO Economic	Agri-footprint - economic	kg SO2 eq	10,8
4	Electricity, high voltage {ES} electricity production, oil Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg SO2 eq	6,22
5	Diesel, burned in diesel-electric generating set, 10MW {GLO} diesel, burned i	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg SO2 eq	1,63
6	Blasting {RoW} processing Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg SO2 eq	1,51
7	Electricity, high voltage {ES} electricity production, lignite Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg SO2 eq	1,22
8	Waste natural gas, sour {GLO} treatment of, burned in production flare Allk	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg SO2 eq	1,22
9	Nitric acid, without water, in 50% solution state {RoW} nitric acid production	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg SO2 eq	-1,57
10	Urea, as N {RoW} production Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg SO2 eq	-1,65
11	Fertilising, by broadcaster {CH} processing Alloc Rec, S	Ecoinvent 3 - allocation, r	kg SO2 eq	-114

5.2.10. Ocupación de terreno

La ocupación del terreno hace referencia al terreno que se precisa para que el “sistema del producto” cumpla su función, es decir, incluye la zona donde se han ubicado las infraestructuras empleadas directamente en el tratamiento, pero también las zonas donde se ha aplicado el biofertilizante, infraestructuras que no están en la planta y que están incluidas en los procesos de fertilización o transporte, transformaciones de terreno para extracción de materias primas, terrenos ocupados por las plantas generadoras de energía eléctrica, etc.

Esta categoría es la única en la cual el proceso más influyente, como puede verse en la tabla 27, es la construcción de la planta de tratamiento necesaria (69,41%) debiéndose, principalmente, a la ocupación del terreno para transformarla en una zona industrial, tanto construida (44,49%) como ocupada por vegetación (22,20%). Los dos siguientes que más influyen, después de la planta, es el cobertizo (12,37%) empleado para el almacén de la maquinaria empleada para la fertilización (tractor, arados, etc.)

y la explotación de minas de carbón (5,98%) para, posteriormente, producir electricidad con él.

Tabla 27. Compuestos causantes del impacto de la ocupación de terreno

No	Sustancia	Compartimento	Unidad	Total
	El total de todos los compartimentos		m2org.arable	118
	Substancias remanentes		m2org.arable	1,62
1	Occupation, industrial area, built up	Crudo	m2org.arable	52,5
2	Occupation, industrial area, vegetation	Crudo	m2org.arable	26,2
3	Occupation, forest, intensive	Crudo	m2org.arable	22,4
4	Occupation, dump site	Crudo	m2org.arable	6,08
5	Occupation, construction site	Crudo	m2org.arable	3,17
6	Occupation, traffic area, rail/road embankment	Crudo	m2org.arable	2
7	Occupation, industrial area	Crudo	m2org.arable	1,51
8	Occupation, mineral extraction site	Crudo	m2org.arable	1,19
9	Occupation, traffic area, road network	Crudo	m2org.arable	1,12
10	Occupation, grassland, natural (non-use)	Crudo	m2org.arable	1,09
11	Occupation, urban, discontinuously built	Crudo	m2org.arable	-0,547

Tabla 28. Procesos de ocupación de terreno

No	Proceso	Proyecto	Unidad	Total
	El total de todos los procesos		m2org.arable	118
	Procesos remanentes		m2org.arable	23,6
1	Agua residual_INFRAESTRUCTURA	TFM BIOFERTILIZANTES_	m2org.arable	81,9
2	Shed {CH} construction Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	m2org.arable	14,6
3	Hard coal {RoW} mine operation Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	m2org.arable	7,05
4	Wood chips, wet, measured as dry mass {SE} hardwood forestry, birch, sust	Ecoinvent 3 - allocation, c	m2org.arable	6,14
5	Wood chips, wet, measured as dry mass {SE} softwood forestry, pine, sust	Ecoinvent 3 - allocation, c	m2org.arable	4,67
6	Wood chips, wet, measured as dry mass {SE} softwood forestry, spruce, su	Ecoinvent 3 - allocation, c	m2org.arable	4,54
7	Sawlog and veneer log, softwood, measured as solid wood under bark {RoW}	Ecoinvent 3 - allocation, c	m2org.arable	3,99
8	Sawlog and veneer log, softwood, measured as solid wood under bark {RoW}	Ecoinvent 3 - allocation, c	m2org.arable	3,86
9	Wood chips, wet, measured as dry mass {DE} hardwood forestry, beech, su	Ecoinvent 3 - allocation, c	m2org.arable	3,37
10	Fertilising, by broadcaster {CH} processing Alloc Rec, S	Ecoinvent 3 - allocation, r	m2org.arable	-35,2

5.2.11. Acidificación acuática

La acidificación acuática va ligada con la terrestre, ya que los procesos que la provocan son muy similares, al igual que los compuestos. El principal causante son los procesos de combustión, en particular los empleados en la fertilización del campo. La fertilización supone un 72,28%, pero, como ocurría en la terrestre, la evitada equivale a un 97,28%.

El principal causante de este impacto es el dióxido de azufre (66,85%), SO₂, el cual se genera en procesos de combustión de carburantes fósiles, como pueden ser petróleo o derivados de él, combustibles sólidos..., llevada a cabo en procesos industriales de alta temperatura (MTERD, 2011). En este caso es el combustible empleado para la fertilización, seguido de la quema de carbón para producir electricidad.

Tabla 29. Procesos acidificación acuática

No	Proceso	Proyecto	Unidad	Total
	El total de todos los procesos		kg SO2 eq	18,4
	Procesos remanentes		kg SO2 eq	4,95
1	Fertilising, by broadcaster {CH} processing Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg SO2 eq	13,3
2	Electricity, high voltage {ES} electricity production, hard coal Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg SO2 eq	12
3	Electricity, high voltage {ES} electricity production, oil Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg SO2 eq	1,42
4	Transport, truck >20t, EURO2, 100%LF, default/GLO Economic	Agri-footprint - economic	kg SO2 eq	1,35
5	Waste natural gas, sour {GLO} treatment of, burned in production flare All	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg SO2 eq	0,923
6	Hard coal {RoW} mine operation Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg SO2 eq	0,734
7	Electricity, high voltage {ES} electricity production, lignite Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg SO2 eq	0,491
8	Natural gas, high pressure {RoW} natural gas production Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg SO2 eq	0,485
9	Heat, central or small-scale, other than natural gas {RoW} heat production,	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg SO2 eq	0,345
10	Electricity, high voltage {ZA} electricity production, hard coal Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg SO2 eq	0,321
11	Fertilising, by broadcaster {CH} processing Alloc Rec, S	Ecoinvent 3 - allocation, r	kg SO2 eq	-17,9

5.2.12. Eutrofización acuática

La eutrofización acuática, al igual que la acidificación, son procesos muy parecidos a los que ocurren en el suelo, pero en este caso en el agua. Si bien es cierto, la eutrofización es más común en el agua. Esta es la última categoría dentro del evaluación de daño correspondiente al ecosistema.

Como se ha comentado en el punto 5.2.9., la eutrofización del medio se produce por un aumento elevado de nutrientes, por tanto, se puede esperar que el vertido del efluente (99,38%) tenga una gran importancia, al igual que lixiviación del fósforo y nitrógeno aplicados al suelo mediante la biomasa, la cual contiene un gran porcentaje de fracción líquida.

Tabla 30. Compuestos eutrofización acuática

No	Sustancia	Compartimento	Unidad	Total
	El total de todos los compartimentos		kg PO4 P-lim	48,5
	Substancias remanentes		kg PO4 P-lim	0,0349
1	Phosphorus, total	Suelo	kg PO4 P-lim	27,9
2	Phosphorus	Agua	kg PO4 P-lim	20,3
3	Phosphate	Agua	kg PO4 P-lim	0,261

5.2.13. Calentamiento global

En el punto 5.1. se ha comentado ya la influencia que de los diferentes compuestos que se emiten a la atmósfera durante el proceso y, más en concreto, el metano, al tratarse del que tiene una influencia mayor.

El calentamiento global está producido por un aumento en la concentración en la atmósfera de diferentes compuestos con un poder de calentamiento global importante, lo cual provoca un aumento de la temperatura media de la Tierra.

Tabla 31. Procesos calentamiento global

No	Proceso	Proyecto	Unidad	Total
	El total de todos los procesos		kg CO2 eq	1,21E4
	Procesos remanentes		kg CO2 eq	1,1E3
1	Agua residual de tratamiento de purines con microalgas_NUEVO	TFM BIOFERTILIZANTES_	kg CO2 eq	9,51E3
2	Fertilising, by broadcaster {CH} processing Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg CO2 eq	1,32E3
3	Electricity, high voltage {ES} electricity production, hard coal Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg CO2 eq	1,15E3
4	Electricity, high voltage {ES} electricity production, natural gas, combined cy	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg CO2 eq	376
5	Electricity, high voltage {ES} electricity production, oil Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg CO2 eq	219
6	Transport, truck >20t, EURO2, 100%LF, default/GLO Economic	Agri-footprint - economic	kg CO2 eq	183
7	Electricity, high voltage {ES} heat and power co-generation, natural gas, cor	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg CO2 eq	169
8	Hard coal {RoW} mine operation Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	kg CO2 eq	137
9	Fertilising, by broadcaster {CH} processing Alloc Rec, 5	Ecoinvent 3 - allocation, r	kg CO2 eq	-2,02E3

Efectivamente el tratamiento de purines contribuye en un 78,60% debido a los almacenamientos de purines al aire libre, estos tienen una contribución importante en las emisiones globales. Al igual que otras categorías, aquellas que en las que se ve afectada la atmósfera, los procesos de combustión para fertilizar y generar electricidad son muy importantes en el balance global.

5.2.14. Energía no renovable

Las energías no renovables son aquellas que se producen con materias primas que no se pueden recuperar, es decir, tienen fecha de caducidad y en algún momento se acabarán. Estas energías son las que se producen con combustibles fósiles (petróleo, gas o carbón) o la nuclear, principalmente. Lógicamente el impacto de estas energías es muy elevado, como se ha ido viendo hasta el momento. Hasta este punto la electricidad es causante principal o muy influyente en 9 categorías de 15, ya que en la próxima (extracción de minerales) no lo es.

La electricidad empleada en el cálculo ha sido aquella que describe la electricidad disponible en el nivel de media tensión en este país, explicada en el punto 4.2.4.1. La sustancia más relevante es el uranio (36,66%), sustancia radiactiva empleada en la producción de energía nuclear, seguida del gas natural (25,05%) y del carbón (23,59%). Comparando estos porcentajes con los relativos al mix, se observa que los dos primeros son coherentes con su relevancia, sin embargo, se advierte lo perjudicial que es el para el medio ambiente el uso de carbón como materia prima para producir energía ya que, una pequeña cantidad, genera un gran impacto.

Tabla 32. Compuestos energía no renovable

No	Sustancia	Compartimento	Unidad	Total
	El total de todos los compartimentos		MJ primary	5,51E4
	Substancias remanentes		MJ primary	2,26
1	Uranium	Crudo	MJ primary	2,02E4
2	Gas, natural/m3	Crudo	MJ primary	1,38E4
3	Coal, hard	Crudo	MJ primary	1,3E4
4	Oil, crude	Crudo	MJ primary	3,94E3
5	Energy, from oil	Crudo	MJ primary	2,87E3
6	Coal, brown	Crudo	MJ primary	828
7	Energy, from gas, natural	Crudo	MJ primary	259
8	Gas, mine, off-gas, process, coal mining/m3	Crudo	MJ primary	241

En los procesos más influyentes se observa esto mismo, la extracción de carbón de la misma supone el 23,96%, seguido de la producción del uranio (15,01%) y del petróleo (28,75%).

5.2.15. Extracción de minerales

Si bien es cierto que la extracción de minerales tiene un pequeño impacto, casi resulta ser negativa por la gran influencia de las cargas evitadas. Los compuestos que más afectan en esta categoría son, lógicamente, metales pesados. Estos metales se utilizan en la fabricación de las distintas maquinarias empleadas en el proceso. Los compuestos son, como se suponen con la tabla 33, el níquel y diferentes tipos de cobre.

Tabla 33. Procesos extracción de minerales

No	Proceso	Proyecto	Unidad	Total
	El total de todos los procesos		MJ surplus	7,22
	Procesos remanentes		MJ surplus	11,4
1	Ferronickel, 25% Ni {GLO} production Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	MJ surplus	29,4
2	Copper {RoW} gold-silver-zinc-lead-copper mine operation and refining Allo	Ecoinvent 3 - allocation, c	MJ surplus	28,5
3	Copper concentrate {RAS} copper mine operation Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	MJ surplus	17,4
4	Copper concentrate {RNA} copper mine operation Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	MJ surplus	8,36
5	Copper concentrate {RoW} copper mine operation Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	MJ surplus	8,12
6	Copper {RU} platinum group metal mine operation, ore with high palladium cc	Ecoinvent 3 - allocation, c	MJ surplus	7,59
7	Copper concentrate {RLA} copper mine operation Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	MJ surplus	6,13
8	Zinc concentrate {GLO} zinc-lead mine operation Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	MJ surplus	6,07
9	Iron ore, crude ore, 46% Fe {GLO} iron mine operation, crude ore, 46% Fe	Ecoinvent 3 - allocation, c	MJ surplus	4,86
10	Copper, from solvent-extraction electro-winning {GLO} copper production, s	Ecoinvent 3 - allocation, c	MJ surplus	4,76
11	Lead concentrate {GLO} zinc-lead mine operation Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	MJ surplus	3,84
12	Bauxite, without water {GLO} bauxite mine operation Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	MJ surplus	2,67
13	Copper concentrate {RER} copper mine operation Alloc Def, U	Ecoinvent 3 - allocation, c	MJ surplus	2,54
14	Lead {RoW} gold-silver-zinc-lead-copper mine operation and refining Alloc C	Ecoinvent 3 - allocation, c	MJ surplus	1,81
15	Ammonium sulfate, as N {GLO} nickel mine operation, sulfidic ore Alloc Def,	Ecoinvent 3 - allocation, c	MJ surplus	-1,88
16	Nickel, 99.5% {RU} platinum group metal mine operation, ore with high pallac	Ecoinvent 3 - allocation, c	MJ surplus	-2,54
17	Fertilising, by broadcaster {CH} processing Alloc Rec, 5	Ecoinvent 3 - allocation, r	MJ surplus	-132



5.3. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Como se ha citado el punto 4.2.7., se han utilizado dos bibliografías diferentes de referencia. Lo primero a comentar antes de discutir los resultados es que en ambas se ha utilizado el método ReCiPe, por los que los resultados se han calculado para este método para poder proceder a la comparación. El principal objetivo del método ReCiPe es el de transformar una larga lista de resultados del inventario del ACV en un número inferior y limitado de puntuaciones de indicadores. Dichas puntuaciones indican la gravedad relativa en una categoría de impacto (Pre-sustainability, 2016).

Los diferentes valores de los casos de referencia junto con los casos de estudio aparecen mostrados en la tabla 34.

En cuanto a la comparación con el caso de estudio 1, primeramente, se observa que el valor relativo al cambio climático es muy parecido debido a que en ambos casos la mayor contribución ocurre en el proceso de tratamiento del purín, en el caso de estudio las emisiones son de 45,7 kgCO₂-eq y en el caso de estudio 1 de 52,4 kgCO₂-eq. Sin embargo, respecto al caso de estudio 2 este es casi 6 veces inferior, esta diferencia se debe en su gran mayoría a la diferencia en los consumos de electricidad, debido a que estos son más de 8 veces inferiores respecto al caso 2. Esto tiene sentido ya que, como se ha explicado anteriormente, la producción de electricidad es uno de los causantes principales en este impacto.

En el caso de la toxicidad hacia los seres humanos destaca la gran diferencia que hay respecto a los dos casos de referencia. Esta categoría de impacto está determinada por las emisiones de metales pesados tanto al agua como al suelo. En particular, la principal emisión es al agua debida al efluente vertido y, en concreto, a los metales manganeso y selenio. Tanto en el caso de estudio 1 como en el 2, estos dos metales no se han tenido en cuenta en el estudio, lo cual puede ser una de las razones por las que estos valores sean mucho más inferiores.

Por último, el agotamiento de los recursos fósiles también es diferente entre los diferentes casos. Si bien es prácticamente el mismo entre el caso de estudio y el trabajo realizado por Corbala, el caso de Brockmann es muy inferior, concretamente negativo. El hecho de ser negativo significa que los impactos no ocasionados por las cargas evitadas son superiores a los impactos generados por las operaciones realizadas. En este caso concreto de impacto los mayores causantes de él son los fertilizantes evitados por la aplicación del biofertilizante y, por el otro lado, la extracción de las diferentes materias primas para la generación de electricidad. En cuanto al caso de Corbala, los procesos que más afectan al agotamiento de los fósiles son el transporte y fabricación de los químicos empleados (1,41 kg oil-eq) y la generación de la electricidad (1.68 kg oil-eq) empleada en el funcionamiento de la planta y, en menor medida, el transporte del purín hasta la planta de tratamiento (0,977 kg oil-eq); a su vez, las cargas evitadas más influyentes son la producción evitada del fertilizante



químico debida a la aplicación del efluente (0,899 kg oil-eq) y la debida al compost (0,906 kg oil-eq).

Respecto al estudio de Brockmann, el principal causante en cuanto a las cargas positivas es el transporte del compost (en torno al 25% de las cargas positivas) seguido de la construcción de la electricidad necesaria (<20%). La influencia de la electricidad es muy parecida a la de la fabricación de la infraestructura necesaria, a diferencia del estudio de Brockmann en el cual la infraestructura suponía un 2,5% de las cargas positivas y la electricidad un 29,27%. Esta es una de las razones por la que, en este estudio, este impacto es mucho menor. En lo referente a las cargas negativas, el 100% se debe a los minerales evitados debido a la producción del fertilizante químico.

En el caso de estudio correspondiente a este trabajo, el principal causante es la extracción en mina del carbón de hulla (1,45 kg oil-eq), utilizado para la generación de energía eléctrica (1,31 kg oil-eq), seguido de la producción de petróleo (0,874 y 0,864 kg oil-eq) utilizado para el proceso de biofertilización (0,75 y 0,741 kg oil-eq, respectivamente). Las cargas negativas (3,11 kg oil-eq) son debidas al 100% al fertilizante evitado.

Tabla 34. Comparación con los estudios de referencia

	Unidades	Tratamiento microalgas	Estudio 1: Brockmann	Estudio 2: Corbala
Climate change	kg CO2-eq	58,4	52	9,8
Terrestrial acidification	kg SO2-eq	0,0875	1,1	0,229
Marine eutrophication	kg N-eq	2,06	0,15	0,106
Particulate matter formation	kg PM10-eq	0,0291	0,15	0,0361
Human toxicity	kg 1.4-DCB-eq	626	5,7	11
Ionizing radiation	kg U235-eq	5,9	17,2	12
Fossil depletion	kg oil-eq	3,75	-0,55	3,73

5.4. INFLUENCIA DE LA INFRAESTRUCTURA

Para determinar la influencia que tiene la fabricación de la infraestructura se ha realizado una comparación entre esta y el tratamiento del purín, excluyendo de él la parte correspondiente a la construcción.

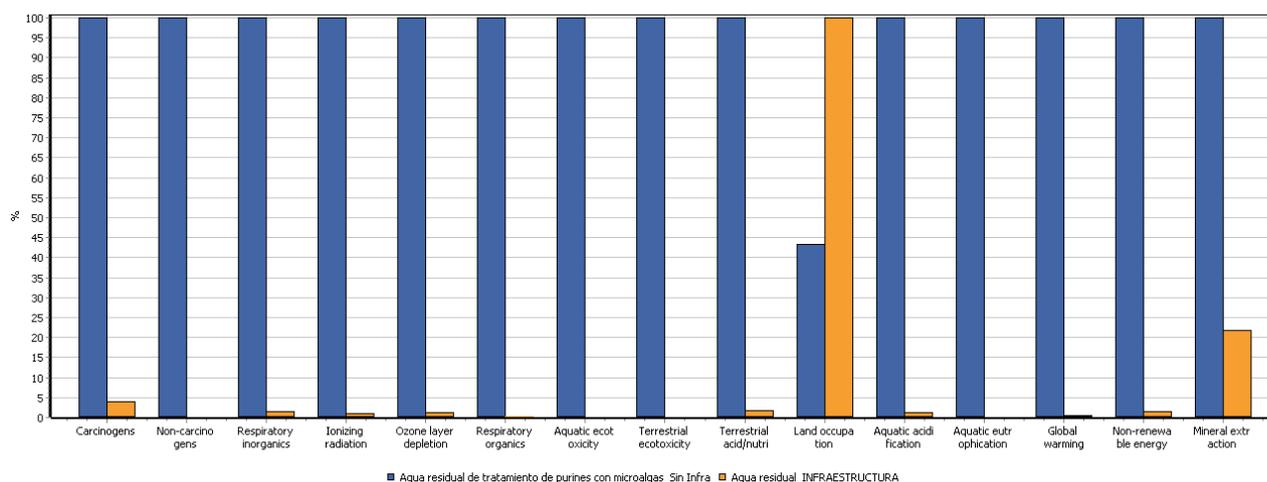


Figura 10. Infraestructura vs Tratamiento

En la siguiente gráfica se observa la comparación entre los dos procesos. El tratamiento del purín es superior su influencia en todas las categorías exceptuando la ocupación del terreno. Tiene sentido que así sea ya que es donde más impacto va a tener la infraestructura debido a que va a ocupar una amplia zona del terreno.

En la categoría de extracción de minerales tiene también un cierto peso, sin embargo, es menor al que se preveía, por lo que se supone que la extracción de los metales que aparecen en el punto 5.2.15. hacen también referencia a la extracción primaria de los metales pesados que corresponden al purín.

Con esta comparación se observa que, pese a tener una cierta importancia, la infraestructura tiene un peso relativamente pequeño en el análisis global por lo que, en el posterior análisis de sensibilidad se van a tratar otros aspectos más influyentes que la infraestructura, como puede ser por ejemplo la electricidad o distintos métodos de almacenamiento.

5.5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

5.5.1. Análisis electricidad

La electricidad es uno de los factores más influyentes en el desarrollo del proceso, concretamente la manera en la que se produce. Por esta razón la electricidad es el primer elemento a modificar para observar cómo varía su influencia tras variar el tipo de electricidad seleccionada. Para el cálculo anterior la electricidad elegida ha

sido *médium voltage {ES}, market for, Alloc Def.* y, para este nuevo, se ha seleccionado: *electricity grid mix 1 kV-60kV, AC, consuption mix, at consumer, ES.*

Esta nueva electricidad tiene en cuenta una producción de energía más ajustada a la realidad del mix eléctrico español. La electricidad en España cuenta con una gran generación eléctrica proveniente de energías renovables (46,6%), aun así, en 2021 el 20,6% fue generado por energía nuclear, 17,6% por ciclo combinado, 10% cogeneración y 1,9% por carbón, sumado a otros minoritarias dando un total de 53,4% de energía producida por no renovables (Red Eléctrica, 2021).

En esta nueva electricidad los conjuntos de datos representan el suministro medio de electricidad específico del país para los consumidores finales, incluyendo el consumo propio, las pérdidas netas y las importaciones de los países vecinos. Las combinaciones nacionales de portadores de energía utilizadas para la producción de electricidad, así como los datos sobre eficiencia, pérdidas netas y consumo propio, se han tomado de las estadísticas oficiales (principalmente de la Agencia Internacional de la Energía).

En definitiva, se trata de una electricidad mucho más exacta y ajustada a la realidad, con lo que se obtiene la siguiente comparación entre el proceso anterior (amarillo) y el nuevo (azul).

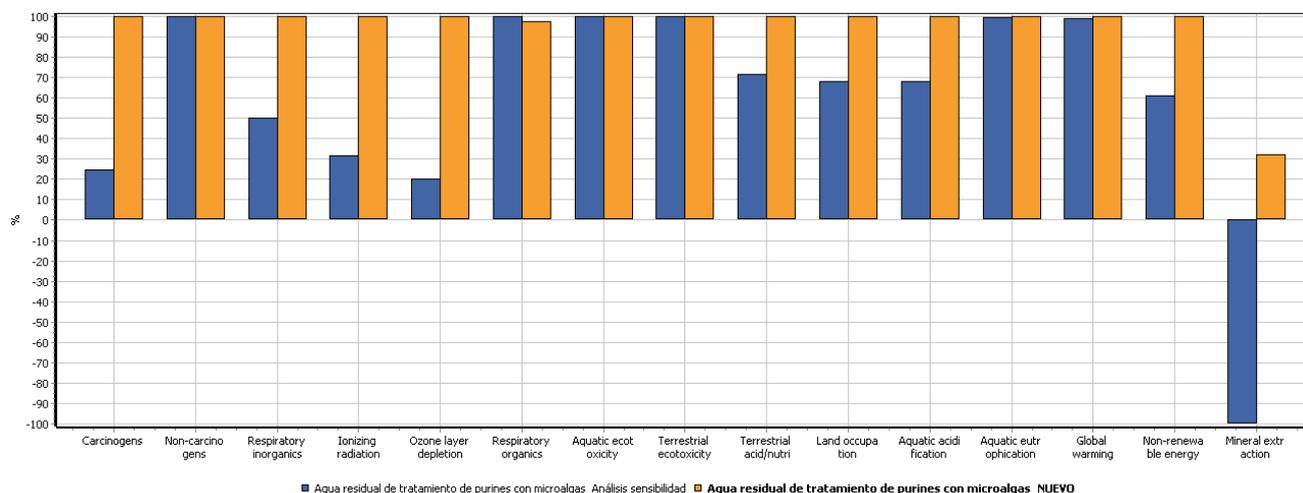


Figura 11. Análisis de sensibilidad, electricidad

Como se observa en la figura 11, la influencia del cambio de electricidad supone una disminución en el impacto importante. Destaca que la influencia en la extracción de minerales de la nueva electricidad es negativa, lo cual es debido a que la influencia de las cargas evitadas es superior al impacto de las cargas aplicadas.

Se puede advertir que aquellas categorías en las que la problemática está asociada a las emisiones a la atmósfera de compuestos generados en la combustión de combustibles fósiles y a la utilización de materiales nucleares el impacto de esta

nueva electricidad es mucho menor. Esto se debe a que en esta nueva electricidad la producción de energía renovable está mejor calculada y tiene un peso mucho mayor en la influencia final, lo cual se observa también en que la extracción de materia prima es muy inferior.

5.5.2. Almacenamiento del purín

El almacenamiento del purín es una de las fuentes principales de emisiones a la atmósfera y, en concreto, de metano. Este compuesto es el principal factor en la contribución al calentamiento global, suponiendo un problema muy importante. Por ello se ha planteado una nueva situación en la que el purín se almacene en unas cisternas como las que se han seleccionado para la biomasa, económicamente es mucho peor ya que su coste es mucho más elevado al de una balsa, pero en este análisis no se está teniendo en cuenta el factor económico.

Estas cisternas logran evitar casi al 100% las emisiones de la biomasa debido a que este es un producto ya tratado y estabilizado, sin embargo, en el caso del purín se ha supuesto que la disminución es de entorno al 80% en el almacenamiento del purín en la planta, los almacenamientos en la granja se suponen iguales. Respecto a los materiales utilizados, estos se ven afectados también ya que estas cisternas tienen una capacidad máxima de 2.000 m³, por lo que van a ser necesarias 7 cisternas. Este aumento de las cisternas supone un gran aumento en los materiales empleados.

En la figura 12 aparece mostrada la comparación entre ambos procesos.

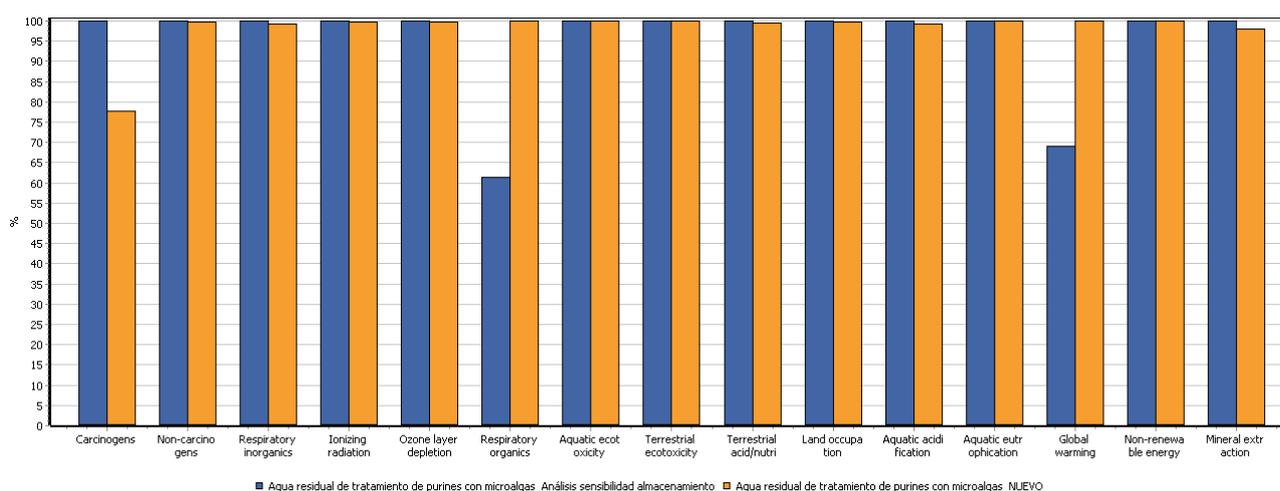


Figura 12. Análisis sensibilidad almacenamiento purín

Como se puede observar y se podía esperar, el cambio producido es inferior al que se produce al variar la electricidad. El calentamiento global disminuye considerablemente ya que las emisiones de metano son inferiores, por lo que, si el único objetivo es este, el cambio tiene sentido.

A su vez, otras categorías se ven aumentadas debido al aumento de los materiales necesarios para su implantación. Estas son claramente la emisión de sustancias cancerígenas o, en menor medida, las de extracción de minerales o de energías no renovables. Ese aumento es debido a los procesos necesarios para la obtención de PVC (*Polyvinyl chloride*), material del cual son fabricadas las cisternas empleadas.

En la siguiente figura se puede observar también un diagrama radial en el cual se ve la comparación entre ambos casos, observándose claramente la disminución tanto en el calentamiento global como en las emisiones de sustancias orgánicas y el aumento de las emisiones de sustancias carcinógenas.

La disminución en las emisiones de calentamiento global y de sustancias orgánicas respiratorias se debe a la considerable disminución que se produce al tener al purín dentro de unas cisternas cerradas. Sin embargo, las sustancias carcinógenas se ven ligeramente aumentada debido a que la producción del PVC provoca las emisiones de estas sustancias y, por otro lado, el purín no es gran generador de ellas.

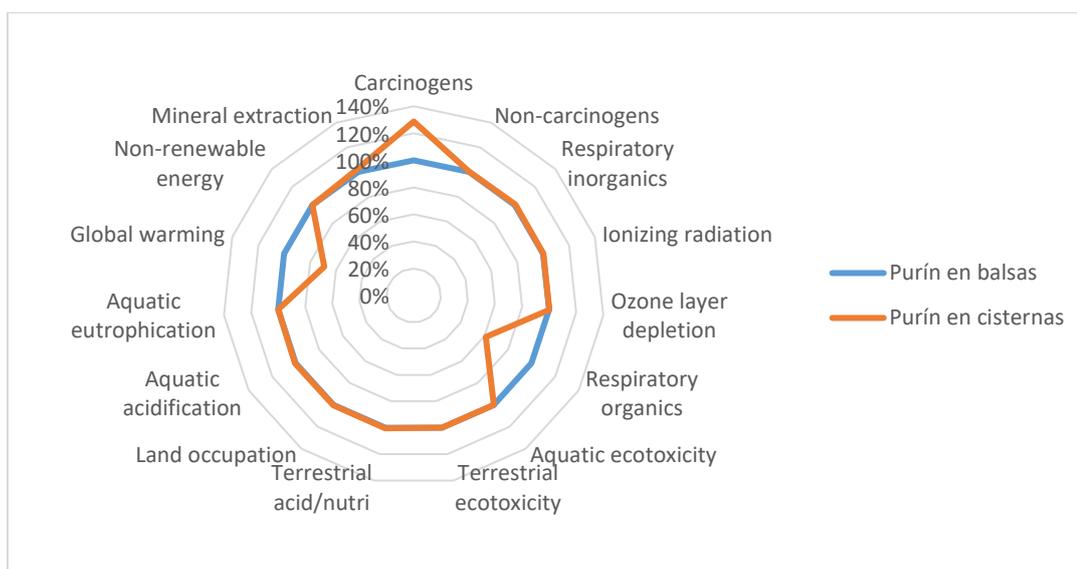


Figura 13. Diagrama radial de análisis de sensibilidad debido al almacenamiento del purín

5.5.3. Influencia del tiempo de retención hidráulico (TRH)

El tiempo de retención hidráulico es una de las variables que se ha supuesto dentro de un rango para realizar el estudio, por esta razón ha sido seleccionada para analizar su influencia en el resultado final. Para el estudio inicial este valor se ha tomado de 3 días ya que los valores típicos rondaban entre los 2 y los 4 días, por esto para el análisis de sensibilidad se ha cambiado este a los 4 días. Este aumento del TRH supone, de manera directa, el aumento del volumen del reactor ya que el caudal de entrada es siempre el mismo. Este aumento del volumen, suponiendo que la profundidad es la misma (5 cm.), conlleva un aumento del área del reactor

(16.558,18m²) y, por tanto, este valor influye, por ejemplo, en la evaporación de agua ya que se va a ver aumentada también.

Al igual que en el caso anterior, se ha elaborado también un diagrama radial para ver la diferencia entre los dos procesos y, por ende, la influencia del TRH en el resultado final. En este diagrama se observa que la diferencia en la mayoría de las categorías de impacto es mínima. En la categoría correspondiente a la ocupación del terreno se observa una pequeña diferencia debida al aumento de la superficie del reactor anteriormente comentada.

Sin embargo, donde más diferencia se nota es en la categoría correspondiente a la extracción de minerales. En este apartado se observa que, al aumentar el tiempo de retención hidráulico, se pasa de 7,22 MJ surplus a -1,4 MJ surplus. La razón principal de este cambio es que al aumentar el TRH se obtiene un 33% más de biomasa, por lo que el fertilizante químico evitado va a ser también un 33% superior.

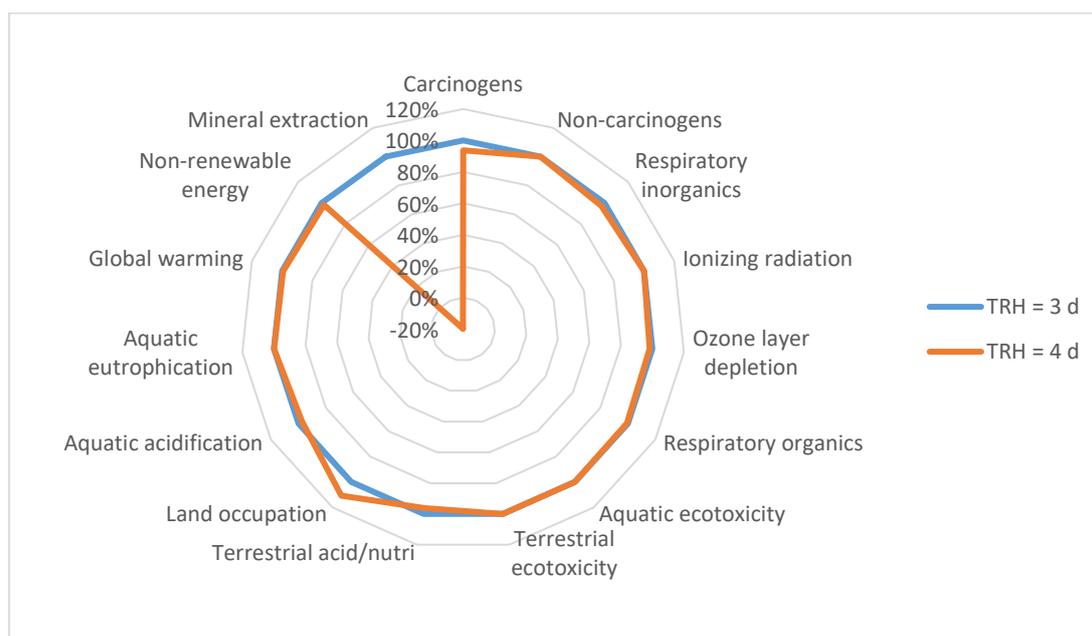


Figura 14. Diagrama radial del análisis de sensibilidad del TRH



6. CONCLUSIÓN

Tras realizar los análisis mostrados hasta este punto se puede llegar a la conclusión de que, lógicamente, la biomasa algal obtenida tras el tratamiento de valorización de purines sigue generando un impacto importante en el medio ambiente. La electricidad utilizada para su tratamiento se muestra como una de las principales causantes de este impacto, como demuestra el análisis de sensibilidad realizado en el cual, tras corregir la electricidad empleada a una mejor aproximada, se ha observado una disminución importante en las emisiones. Esta demostración puede hacer pensar en que este tiene que ser uno de los puntos a priorizar en la mejora a la hora de la futura implantación de estos sistemas a nivel industrial. Una solución puede ser mediante la instalación en la planta de paneles solares o mediante molinos eólicos, por ejemplo, con el objetivo de disminuir el consumo de electricidad proveniente de combustiones fósiles o nuclear.

Por otro lado, se demuestra que el almacenamiento no es tan relevante como se podía imaginar, si bien es cierto, tiene una cierta influencia en las emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente por el metano. Pese a esto, se podrían aplicar también una serie de mejoras al proceso como puede ser tapar la zona donde se almacena el purín mediante una lona o algún sistema parecido.

También se demuestra con el análisis de sensibilidad al tiempo de retención hidráulico la influencia que tienen las cargas evitadas en el resultado final ya que, a mayor TRH, mayor es la producción de biomasa y, por tanto, mayor es el fertilizante químico evitado.

Finalmente, y ya como conclusión personal, la realización de este trabajo me ha servido para obtener un conocimiento acerca del tratamiento de aguas residuales mediante microalgas que no tenía, conocer mucho más sobre la problemática que generan los purines en nuestro país y, por supuesto, mejorar mi conocimiento y el manejo en el uso del software SimaPro y en la búsqueda de información.



7. BIBLIOGRAFÍA

- 3tres3. (2019, April 17). *FAO: producción y comercio mundial de carne de cerdo en 2018 - Noticias - 3tres3, la página del Cerdo*. https://www.3tres3.com/ultima-hora/fao-produccion-y-comercio-mundial-de-carne-de-cerdo-en-2018_40972/
- Acién Fernández, F. G., Fernández Sevilla, J. M., & Molina Grima, E. (2013). Photobioreactors for the production of microalgae. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 12(2), 131–151. <https://doi.org/10.1007/s11157-012-9307-6>
- acueducto2.com. (2020, March 10). *La comarca de Cuéllar concentra el 70% de los cerdos de la provincia | Acueducto2*. <https://www.acueducto2.com/la-comarca-de-cuellar-concentra-el-70-de-los-cerdos-de-la-provincia/95562>
- Arza Ingeniería. (2015, December 7). *Requisitos medioambientales para las explotaciones ganaderas*. <https://www.campogalego.es/requisitos-medioambientales-para-las-explotaciones-ganaderas/>
- ASAE. (2003). *Manure Production and Characteristics*.
- Astutui, J. T., Sriwuryandari, L., Priantoro, E. A., & dan Sembiring, T. (2012). *OUTDOORS BATCH CULTIVATION OF MARINE MICROALGAE Nannochloropsis sp USING PARALLEL GLASS TUBULAR PHOTOBIOREACTOR*. <https://www.researchgate.net/publication/282332801>
- ATSDR. (2004). *ATSDR - Resumen de Salud Pública: Cobre*. www.atsdr.cdc.gov/es
- ATSDR. (2005). *Resumen de Salud Pública: Cinc*. www.atsdr.cdc.gov/es
- BOCYL. (2018). *Decreto 4/2018*. https://noticias.juridicas.com/base_datos/CCAA/615551-d-4-2018-de-22-feb-ca-castilla-y-leon-condiciones-ambientales-minimas-para.html
- BOCYL. (2020). *DECRETO 5/2020, de 25 de junio*.
- BOE. (1996). *Real Decreto 261/1996*. <https://www.boe.es/eli/es/rd/1996/02/16/261/dof/spa/pdf>
- Bolado Rodríguez, S., & Fernandez Sevilla, J. M. (2021). *Producción sostenible de bioestimulantes y biopesticidas agrícolas a partir de residuos agroindustriales (GREENFARM)*.
- Brockmann, D., Hanhoun, M., Négri, O., & Hélias, A. (2014). Environmental assessment of nutrient recycling from biological pig slurry treatment - Impact of



- fertilizer substitution and field emissions. *Bioresource Technology*, 163, 270–279. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.04.032>
- Casassas, J. (2004, October 15). *Aplicación agrícola de los purines, riesgos de contaminación y caracte - Artículos - 3tres3, la página del Cerdo*. https://www.3tres3.com/articulos/aplicacion-agricola-de-los-purines-riesgos-de-contaminacion-y-caracte_932/
- Cisterneo. (n.d.). *Almacenamiento de efluentes (estiércol, aguas residuales, digestato ...) en tanque flexible*. Retrieved July 3, 2022, from <https://www.cisterneo.es/efluentes>
- Climate-Data. (n.d.). *Clima Cuéllar: Temperatura, Climograma y Tabla climática para Cuéllar - Climate-Data.org*. Retrieved June 22, 2022, from <https://es.climate-data.org/europe/espana/castilla-y-leon/cuellar-25609/>
- Collao, J., García Encina, P., Blanco, S., Bolado Rodríguez, S., & Fernández Gonzalez, N. (2022). *Current concentrations of Zn, Cu and As in piggery wastewater compromise nutrient removals in microalgae-bacteria photobioreactors due to altered microbial communities*.
- Condorchem Envitech. (n.d.). *Tratamiento de purines | Condorchem Envitech*. Retrieved June 24, 2022, from <https://condorchem.com/es/blog/tratamiento-de-purines/>
- Corbala-Robles, L., Sastafiana, W. N. D., van linden, V., Volcke, E. I. P., & Schaubroeck, T. (2018). Life cycle assessment of biological pig manure treatment versus direct land application – a trade-off story. *Resources, Conservation and Recycling*, 131, 86–98. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.010>
- Corominas, L., Foley, J., Guest, J. S., Hospido, A., Larsen, H. F., Morera, S., & Shaw, A. (2013). Life cycle assessment applied to wastewater treatment: State of the art. In *Water Research* (Vol. 47, Issue 15, pp. 5480–5492). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.06.049>
- Doka, G. (2003). *Part IV. Wastewater Treatment*.
- El Norte de Castilla. (2019, April 4). *Los nitratos contaminan las aguas de 117 municipios segovianos | El Norte de Castilla*. <https://www.elnortedecastilla.es/segovia/nitratos-contaminan-aguas-20190404125101-nt.html>
- EMEP-EEA. (2009). *EEA air pollutant emission inventory guidebook 2009*. <http://eea.europa.eu/emep-eea-guidebook>



Goedkoop, M. J., & Spriensma, R. (2001). *The Eco-Indicator 99: A Damage Oriented Method for Life Cycle Impact Assessment*.

<https://www.researchgate.net/publication/247848113>

Google Maps. (2022). *Google Maps*. <https://www.google.es/maps/@41.6546816,-4.7218688,14z?hl=es>

Guinée, J. B., Gorrée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., de Koning, A., van Oers, L., Wegener Sleeswijk, A., Suh, S., & Udo de Haes, H. A. (2001). *Life cycle assesment. An operational guide to the ISO standars*.

Hidrostal. (2015). *FOLLETO BOMBA CENTRIFUGA ISO/DIS 2858*.

IFADATA. (2019). *IFADATA Results*.

<http://ifadata.fertilizer.org/ucResult.aspx?temp=20220407045159>

IPPC. (2006). *Chapter 10- EMISSIONS FROM LIVESTOCK AND MANURE MANAGEMENT Contributing Authors. 4*.

ISO. (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>

ISO. (2006b). *UNE-EN ISO 14044:2006 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de...*
<https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=norma-une-en-iso-14044-2006-n0038059>

Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G., & Rosenbaum, R. (2003). *IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology*. <http://www.epfl.ch/impact>

Laval, A. (n.d.). *Alfa Laval ALDEC G3 range of decanter centrifuges*.

Martín Juárez, J., Lorenzo Hernando, A., Muñoz Torre, R., Blanco Lanza, S., & Bolado Rodríguez, S. (2016). Saccharification of microalgae biomass obtained from wastewater treatment by enzymatic hydrolysis. Effect of alkaline-peroxide pretreatment. *Bioresource Technology*, 218, 265–271.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.06.087>

Martín Rubio, L. (2019). *Estudio y comparación de alternativas de valorización de biomasa algal crecida en plantas de tratamiento de aguas residuales*.

Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. (2010). *Caracterización de sistemas de gestión de deyecciones. Sector porcino intensivo*.
<http://www.060.es>



- Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. (n.d.). *Impacto ambiental de los hidrocarburos y recuperación de los ecosistemas*. Retrieved July 25, 2022, from https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-medio-marino/plan-ribera/contaminacion-marina-accidental/impacto_ambiental.aspx
- MTERD. (n.d.). *Inventario de instalaciones - Inventario Completo| PRTR España*. Retrieved June 15, 2022, from <https://prtr-es.es/Informes/InventarioInstalacionesIPPC.aspx>
- MTERD. (2011). *Dióxido de azufre*. <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/salud/dioxido-azufre.aspx>
- Nemecek, T., Schnetzer, J., & Reinhard, J. (2016). Updated and harmonised greenhouse gas emissions for crop inventories. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9), 1361–1378. <https://doi.org/10.1007/S11367-014-0712-7>
- NIH. (2021a). *Definición de radiación ionizante - Diccionario de cáncer del NCI - NCI*. <https://www.cancer.gov/espanol/publicaciones/diccionarios/diccionario-cancer/def/radiacion-ionizante>
- NIH. (2021b, July 1). *Carcinógeno*. <https://www.genome.gov/es/genetics-glossary/Carcinogeno>
- Osorio, V., Paredes, L., Proia, L., Martínez, O. M., Boy-Roura, M., Ponsá, S., & Gros, M. (2021). *Demostración de la capacidad de reducción de antibióticos en tecnologías de tratamiento de purines*.
- Pre-sustainability. (2016, August 29). *ReCiPe - PRé Sustainability*. <https://pre-sustainability.com/articles/recipe/>
- Red Eléctrica. (2021, December 16). *La eólica se convierte en la principal fuente de generación de energía eléctrica en España en 2021 | Red Eléctrica*. <https://www.ree.es/es/sala-de-prensa/actualidad/nota-de-prensa/2021/12/la-eolica-se-convierte-en-la-principal-fuente-de-generacion-de-energia-electrica-en-espana-en-2021>
- Simapro. (n.d.). *SimaPro, el software líder en ACV - CADIS*. Retrieved June 26, 2022, from <https://network.simapro.com/cadis/>
- Templeton, D. W., & Laurens, L. M. L. (2015). *Nitrogen-to-protein conversion factors revisited for applications of microalgal biomass conversion to food, feed and fuel*. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.07.013>



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

Valdecantos, A., Fuentes, D., Cortina, J., & Casanova, G. (2002).

*APROVECHAMIENTO DE LOS PURINES. REQUISITOS PARA SU
UTILIZACIÓN AGRARIA Y FORESTAL.*

WAM Group. (2022). *SE Submersible Agitators | Equipo y máquinas para el
tratamiento de purines- WAMGROUP.* [https://wamgroup.es/es-
ES/WAMES/Product/SE/Submersible-Agitators?s=609](https://wamgroup.es/es-ES/WAMES/Product/SE/Submersible-Agitators?s=609)

Wesnaes, M., Wenzel, H., & Petersen, B. M. (2009). *Life Cycle Assessment of Slurry
Management Technologies.*



ANEXO I. BALANCE DE MATERIA

Tras definir, en el punto 4.1., los diferentes procesos que se realizan dentro de la planta de tratamiento, el paso siguiente es hacer el balance de materia al sistema. Este balance aparece mostrado en la tabla 37.

Primeramente, se realizó el balance de materia para un valor de caudal inferior, concretamente de 45.000 L/año. Este valor se obtuvo de la memoria del proyecto Greenfarm (Bolado Rodríguez & Fernández Sevilla, 2021) debido a que este tipo de plantas solo se encuentran a nivel de ensayo.

Para poder realizar el balance ha sido necesario suponer una serie de valores obtenido de diferentes bibliografías, como la de Greenfarm (Bolado Rodríguez & Fernández Sevilla, 2021), y a través de mi tutora Silvia Bolado Rodríguez.

Tabla 35. Valores supuestos para realizar el balance

Eliminación COT	90 %
Eliminación NT	60 %
Eliminación PT	60 %
Productividad	30 g/(m ² *d)
TRH	3 d
Profundidad	5 cm
Evaporación	6 L/(m ² *d)

Respecto a la productividad es uno de los parámetros más difíciles de suponer debido a que va a depender de muchos factores. Las algas necesitan la luz para realizar la fotosíntesis, por lo que la profundidad de la balsa no puede ser muy elevada. Por esta razón se ha escogido el valor de 5 centímetros, aunque podría haber sido incluso menor, pero de esta manera su área sería todavía superior. La profundidad no es el único factor que influye, la concentración en la que se encuentren los sólidos influye de manera importante debido a que una alta concentración genera una elevada opacidad y, por tanto, no permite entrar a la luz. Por todas estas razones se ha seleccionado la productividad de 30 g/(m²*d) (Bolado Rodríguez & Fernández Sevilla, 2021).

El Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) hace referencia al tiempo que se encuentra el agua dentro del reactor. Este valor se define como el volumen de este entre el caudal inicial, es decir, entre el caudal de purín de entrada. Según la bibliografía el TRH puede oscilar entre los 2 y los 4 días, por lo que se ha elegido un tiempo de 3 días (Martín Juárez et al., 2016). Con este valor fijado, la profundidad y el caudal de purín a tratar, se obtiene que el área del fotobiorreactor va a ser de 12.419 m².



Otro valor a definir ha sido la evaporación. Este valor, al igual que la productividad, va a depender de diferentes valores. Uno de ellos es, también, la profundidad del reactor. Sin embargo, en este caso el área resulta más influyente ya que, cuanto más área, mayor es la superficie de incidencia del sol. A su vez, la temperatura de la zona donde se vaya a ubicar influye de manera directa en la evaporación. Es por esto que la evaporación va a variar entre los 4 y los 10 L/(m²*d), de ahí que el valor elegido haya sido de 6 L/(m²*d).

El último valor definido, pero que no aparece en esta tabla ha sido la concentración de biomasa a la salida de la centrifuga. Para realizar el cálculo se ha partido de que esta concentración es de 100.000 mg/L o, lo que es lo mismo, del 10%. Se trata de una concentración típica a la salida de la centrifuga, de ahí que se haya seleccionado este valor.

Respecto a la biomasa, esta está compuesta principalmente por proteínas, carbohidratos y lípidos, encontrados estos en unas proporciones variables. Las proteínas varían entre un 20-60%, los lípidos entre un 5-20% y los carbohidratos entre un 20-50% (Martín Rubio, 2019). Estos datos, junto con un análisis realizado por la Universidad de Almería en un estudio co-realizado (Bolado Rodríguez & Fernández Sevilla, 2021) con mi tutora Silvia Bolado Rodríguez, ha hecho que los valores elegidos hayan sido una composición de 51,70% de proteínas, 22,30% de carbohidratos y 13,40% de lípidos. Asimismo, para el cálculo del nitrógeno se ha realizado otro supuesto, apoyado en la bibliografía (Templeton & Laurens, 2015), de que en torno al 20% de las proteínas de la biomasa es nitrógeno, es decir, una quinta parte.

Al igual que para el nitrógeno se ha realizado este cálculo, para el cálculo del carbono se ha realizado calculando el porcentaje de este que la biomasa ha utilizado para su crecimiento. Esto se ha calculado gracias a la fórmula química de la biomasa, CO_{0,48}H_{1,83}N_{0,11}P_{0,01} (Astutui et al., 2012), obteniéndose que el 51,35% de la biomasa es carbono.

En cuanto al resto de nutrientes y los metales su tratamiento ha sido el mismo, realizándose para cada uno de ellos su balance de materia particular. Las concentraciones han sido obtenidas de diferentes bibliografías (ASAE, 2003) (Casassas, 2004) (Valdecantos et al., 2002). Sin embargo, estos tienen una característica diferente al resto de sustancias y es que su distribución entre la fase líquida y la fase sólida es diferente. Este coeficiente de distribución se ha obtenido del informe *Wastewater Treatment* (Doka, 2003). Estos coeficientes aparecen mostrados en la tabla 36. Por lo que, con estos coeficientes se tienen los siguientes valores máxicos y de concentraciones de estos compuestos.



Tabla 36. Coeficientes de transferencia metales

Parámetro	Coeficiente transferencia a sólido	Coeficiente transferencia a líquido	Biodegradación
Arsénico	22%	78%	-
Cadmio	50%	50%	-
Cromo	50%	50%	-
Cobre	75%	25%	-
Plomo	90%	10%	-
Manganeso	50%	50%	-
Mercurio	70%	30%	-
Níquel	40%	60%	-
Zinc	70%	30%	-
Calcio	10%	90%	-
Magnesio	10%	90%	-
Cloro	0%	100%	-
Potasio	0%	100%	-
Sodio	0%	100%	-
Boro	50%	50%	-
Molibdeno	50%	50%	-
Hierro	50%	50%	-
Selenio	50%	50%	-
Tetracycline	1,75%	98,16%	0,09%
Oxytetracycline	1,75%	98,16%	0,09%
Chlortetracycline	1,75%	98,16%	0,09%
Doxycycline	1,75%	98,16%	0,09%



Tabla 37. Balance de materia

Corrientes	1 (Purín)	2 (Agua Fresca)	3 (Entrada reactor)	4 (Emisión)	5 (Salida React.)	6	7 (Recirculado)	8 (Efluente)	9 (Biomasa)	10 (Reposición agua evap.)	11 (Mezclador dilución)	12
Q (m3/d)	206,98	2766,28	4214,06	74,51	4139,55	4136,01	1240,80	2895,20	3,54	74,51	4139,55	1166,29
Agua (kg/d)	206610,29	2766277,99	4213684,46	74511,81	4139172,65	4135987,27	1240796,18	2895191,09	3185,38	74511,48	4139172,98	1166284,70
SST (g/d)	1738608,99	-	5588,39	-	372559,07	18627,95	5588,39	13039,57	353931,12	335,59	1743861,78	5252,80
COT (g/d)	2951495,73	-	3080718,80	2467921,13	612797,67	430743,58	129223,07	301520,50	182054,10	7760,02	3072958,78	121463,05
NT (g/d)	1059723,57	-	1241768,65	597889,37	643879,28	606816,94	182045,08	424771,86	37062,34	10932,05	1230836,60	171113,03
TP (g/d)	15730,27	-	18567,65	-	25188,21	9457,94	2837,38	6620,56	9109,71	170,39	18397,27	2666,99
Proteínas (g/d)	-	-	2889,20	-	192613,04	9630,65	2889,20	6741,46	182982,39	173,50	2715,70	2715,70
Carbohidratos (g/d)	-	-	1246,21	-	83080,67	4154,03	1246,21	2907,82	78926,64	74,84	1171,37	1171,37
Lípidos (g/d)	-	-	748,84	-	49922,92	2496,15	748,84	1747,30	47426,77	44,97	703,87	703,87

Tabla 38. Concentraciones balance de materia

Corrientes	1 (Purín)	2 (Agua Fresca)	3 (Entrada reactor)	4 (Emisión)	5 (Salida React.)	6	7 (Recirculado)	8 (Efluente)	9 (Biomasa)	10 (Reposición agua evap.)	11 (Mezclador dilución)	12
Q (m3/d)	206,977	2766,278	4214,057	74,512	4139,545	4136,006	1240,802	2895,204	3,539	74,5118137	4139,545	1166,290
SST (mg/L)	8400	-	1,326	-	90,000	4,504	4,504	4,504	100000	4,504	421,269	4,504
COT (mg/L)	14260	-	731,058	-	148,035	104,145	104,145	104,145	51437,720	104,145	742,342	104,145
NT (mg/L)	5120	-	294,673	-	155,543	146,716	146,716	146,716	10471,626	146,716	297,336	146,716
TP (mg/L)	76	-	4,406	-	6,085	2,287	2,287	2,287	2573,866	2,287	4,444	2,287



MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

Tabla 39. Balance de materia metales

Metales	Unidad	1 (Purín)	2 (Agua Fresca)	3 (Entrada reactor)	4 (Emisión)	5 (Salida React.)	6	7 (Recirculado)	8 (Efluente)	9 (Biomasa)
Arsénico	g/d	24,837	-	33,214	-	33,214	27,923	8,377	19,5459	5,2913
Cadmio	g/d	66,528	-	81,275	-	81,275	49,157	14,747	34,4096	32,1188
Cromo	g/d	393,257	-	480,428	-	480,428	290,570	87,171	203,3991	189,8577
Cobre	g/d	2956,818	-	3307,043	-	3307,043	1167,415	350,225	817,1905	2139,6275
Plomo	g/d	206,977	-	218,675	-	218,675	38,991	11,697	27,2940	179,6832
Manganeso	g/d	4681,629	-	5719,379	-	5719,379	3459,168	1037,750	2421,4178	2260,2107
Mercurio	g/d	0,083	-	0,094	-	0,094	0,038	0,012	0,0269	0,0559
Niquel	g/d	1034,886	-	1307,011	-	1307,011	907,083	272,125	634,9584	399,9279
Zinc	g/d	12320,075	-	14033,675	-	14033,675	5711,998	1713,600	3998,3989	8321,6761
Calcio	g/d	807211,315	-	1119451,323	-	1119451,323	1040800,026	312240,008	728560,0183	78651,2968
Magnesio	g/d	172481,050	-	239199,001	-	239199,001	222393,168	66717,950	155675,2176	16805,8326
Cloro	g/d	640643,901	-	914903,823	-	914903,823	914199,741	274259,922	639939,8190	704,0819
Potasio	g/d	724420,411	-	1034545,092	-	1034545,092	1033748,938	310124,682	723624,2569	796,1541
Sodio	g/d	165167,854	-	235876,281	-	235876,281	235694,758	70708,427	164986,3306	181,5231
Boro	g/d	7638,447	-	9331,618	-	9331,618	5643,906	1693,172	3950,7343	3687,7122
Molibdeno	g/d	68,992	-	84,286	-	84,286	50,977	15,293	35,6841	33,3084
Hierro	g/d	39424,240	-	48163,191	-	48163,191	29129,838	8738,951	20390,8866	19033,3534
Selenio	g/d	8,279	-	10,114	-	10,114	6,117	1,835	4,2821	3,9970

Tabla 40. Concentraciones metales

Metales	Unidad	1 (Purín)	2 (Agua Fresca)	3 (Entrada reactor)	4 (Emisión)	5 (Salida React.)	6	7 (Recirculado)	8 (Efluente)	9 (Biomasa)
Arsénico	mg/L	0,120	-	0,008	-	0,008	0,007	0,007	0,0068	1,4950
Cadmio	mg/L	0,321	-	0,019	-	0,020	0,012	0,012	0,0119	9,0749
Cromo	mg/L	1,900	-	0,114	-	0,116	0,070	0,070	0,0703	53,6426
Cobre	mg/L	14,286	-	0,785	-	0,799	0,282	0,282	0,2823	604,5322
Plomo	mg/L	1,000	-	0,052	-	0,053	0,009	0,009	0,0094	50,7678
Manganeso	mg/L	22,619	-	1,357	-	1,382	0,836	0,836	0,8364	638,6019
Mercurio	mg/L	0,000	-	0,0000224	-	0,0000228	0,00001	0,00001	0,0000	0,0158
Niquel	mg/L	5,000	-	0,310	-	0,316	0,219	0,219	0,2193	112,9960
Zinc	mg/L	59,524	-	3,330	-	3,330	1,381	1,381	1,3810	2351,2135
Calcio	mg/L	3900,000	-	265,647	-	270,429	251,644	251,644	251,6437	22222,2047
Magnesio	mg/L	833,333	-	56,762	-	57,784	53,770	53,770	53,7700	4748,3343
Cloro	mg/L	3095,238	-	217,108	-	221,016	221,034	221,034	221,0344	198,9319
Potasio	mg/L	3500,000	-	245,499	-	249,918	249,939	249,939	249,9389	224,9461
Sodio	mg/L	798,000	-	55,974	-	56,981	56,986	56,986	56,9861	51,2877
Boro	mg/L	36,905	-	2,214	-	2,254	1,365	1,365	1,3646	1041,9294
Molibdeno	mg/L	0,333	-	0,020	-	0,020	0,012	0,012	0,0123	9,4110
Hierro	mg/L	190,476	-	11,429	-	11,635	7,043	7,043	7,0430	5377,7000
Selenio	mg/L	0,040	-	0,002	-	0,002	0,001	0,001	0,0015	1,1293



Tabla 41. Balance de materia medicamentos

Antibióticos	Unidad	1 (Purín)	2 (Agua Fresca)	3 (Entrada reactor)	4 (Emisión)	5 (Salida React.)	6	7 (Recirculado)	8 (Efluente)	9 (Biomasa)
Tetracycline	g/d	29597,748	-	42043,301	-	42016,664	41485,178	12445,553	29039,624	531,486
Oxytetracycline	g/d	39532,657	-	56155,738	-	56120,159	55410,272	16623,082	38787,190	709,887
Chlortetracycline	g/d	11383,749	-	16170,501	-	16160,255	15955,838	4786,751	11169,086	204,418
Doxycycline	g/d	7658,159	-	10878,337	-	10871,444	10733,927	3220,178	7513,749	137,517

Tabla 42. Concentraciones medicamentos

Antibióticos	Unidad	1 (Purín)	2 (Agua Fresca)	3 (Entrada reactor)	4 (Emisión)	5 (Salida React.)	6	7 (Recirculado)	8 (Efluente)	9 (Biomasa)
Tetracycline	mg/L	143	-	9,977	-	10,150	10,030	10,030	10,030	150,166
Oxytetracycline	mg/L	191	-	13,326	-	13,557	13,397	13,397	13,397	200,572
Chlortetracycline	mg/L	55	-	3,837	-	3,904	3,858	3,858	3,858	57,756
Doxycycline	mg/L	37	-	2,581	-	2,626	2,595	2,595	2,595	38,854



ANEXO II. CÁLCULO ELECTRICO

La electricidad supone un coste muy alto dentro de cualquier planta de tratamiento de aguas y, ambientalmente, también supone un impacto muy elevado. Si bien es cierto, las emisiones por generación de electricidad no se producen generalmente en el entorno de la planta de tratamiento y, en este caso en concreto, así ocurre, lo cual no significa que no tengan un impacto en el medioambiente teniendo en cuenta un balance global.

Como ya se ha comentado en el punto 4.2.3., son 3 las acciones que consumen esta energía debido a que solo se ha tenido en cuenta los consumos eléctricos dentro de la planta. Esto quiere decir que los consumos que se hayan producido en cada una de las granjas y en otros procesos que hayan podido ocurrir en el transcurso del purín o de la biomasa no han sido calculados.

II.I. CÁLCULO BOMBEO

El bombeo se produce únicamente en tres puntos de la planta y todos ellos llevan el agua a la balsa de dilución. El resto de movimientos del cultivo son producidos por gravedad para disminuir este consumo siguiendo el diseño de una planta de depuración de aguas residuales convencional. Además, el propio sistema de Thin layer ha de tener una pequeña inclinación, por lo que tiene más sentido todavía este hecho.

La potencia de las bombas viene definida por la siguiente fórmula:

$$P(W) = \frac{Q \left(\frac{m^3}{s} \right) * H(m) * g \left(\frac{m}{s^2} \right) * \rho \left(\frac{kg}{m^3} \right)}{\eta}$$

Donde Q es el caudal introducido en la bomba (m^3/s), H es la altura que aporta la bomba (m), g es la aceleración de la gravedad (g/s^2), ρ es la densidad del fluido transportado (kg/m^3) y η es el rendimiento de la bomba (%).

Para las tres bombas en funcionamiento se ha supuesto que la altura (H) es de 15 metros. Se ha supuesto esta altura ya que debería ser suficiente para hacer frente a las necesidades de bombeo en la ubicación que se ha colocado.

La gravedad, como se puede suponer, va a ser la misma para las 3 bombas y, en cuanto a la densidad, se ha asumido en todo el proceso que va a ser la misma, la del agua ($1000 kg/m^3$). Tanto el caudal como el rendimiento van a variar de una bomba a otra.

La primera bomba es la de purín, esta es la encargada de llevar el purín desde la balsa de almacenamiento a la balsa de dilución. El modelo seleccionado para esta

función ha sido la bomba centrífuga ISO 2858 de la marca Hidrostral (Hidrostral, 2015), en concreto el modelo 40-160. Con estos datos se obtiene la siguiente potencia:

$$P_{purin}(W) = \frac{0,002396 \left(\frac{m^3}{s}\right) * 15(m) * 9,81 \left(\frac{m}{s^2}\right) * 1000 \left(\frac{kg}{m^3}\right)}{0,5} = 705,02 W$$

Y, entendiéndose que la bomba está trabajando las 24 horas del día, se obtiene:

$$E_{purin} \left(\frac{kWh}{UF}\right) = 0,70502(kW) * 24(h) * \frac{1}{207 \frac{m^3}{d}} = 0,08175 kWh/UF$$

Para las otras dos bombas el procedimiento es el mismo, la diferencia es que la bomba de agua limpia es el modelo 80-200 y la de recirculación es el modelo 65-160. La diferencia de modelo radica en la diferencia de caudal a bombear.

$$P_{agua}(W) = \frac{0,032 \left(\frac{m^3}{s}\right) * 15(m) * 9,81 \left(\frac{m}{s^2}\right) * 1000 \left(\frac{kg}{m^3}\right)}{0,6} = 7852,20 W$$

$$E_{agua} \left(\frac{kWh}{UF}\right) = 7,8522(kW) * 24(h) * \frac{1}{207 \frac{m^3}{d}} = 0,9105 kWh/UF$$

$$P_{recir.}(W) = \frac{0,0144 \left(\frac{m^3}{s}\right) * 15(m) * 9,81 \left(\frac{m}{s^2}\right) * 1000 \left(\frac{kg}{m^3}\right)}{0,7} = 3018,92 W$$

$$E_{recir.} \left(\frac{kWh}{UF}\right) = 3,01892(kW) * 24(h) * \frac{1}{207 \frac{m^3}{d}} = 0,35 \frac{kWh}{UF}$$

II.II. MEZCLADOR

La mezcla de agua y purín tiene una alta importancia para que la concentración de sólidos sea uniforme y, por tanto, la biomasa pueda actuar correctamente. Para esta función hay un mezclador que se va a encargar de ello. El modelo seleccionado ha sido CHIOR SE Submersible Agitators modelo SE-022 (WAM Group, 2022). La potencia de este es de 2,2 kW y, respecto al tiempo de funcionamiento, en este caso no es necesario que esté funcionando 24 horas al día, por lo que se supone que está la mitad del tiempo.

Con estos datos se tiene:

$$E_{mezcla} \left(\frac{kWh}{UF}\right) = 2,2(kW) * 12(h) * \frac{1}{207 \frac{m^3}{d}} = 0,128 \frac{kWh}{UF}$$



II.III. CENTRÍFUGA

La centrífuga es el último elemento consumidor de energía eléctrica dentro del alcance estudiado. Esta es la causante del mayor consumo debido a que su potencia es muy elevada, lo cual tiene lógica debido al trabajo que debe realizar. La centrífuga seleccionada es el Alfa Laval ALDEC G3 (Alfa Laval, n.d.). La potencia, para el caudal que debe trabajar de media es de 243,5 kW.

$$E_{centrifuga} \left(\frac{kWh}{UF} \right) = 243,5(kW) * 24(h) * \frac{1}{207 \frac{m^3}{d}} = 28,235 \frac{kWh}{UF}$$



ANEXO III. CÁLCULO MATERIALES CONSTRUCCIÓN

Al igual que ocurre con los consumos eléctricos, solo se han tenido en cuenta los materiales de fabricación de las diferentes partes de la planta. Asimismo, no se han tenido en cuenta los consumos de fondo necesarios para construirla como pueden ser electricidad, transporte de mercancías, etc.

III.I. Balsa de Almacenamiento de Purín

Como anteriormente se ha comentado, el purín solo se va encontrar almacenado en estas balsas un periodo máximo de 2 meses, no debiendo superarlo en ningún caso. Se ha supuesto este tiempo ya que se ha determinado que la recogida de purines de las granjas se hace 10 veces al año, por lo que es tiempo de 2 meses de almacenamiento es suficiente. Esto supone un volumen de 12.591 m³.

Dentro del tipo de almacenamiento, son varios los tipos posibles (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010):

- **Balsas de almacenamiento:** estas balsas se utilizan principalmente para el almacenamiento de purines líquidos o con un porcentaje de agua elevado. Están construidas por una excavación en el suelo con una forma, principalmente, rectangular e impermeabilizada con un material plástico para evitar filtraciones al suelo.
- **Tanques de almacenamiento:** los tanques también se utilizan para el almacenamiento de purines líquidos por su capacidad de retener y evitar filtraciones al suelo. La diferencia principal con las balsas de almacenamiento es que los tanques son estancos, por lo que las emisiones son muy inferiores. En la mayoría de los casos se encuentran prefabricados y en el exterior de los alojamientos.
- **Estercoleros:** este tipo de almacenamiento es utilizado para el caso de excrementos sólidos. El estiércol se apila en montones para ya posteriormente ser utilizado como fertilizante, por lo que es almacenamiento y “reactor” al mismo tiempo.
- **Lagunas:** las lagunas es una mezcla entre una balsa de almacenamiento y un estercolero. En ellas se almacenan deyecciones líquidas y se mantienen allí para producir la biodegradación anaerobia.

Finalmente, el almacenamiento elegido ha sido la balsa debido a que es el más común y resulta más barato.

Respecto al volumen de la balsa, se ha supuesto una profundidad de 3 metros de altura y que el largo va a ser dos veces el ancho. Con esto y el volumen de la balsa es posible obtener las diferentes longitudes. Tras realizar un cálculo se ha obtenido una anchura de 48 m.



Las balsas deben ser impermeables para evitar filtraciones al suelo, por lo que se ha elegido fabricar con PEHD (polietileno de alta densidad). La densidad de este material es de 950 kg/m³ y el grosor de la lámina de 2 mm.

Con todos estos datos ya calculados, finalmente se obtiene que se necesitan 10.287,36 kg de PEHD y, respecto a la unidad funcional, 49,703 kg/UF.

$$V_{PEHD \text{ purín}}(m^3) = (2 * 3 * 48 + 2 * 3 * 96 + 48 * 96) * \frac{2}{1000} = 10,94 m^3$$
$$m_{PEHD \text{ purín}}\left(\frac{kg}{UF}\right) = 10,94 (m^3) * 940 \left(\frac{kg}{m^3}\right) * \left(\frac{1}{75546,7 \frac{m^3}{año} * 25 \text{ año}}\right) = 5,45E - 03 \frac{kg}{UF}$$

Estos cálculos son los relativos a la balsa presente dentro de la granja por lo que, se ha supuesto, que este va a ser también el material global necesario para el almacenaje del purín en cada una de las granjas, ya que debe tenerse en cuenta también.

III.II. Balsa de Dilución

La balsa se va a construir en hormigón, con un atura de 4 metros y un tiempo de retención hidráulico (TRH) de aproximadamente 4 días. Con estos datos se obtiene una longitud de 79,5 metros y una anchura de 39,8 metros, teniendo un volumen de 12.642 m³.

Respecto al mezclador se ha seleccionado un mezclador sumergible, indicado en el anexo II.II. Respecto al material del que está fabricado, se supone que en su mayoría es de hierro fundido. Si bien es cierto, son más los materiales que conforman esta maquinaria, pero resulta imposible conocer la proporción exacta en la que se encuentran debido a que el fabricante no aporta estos datos, de ahí que se suponga para todos el mismo.

La masa del mezclador es de 120 kg, por lo que se tiene que por unidad funcional es de 3,27E-04 kg/UF.

III.III. THIN LAYER

El thin layer es la infraestructura principal de toda la planta, es el reactor en el que se producen las reacciones en las que se obtiene la biomasa final. Este va a estar fabricado en hormigón debido a que va a suponer una obra civil de gran tamaño. Como ya se ha mencionado anteriormente, el área es de 12.419 m² y la profundidad de 5 cm.

Respecto a la anchura del fotobiorreactor se ha supuesto que es de 50 metros, teniendo así que la largura es de aproximadamente 250 m. Se ha supuesto así ya que tiene muchas más lógica que sea mucho más largo que ancho y su forma original es



así. Por último, se ha supuesto que el grosor de las paredes va a ser 10 cm, uniforme por todos los lados. Con estos datos ya se puede calcular el volumen de hormigón necesario para la obra:

$$V_{\text{hormigón}} \left(\frac{m^3}{UF} \right) = (2 * 50 * 0,1 * 0,05 + 2 * 250 * 0,1 * 0,05 + 0,1 * 50 * 250) m^3 \\ * \left(\frac{1}{75546,7 \frac{m^3}{\text{año}} * 25 \text{ año}} \right) = 6,61E - 04 \frac{m^3}{UF}$$

III.IV. CENTRÍFUGA

El material del que está fabricada la centrífuga es de acero al carbono, en este caso ocurre lo mismo que con el mezclador. Este no va a ser el único material, sin embargo, no se pueden conocer de forma exacta el resto.

La masa de la centrífuga es de 19.000 kg, un valor muy elevado debido a su robustez, y, por unidad funcional, es de 1,01E-02 kg/m³.

III.V. BOMBAS

Como se ha citado en el apartado de electricidad (anexo II.I.) son varias las que conforman el sistema. Las bombas, al tratarse de un elemento imprescindible en el funcionamiento de la planta y, el procedimiento es siempre así, se colocan 2 en cada zona variando su funcionamiento cada cierto tiempo. Esto no tiene relevancia para la electricidad debido a que solo va a estar una en funcionamiento al mismo tiempo, pero para los materiales sí que tiene sentido.

Respecto al material del que están fabricadas todas que, al ser misma marca y lo único que cambia es el modelo, es el mismo y es acero inoxidable.

La primera de ellas, la de purín, se trata del modelo 40-160 cuya masa es de 33 kg. Por lo que, contando las dos bombas se tiene: 3,49E-05 kg/UF.

La de agua limpia es el modelo 80-200, la mayor de todas, con una masa de 72 kg. Se obtienen 3,81E-05 kg/UF.

Por último, la de recirculación se trata del modelo 65-160 con una masa de 61 kg. Se tiene que 3,23E-05 kg/UF.

III.VI. CISTERNA ALMACENAMIENTO BIOMASA

La cisterna de almacenamiento es la última infraestructura de la que hay que definir el material. Esta biomasa, a diferencia del almacenamiento del purín, se realiza en una cisterna cerrada con el objetivo de disminuir drásticamente las emisiones. El material empleado para ello es PVC.



La cisterna ha de ser capaz de almacenar la biomasa durante un año, lo cual supone un volumen de más de caso 1.300 m^3 , por lo que se selecciona una balsa de 1.500 m^3 . Las dimensiones están aportadas por la empresa Cisterneo (Cisterneo, n.d.).

$$V_{PVC \text{ cisterna}} (\text{m}^3) = (2 * 47,86 * 22,20) * \frac{5}{1000} = 10,63 \text{ m}^3$$

$$m_{PVC \text{ cisterna}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{UF}} \right) = 10,63 (\text{m}^3) * 1225 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) * \left(\frac{1}{75546,7 \frac{\text{m}^3}{\text{año}} * 25 \text{ año}} \right) = 6,89E - 03 \frac{\text{kg}}{\text{UF}}$$

ANEXO IV. CÁLCULO DE EMISIONES

En el siguiente anexo aparecen desarrollados los diferentes cálculos que se han realizado para calcular las emisiones a la atmósfera. Las emisiones o, mejor dicho, vertidos tanto a suelo como a río han sido obtenidas directamente en los balances de materia mostrados en el anexo I, por lo que han sido excluidos del presente anexo. Esto mismo ocurre con las emisiones atmosféricas producidas en el reactor Thin layer, ya que también se obtienen del balance de materia.

IV.1. ALMACENAMIENTO PURÍN

En este apartado están incluidos los 4 almacenamientos presentes en el tratamiento. Los 3 primeros son del purín bruto y el último es de la biomasa.

- **CH₄:** las emisiones de metano se calculan con la ecuación 1. Los sólidos volátiles excretado ($VS_{(T)}$) se han obtenido de la Tabla 10A-7 de IPCC 2006 (IPCC, 2006) obteniéndose un valor de 0,3 kgVS/cerdo/d para *Western Europe*, este valor es el mismo para los 3 almacenamientos. $B_{0(T)}$, el cual hace referencia a la producción máxima de metano por purín y que, lógicamente, es igual para los 3 casos, se obtiene de la tabla 10A-7 con un valor de 0,45 m³CH₄/kgVS. El siguiente valor se refiere al factor de conversión dependiendo de la región climática, MCF_{sk} , este, al igual que los anteriores valores y al igual que el último, $MS_{(T,s,k)}$, se obtiene también de la tabla 10A-7. Sin embargo, a diferencia de los otros sí que va a cambiar de un almacenamiento a otro ya que va a depender de la temperatura media de la zona, 12,2°C (Climate-Data, n.d.) (igual para los tres casos al tratarse del mismo municipio), pero diferente tiempo de almacenamiento. Respecto al tiempo de almacenamiento interior de la granja, este es inferior a 1 mes, por lo que MCF va a ser igual al 3% y MS a 2,8% (ambos para pit storage). Para el almacenamiento en balsa en granja y en balsa en la planta los valores son los mismos ya que en ambos casos el tiempo de almacenamiento va a ser superior a un mes. Estos valores son de 20% para MCF y 69,8% para MS. Con estos valores se tiene:

$$EF_{(T)} \left(\frac{kgCH_4}{UF} \right) = (VS_{(T)} \cdot 365) \cdot \left[B_{0(T)} \cdot 0,67 \cdot \sum_{s,k} MCF_{(sk)} \cdot MS_{(T,s,k)} \right] * \frac{1}{Q_{purin}} \quad [Ec. 1]$$

$$\begin{aligned} EF_{alm.interior} \left(\frac{kgCH_4}{d} \right) &= 0,3 \left(\frac{kgVS}{cerdo * d} \right) * 0,45 \left(\frac{m^3CH_4}{kg VS} \right) * 0,03 * 0,028 * 35138(cerdos) * 0,67 \left(\frac{kg}{m^3} \right) * \frac{1}{207 \frac{m^3}{d}} \\ &= 0,0129 \frac{kgCH_4}{UF} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 EF_{alm.ext.granja} \left(\frac{kgCH_4}{d} \right) &= EF_{alm.ext.planta} \left(\frac{kgCH_4}{d} \right) \\
 &= 0,3 \left(\frac{kgVS}{cerdo * d} \right) * 0,45 \left(\frac{m^3CH_4}{kgVS} \right) * 0,2 * 0,698 * 35138(cerdos) * 0,67 \left(\frac{kg}{m^3} \right) * \frac{1}{207 \frac{m^3}{d}} \\
 &= 2,144 \frac{kgCH_4}{UF}
 \end{aligned}$$

- **N₂O directo:** las emisiones de óxido de dinitrógeno se dividen entre las directas y las indirectas. Las directas se calculan mediante la ecuación 2. El primer valor por determinar es el número de cerdos y la excreción media de nitrógeno por cada uno, para este valor, N(T)*N_{ex}(T), se ha utilizado el NT total obtenido del balance de materia. Respecto a MS, el valor es el mismo que para el caso de metano. El factor de emisión correspondiente al N₂O, EF₃, se obtiene de la tabla 10.21 y el valor, para depósito en granja, es de 0,005 kgN₂O-N/kgNmanure, sin embargo, en el caso del depósito interior su valor es 0. En este caso, el único valor que cambia entre los 3 almacenamientos es MS.

$$N_2O_{D(mm)} \left(\frac{kgN_2O_D}{UF} \right) = \left[\sum_s \left[\sum_T (N_{(T)} \cdot Nex_{(T)} \cdot MS_{(T,S)}) \right] \cdot EF_{3(s)} \right] \cdot \frac{44}{28} * \frac{1}{Q_{purín}} \quad [Ec. 2]$$

$$\begin{aligned}
 N_2O_{Dalm.int.} \left(\frac{kgN_2O}{d} \right) &= 1059,72 \left(\frac{kgN}{d} \right) * 0,028 * 0 \left(\frac{kgN_2O - N}{d} \right) * \frac{44}{28} \left(\frac{kgN_2O}{kgN_2O - N} \right) * \frac{1}{207 \frac{m^3}{d}} \\
 &= 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 N_2O_{Dalm.ext.granja} \left(\frac{kgN_2O}{UF} \right) &= N_2O_{Dalm.ext.planta} \left(\frac{kgN_2O}{UF} \right) \\
 &= 1059,72 \left(\frac{kgN}{d} \right) * 0,698 * 0,005 \left(\frac{kgN_2O - N}{d} \right) * \frac{44}{28} \left(\frac{kgN_2O}{kgN_2O - N} \right) * \frac{1}{207 \frac{m^3}{d}} \\
 &= 0,028 \frac{kgN_2O}{UF}
 \end{aligned}$$

- **N₂O indirecto:** para el caso del indirecto, se calcula mediante las ecuaciones 3 y 4. Primeramente, para calcula la volatilización son necesarios los valores N*N_{ex}(T) y MS anteriormente definidos. Además, es necesario el valor Frac_{gasMS(T,s)}, correspondiente al porcentaje de nitrógeno que se volatiliza como NH₃ y NO_x. Este valor se obtiene de la tabla 10.22 siendo de 25% para *pit storage*.

$$N_{volatilization-MMS} = \sum_s \left[\sum_T [(N_{(T)} \cdot Nex_{(T)} \cdot MS_{(T,S)}) \cdot Frac_{GasMS(T,S)}] \right] \quad [Ec. 3]$$

$$\begin{aligned}
 N_{vol-MMSalm.int.} &= 1059,72 \left(\frac{kgN}{d} \right) * 0,028 * 0,25 \left(\frac{kgNH_3 - N + NO_x - N_{vol}}{kgN_{manure}} \right) \\
 &= 7,418 \left(\frac{kgNH_3 - N + NO_x - N_{vol}}{d} \right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 N_{vol-MMSalm.ext.granja} &= N_{vol-MMSalm.ext.planta} = 1059,72 \left(\frac{kgN}{d} \right) * 0,698 * 0,25 \left(\frac{kgNH_3 - N + NO_x - N_{vol}}{kgN_{manure}} \right) \\
 &= 184,922 \left(\frac{kgNH_3 - N + NO_x - N_{vol}}{d} \right)
 \end{aligned}$$

Una vez calculado el nitrógeno volatilizado, se puede calcular el óxido nitroso indirecto. Para este, además de N volatilizado, es necesario el factor de emisión EF_4 , este se obtiene de la tabla 11.3 siendo este de 0,01 $kgN_2O-N/(kgNH_3-N+NO_x-N_{vol})$. Este valor es igual para los 3 casos.

$$N_2O_G \left(\frac{kgN_2O_G}{UF} \right) = (N_{volatilization-MMS} \cdot EF_4) \cdot \frac{44}{28} * \frac{1}{Q_{purin}} \quad [Ec. 4]$$

$$N_2O_{I_{atm.int.}} \left(\frac{kgN_2O}{UF} \right) = 7,418 \left(\frac{kgNH_3 - N + NO_x - N_{vol}}{d} \right) * 0,01 \left(\frac{kgN_2O - N}{kgNH_3 - N + NO_x - N_{vol}} \right) * \frac{44}{28} * \frac{1}{207 \frac{m^3}{d}} = 0,000563 \frac{kgN_2O}{UF}$$

$$N_2O_{I_{atm.ext.granja}} \left(\frac{kgN_2O}{UF} \right) = N_2O_{I_{atm.ext.planta}} \left(\frac{kgN_2O}{UF} \right) = 184,922 \left(\frac{kgNH_3 - N + NO_x - N_{vol}}{d} \right) * 0,01 \left(\frac{kgN_2O - N}{kgNH_3 - N + NO_x - N_{vol}} \right) * \frac{44}{28} * \frac{1}{207 \frac{m^3}{d}} = 0,014 \frac{kgN_2O}{UF}$$

- **NH₃**: para el cálculo del amoniaco la fórmula empleada es la ecuación 5. Para este cálculo únicamente es necesario el factor de emisión, EF, el cual es igual a 0,14 $kgNH_3-N/kgTAN$, la proporción de TAN es 0,7 del nitrógeno total y, para la conversión de NH_3-N a NH_3 se multiplica por 17/14 (EMEP-EEA, 2009) (Wesnaes et al., 2009). Para este caso en concreto se supone que las emisiones son iguales para los 3 casos.

$$NH_3 \left(\frac{kgNH_3}{UF} \right) = EF * N - NH_4 * \frac{1}{Q_{purin}} \quad [Ec. 5]$$

$$NH_3 \left(\frac{kgNH_3}{UF} \right) = 0,14 \left(\frac{kgNH_3 - N}{kgTAN} \right) * 0,7 \left(\frac{kgTAN}{kgN} \right) * 583,676 \left(\frac{kgN}{d} \right) * \frac{17}{14} \left(\frac{kgNH_3}{kgNH_3 - N} \right) * \frac{1}{207 \frac{m^3}{d}} = 0,336 \frac{kgNH_3}{UF}$$

- **NO**: el monóxido de nitrógeno se calcula con la ecuación número 6, para ella es necesario el factor de emisión, EF, el cual tiene un valor de 0,0001 kgN/TAN y el nitrógeno total (kgN/d). Estas emisiones se suponen iguales en los 3 almacenamientos de purín.

$$NO \left(\frac{kgNO}{UF} \right) = EF * NT * \frac{1}{Q_{purin}} \quad [Ec. 6]$$

$$NO \left(\frac{kgNO}{UF} \right) = 0,0001 \left(\frac{kgNO}{TAN} \right) * 1059,72 \frac{kgN}{d} * \frac{1}{207 \frac{m^3}{d}} = 0,000512 \frac{kgNO}{UF}$$

- **N₂**: para la emisión de nitrógeno molecular únicamente es necesario el óxido nitroso directo calculado anteriormente y la suposición de que es, aproximadamente, el triple.

$$N_2 \left(\frac{kg N_2}{UF} \right) = 3 * N_{2O_{Directo}} \quad [Ec. 7]$$

$$N_{2alm.int.} = 3 * 0 \left(\frac{kg N_2 O}{UF} \right) = 0$$

$$N_{2alm.ext.granja} \left(\frac{kg N_2}{UF} \right) = N_{2alm.ext.planta} \left(\frac{kg N_2}{UF} \right) = 3 * 0,028 \left(\frac{kg N_2 O}{UF} \right) = 0,0842 \frac{kg N_2}{UF}$$

Hasta aquí se han mostrado los cálculos realizados para las emisiones de los diferentes almacenamientos de purín. Las siguientes emisiones son las correspondientes al almacenamiento de biomasa.

IV.II. ALMACENAMIENTO BIOMASA

La biomasa se encuentra almacenada durante periodos de tiempo muy largos debido a que la cantidad obtenida es muy inferior al purín tratado, menos de un 2%, y que, además, sólo es empleada en la época de fertilización de los campos. Como se ha comentado en el apartado de materiales, anexo III.VI, la biomasa se almacena en unas cisternas flexibles para evitar al máximo las emisiones a la atmósfera, se supone que del 100%, y además para que esté protegida de la lluvia.

IV.III. APLICACIÓN AL SUELO

La aplicación de la biomasa al suelo supone, además del impacto lógico en el suelo, unos impactos ocasionados por emisiones a la atmósfera y otros por lixiviación de algunos compuestos a las aguas subterráneas.

- **N₂O directo:** el óxido nitroso directo debido a la aplicación de la biomasa se obtiene de la ecuación 8. F_{SN} hace referencia a la cantidad de fertilizante químico aplicado, como en este caso no se utiliza este tipo de fertilizante y solo se emplea el biofertilizante, este valor es de 0. Sin embargo, F_{ON} , el cual se refiere al biofertilizante, tiene un valor de 37,062 kgN/d, valor obtenido del balance de materia; el factor de emisión de N₂O, EF_1 , ha sido obtenido de tabla 11.1 del IPCC 2006, siendo de 0,01 kgN₂O-N/kgN.

$$N_{2O_{Direct}} - N \left(\frac{kg N_{2O_D}}{UF} \right) = (F_{SN} + F_{ON}) \cdot EF_1 \cdot \frac{44}{28} * \frac{1}{Q_{purin}} \quad [Ec. 8]$$

$$N_{2O_D} \left(\frac{kg N_{2O}}{UF} \right) = 37,062 \left(\frac{kg N}{d} \right) * 0,01 \left(\frac{kg N_{2O} - N}{kg N} \right) * \frac{44}{28} \left(\frac{kg N_{2O}}{kg N_{2O} - N} \right) * \frac{1}{207 \frac{m^3}{d}} =$$

$$= 0,00281 \frac{kg N_{2O}}{UF}$$

- **N₂O indirecto:** para el óxido nitroso indirecto sigue siendo necesario el valor de F_{ON} (ya definido) y el factor de emisión EF_4 , definido anteriormente en las emisiones generados por almacenamiento, siendo este valor de 0,01 kgN₂O-N/(kgNH₃-N+NO_x-N_{vol}). El valor que falta por definir es el correspondiente a la

fracción de abono orgánico que volatiza, $Frac_{GasM}$. Este se obtiene de la tabla 11.3 del IPCC 2006, siendo de 0,2 $kg(NH_3-N+NO_x-N_{vol})/kgN$.

$$N_2O_{Indirect} \left(\frac{kgN_2O_I}{UF} \right) = F_{ON} \cdot Frac_{GasM} \cdot EF_4 \cdot \frac{44}{28} * \frac{1}{Q_{purin}} \quad [Ec. 9]$$

$$N_2O_I \left(\frac{kgN_2O}{UF} \right) = 37,062 \left(\frac{kgN}{d} \right) * 0,2 \left(\frac{kg(NH_3 - N + NO_x - N_{vol})}{kgN} \right)$$

$$* 0,01 \left(\frac{kgN_2O - N}{kgNH_3 - N + NO_x - N_{vol}} \right) * \frac{44}{28} \left(\frac{kgN_2O - N}{kgN_2O} \right) * \frac{1}{207 \frac{m^3}{d}} =$$

$$= 0,000563 \frac{kgN_2O}{UF}$$

- **NH₃:** respecto al amoniaco es necesario conocer el amonio presente en la biomasa, el cual se encuentra calculado en el balance de materia y, el factor de emisión (EF) asociado. Este valor es igual a 0,4 $kgNH_3-N/kgTAN$, la proporción de TAN es 0,7 del nitrógeno total y, para la conversión de NH_3-N a NH_3 se multiplica por 17/14 (EMEP-EEA, 2009) (Wesnaes et al., 2009).

$$NH_3 \left(\frac{kgNH_3}{UF} \right) = EF * N - NH_4 * \frac{1}{Q_{purin}} \quad [Ec. 10]$$

$$NH_3 \left(\frac{kgNH_3}{UF} \right) = 0,4 \left(\frac{kgNH_3 - N}{kgTAN} \right) * 0,7 \left(\frac{kgTAN}{kgN} \right) * 24,091 \left(\frac{kgN}{d} \right) * \frac{17}{14} \left(\frac{kgNH_3}{kgNH_3 - N} \right) * \frac{1}{207 \frac{m^3}{d}}$$

$$= 0,03957 \frac{kgNH_3}{UF}$$

- **NO_x:** las emisiones de diferentes óxidos de nitrógeno se supone que son entorno a un 21% de las de óxido nitroso (Nemecek et al., 2016). Por lo que se tiene:

$$NO_x \left(\frac{kgNO_x}{UF} \right) = 0,21 * (N_2O_{Directo} + N_2O_{Indirecto}) * \quad [Ec. 11]$$

$$NO_x \left(\frac{kgNO_x}{UF} \right) = 0,21 * \left(0,00281 \frac{kgN_2O}{UF} + 0,000563 \frac{kgN_2O}{UF} \right) = 0,00071 \frac{kgNO_x}{UF}$$

Estos cálculos son los relativos a las emisiones a la atmósfera, sin embargo, no son las únicos que se producen ya que la aplicación de la biomasa al suelo genera unos lixiviados que llegan a las aguas subterráneas contaminándolas.

- **Lixiviación de fósforo:** para el siguiente cálculo se emplea la ecuación 12. P_{lost} tiene un valor de 0,00184 para el caso de efluente biológico, el cual se puede asimilar a la biomasa.

$$P_{leach} \left(\frac{kgP_2O_5}{UF} \right) = \frac{P_{applied} \cdot P_{lost}}{V_{Raw manure}} \quad [Ec. 13]$$

$$P_{leach} \left[\frac{kg P}{UF} \right] = \frac{9,110 \left[\frac{kg P_2O_5}{d} \right] * 0,00184 \left[\frac{kg P}{kg P_2O_5} \right]}{206,977 \left[\frac{m^3}{d} \right]} = 8,09841E^{-05} \frac{kg P}{UF}$$

- **Lixiviación de nitrógeno:** en este caso la fórmula empleada es 13. A diferencia del fósforo, en este caso, además del nitrógeno que contiene la biomasa, es



necesario las precipitaciones medias anuales en la zona. Estas son de 511 mm/año (Climate-Data, n.d.).

$$NO_3 - N_{leach} \left(\frac{kg NO_3}{UF} \right) = \frac{N_{applied} \cdot (0.021 \cdot P_{prec+irr} - 3.90) \cdot \frac{1}{100}}{V_{Raw\ manure}} \quad [Ec. 12]$$

$$NO_3 - N_{leach} \left[\frac{kg NO_3 - N}{UF} \right] = \frac{37,0623 \left[\frac{kg N}{d} \right] * \left(0.021 * 511 \left[\frac{mm}{year} \right] - 3,90 \right) \cdot \frac{1}{100}}{206,977 \left[\frac{m^3}{d} \right]} = 0,0122 \frac{kg NO_3 - N}{UF}$$



ANEXO V. CARGAS EVITADAS

Una de las razones más importantes de utilizar el biofertilizante es, además de convertir un residuo en un producto mediante un tratamiento biológico, el no uso de un fertilizante químico.

Para ello, se han realizado una serie de cálculos para analizar en que cantidades se sustituyen dependiendo del tipo de fertilizante que se compare.

Los fertilizantes que se han estudiado han sido 3 correspondientes a fertilizantes nitrogenados (Urea (46/0), Calcium ammonium nitrate (27,0), Ammonium sulphate (21,0)) y 1 correspondientes a fertilizante fosfatado (Triple super phosphate (0/46)). Sin embargo, los utilizados han sido los fertilizantes nitrogenados ya que, como se ha comentado anteriormente, es el nitrógeno el que tiene limitado un máximo de aplicación por hectárea (170 kgN/ha/año). En el caso de los fertilizantes nitrogenados lo más común es utilizar un mix de los 3. Para ello se ha buscado el consumo de cada uno de ellos en España, en concreto en 2019 ya que era el último año con datos, de la base de datos de la International *Fertilizer Industry Association* (IFADATA, 2019) y se ha calculado el porcentaje de consumo en el que se usa cada uno de ellos, obteniéndose así un 35,85% para la Urea, un 46,87% para el Calcium ammonium nitrate y un 17,27% para el Ammonium sulphate.

Tabla 43. Consumo de fertilizantes en España en 2019

◆ CONSUMPTION

Country	Product	2019
Spain	Ammonium sulphate (N)	62,6
	Urea (N)	290,8
	Calc. amm. nitrate (N)	218,4
	Triple superphosphate (P2O5)	8,5
	Total NPK	1 968,1

Con estos datos se puede obtener la tabla siguiente en la cual se muestran los porcentajes de consumo comentados anteriormente, los porcentajes de nitrógeno y fósforo de cada uno de los fertilizantes y el porcentaje de nitrógeno consumido debido a estos tres fertilizantes. Respecto al porcentaje de utilización va a depender del país seleccionado y del año escogido.



Tabla 44. Cálculo de fertilizantes

Compuestos	Consumo		Cuota de consumo masivo de la mezcla de fertilizantes		Content	
	kton N/año	kton Prod/año	% N	%Producto	%N contenido	%P contenido
N fertilizer mix (N, P)						
Urea (46/0)	290,8	618,72	50,86%	35,85%	47%	0%
Calcium ammonium nitrate (24,0)	218,4	808,89	38,20%	46,87%	27%	0%
Ammonium sulphate (21,0)	62,6	298,10	10,95%	17,27%	21%	0%
P fertilizer mix (N, P)	kton P₂O₅/año	kton Prod/año	% P	%Producto	%N contenido	%P contenido
Triple super phosphate (0/46)	8,5	18,48	100%	100%	0%	46%

Una vez obtenidos estos porcentajes, el siguiente paso es ya obtener los kg de producto que se evitan por unidad funcional (UF). Para ello se ha precisado de diferentes datos: el primero de ellos es la eficiencia de la biomasa aplicada, para esto se ha tomado que la eficiencia para un efluente líquido (parte líquida de la biomasa) es del 100% y para la parte sólida del 30% (Corbala-Robles et al., 2018) en cuanto al nitrógeno. Para el fósforo es del 50% para el sólido y 100% para el líquido. Con lo que, con estos datos se obtiene que las eficiencias son de 93% y 95% para el nitrógeno y fósforo, respectivamente. Esto es debido a que un gran porcentaje de la biomasa es agua, de ahí que este valor esté próximo al 100%.

Estos valores son utilizados a la hora de calcular el nitrógeno que es aplicado al suelo por UF y que, posteriormente este se utiliza para el cálculo del fertilizante evitado.

En la tabla 45 se muestra el fertilizante evitado para cada uno de los fertilizantes seleccionados, además del mix de nitrógeno. Este valor se ha calculado como el producto de los kilogramos de nitrógeno presente en la biomasa por UF, el porcentaje de nitrógeno/fósforo en el fertilizante químico y por la relación biomasa-purín (0,0171 m³ biomasa/UF).

El producto evitado debido a la fracción sólida ha sido calculado de la siguiente manera:

$$Prod. evitado (Urea) = 9,739 * \frac{50,86\%}{46\%} * 0,0171 = 0,184 \text{ kgProd/UF}$$

$$Prod. evitado (Calcium Amm. Nit.) = 9,739 * \frac{38,20\%}{27\%} * 0,0171 = 0,236 \text{ kgProd/UF}$$



$$Prod. evitado (Amm. Sul.) = 9,739 * \frac{10,95\%}{21\%} * 0,0171 = 0,087 \text{ kgProd/UF}$$

Estos valores utilizados en la anterior ecuación son: 9,739 son los kgN/UF aplicados al suelo por la biomasa, 50,86%, 38,20% y 10,95% son los porcentajes de nitrógeno empleado de los tres fertilizantes respecto al total de fertilizantes empleados en España en el año 2019, 46%, 27% y 21% son los porcentajes de nitrógeno contenidos en los tres fertilizantes y, por último, 0,0171 m³ biomasa/UF es la relación biomasa-purín.

Tabla 45. Fertilizante químico evitado

Cargas evitadas	Biomasa	Urea (46/0)	Calcium ammonium nitrate (27,0)	Ammonium sulphate (21,0)	N fertilizer mix
N eficiencia =	93%	50%	50%	50%	50%
P eficiencia =	95%	0%	0%	0%	0%
%N contenido =	1,05%	46%	27%	21%	33,13%
%P contenido =	0,11%	0%	0%	0%	0%
Límite de aplicación "N efectivo" (kgN/ha/año)	170	170	170	170	170
Producto permitido basado en el límite de "N efectivo" (kg prod/ha)	16234,35	361,70	629,63	809,52	513,06
N aplicado (kg N/UF)	9,739	460	270	210	331,34
P aplicado (kg P/UF)	1,068	0	0	0	0
Producto evitado debido a la fracción sólida (kg prod/UF)	-	0,1841	0,2356	0,0868	0,5026



ANEXO VI. RESUMEN INVENTARIO

En este anexo aparece mostrada la tabla 46 en la cual están incluidos todos los valores anteriormente explicados e introducidos en SimaPro.

Tabla 46. Resumen del inventario

UF = 1 m3 purín no tratado		Unidades	Cantidad	Ecoinvent process
B. OPERACIÓN				
1. Almacenamiento purín previo				
<i>Emisiones atmosféricas por almacenamiento previo del purín</i>				
	CH4 (Metano)	kg	1,29E-02	Methane, air, low population density
	N2O Directo	kg	0,00E+00	Dinitrogen monoxide, air, low population density
	N2O Indirecto	kg	5,63E-04	Dinitrogen monoxide, air, low population density
	NH3	kg	3,96E-01	Ammonia, ES, air, low population density
	NO	kg	5,12E-04	Nitrogen oxides, ES, air, low population density
	N2	kg	0,00E+00	Nitrogen, total, air, low population density
2. Almacenamiento purín balsa granja				
<i>Emisiones atmosféricas por almacenamiento del purín</i>				
	CH4 (Metano)	kg	2,14E+00	Methane, air, low population density
	N2O Directo	kg	2,81E-02	Dinitrogen monoxide, air, low population density
	N2O Indirecto	kg	1,40E-02	Dinitrogen monoxide, air, low population density
	NH3	kg	3,96E-01	Ammonia, ES, air, low population density
	NO	kg	5,12E-04	Nitrogen oxides, ES, air, low population density
	N2	kg	8,4E-02	Nitrogen, total, air, low population density
3. Almacenamiento purín balsa planta				
	CH4 (Metano)	kg	2,14E+00	Methane, air, low population density
	N2O Directo	kg	2,81E-02	



				Dinitrogen monoxide, air, low population density
	N2O Indirecto	kg	1,40E-02	Dinitrogen monoxide, air, low population density
	NH3	kg	3,96E-01	Ammonia, ES, air, low population density
	NO	kg	5,12E-04	Nitrogen oxides, ES, air, low population density
	N2	kg	8,4E-02	Nitrogen, total, air, low population density
4. Tratamiento purín en la planta				
<i>Transporte purín a planta</i>				
	Transport of raw manure to manure treatment plant by lorry	tkm	1,70E+01	Transport, truck>20t, EURO2, 100%LF, default/GLO Economic
<i>Consumo agua</i>				
	Agua limpia	m3	1,34E+01	Water (with river slit)
<i>Consumo eléctrico</i>				
	Electricidad por bombeo del purín	kWh	8,18E-02	Electricity, medium voltage {ES} market for Alloc Def, U
	Electricidad para inyectar el agua en el thin layer	kWh	9,10E-01	Electricity, medium voltage {ES} market for Alloc Def, U
	Electricidad mezclador purín/agua	kWh	1,28E-01	Electricity, medium voltage {ES} market for Alloc Def, U
	Electricidad bombeo agua recirculada	kWh	3,50E-01	Electricity, medium voltage {ES} market for Alloc Def, U
	Electricidad centrifugación	kWh	2,82E+01	Electricity, medium voltage {ES} market for Alloc Def, U
5. Tratamiento con microalgas				
<i>Emisiones atmosféricas tratamiento microalgas</i>				
	NH3	kg	2,89E+00	Ammonia, ES, air, low population density
	CO2	kg	1,19E+01	Carbon dioxide, air, low population density
C. APLICACIÓN AL RÍO/SUELO				
1. Vertido del efluente				
<i>Emisiones al agua</i>				
	COT	kg	1,46E+00	TOC, Total Organic Carbon, river
	PT	kg	3,20E-02	Phosphorus, river



	NT	kg	2,05E+00	Nitrogen, total, river
	SST	kg	6,30E-02	Suspended solids, unspecified, river
<i>Metales pesados</i>				
	Arsénico	kg	9,44E-05	Arsenic, river
	Cadmio	kg	1,66E-04	Cadmium, river
	Cromo	kg	9,83E-04	Chromium, river
	Cobre	kg	3,95E-03	Copper, river
	Plomo	kg	1,32E-04	Lead, river
	Manganeso	kg	1,17E-02	Manganese, river
	Mercurio	kg	1,30E-07	Mercury, river
	Níquel	kg	3,07E-03	Nickel, river
	Zinc	kg	1,93E-02	Zinc, river
	Calcio	kg	3,52E+00	Calcium, river
	Magnesio	kg	7,52E-01	Magnesium, river
	Cloro	kg	3,09E+00	Chloride, river
	Potasio	kg	3,50E+00	Potassium, river
	Sodio	kg	7,97E-01	Sodium, river
	Boro	kg	1,91E-02	Boron, river
	Molibdeno	kg	1,72E-04	Molybdenum, river
	Hierro	kg	9,85E-02	Iron, river
	Selenio	kg	2,07E-05	Selenium, river
<i>Emisiones de VMP</i>				



2. Aplicación de la biomasa				
<i>Transporte al campo</i>				
	Transport of sludge by lorry	tkm	2,90E-01	Transport, truck>20t, EURO2, 100%LF, default/GLO Economic
<i>Aplicación</i>				
	Spreading	ha	3,84E-01	Fertilising, by broadcaster {CH} processing Alloc Def, U
<i>Emisiones atmosféricas</i>				
	N2O Directo	kg	2,81E-03	Dinitrogen monoxide, air, low population density
	N2O Indirecto	kg	5,63E-04	Dinitrogen monoxide, air, low population density
	NH3	kg	3,96E-02	Ammonia, ES, air, low population density
	NOx	kg	7,09E-04	Nitrogen oxides, ES, air, low population density
<i>Lixiviación a las aguas subterráneas</i>				
	Lixiviación Fósforo	kg	8,10E-05	Nitrate, groundwater
	Lixiviación Nitrógeno	kg	1,22E-02	Phosphorus, groundwater
<i>NT, PT, COT y SST</i>				
	NT	kg	1,79E-01	Nitrogen, total, agricultural
	PT	kg	4,40E-02	Phosphorous, agricultural
<i>Metales pesados</i>				
	Arsénico	kg	2,56E-05	Arsenic, agricultural
	Cadmio	kg	1,55E-04	Cadmium, agricultural
	Cromo	kg	9,17E-04	Chromium, agricultural
	Cobre	kg	1,03E-02	Copper, agricultural
	Plomo	kg	8,68E-04	Lead, agricultural
	Manganeso	kg	1,09E-02	Manganese, agricultural
	Mercurio	kg	2,70E-07	Mercury, agricultural
	Níquel	kg	1,93E-03	Nickel, agricultural



	Zinc	kg	4,02E-02	Zinc, agricultural
	Calcio	kg	3,80E-01	Calcium, agricultural
	Magnesio	kg	8,12E-02	Magnesium, agricultural
	Cloro	kg	3,40E-03	Chloride, agricultural
	Potasio	kg	3,85E-03	Potassium, agricultural
	Sodio	kg	8,77E-04	Sodium, agricultural
	Boro	kg	1,78E-02	Boron, agricultural
	Molibdeno	kg	1,61E-04	Molybdenum, agricultural
	Hierro	kg	9,20E-02	Iron, agricultural
	Selenio	kg	1,93E-05	Selenium, agricultural
<i>Emissiones de VMP</i>				
	Tetracycline	kg	2,57E-03	Tetracycline, agricultural
	Oxytetracycline	kg	3,43E-03	Oxytetracycline, agricultural
3. Fertilizante evitado por la aplicación de la biomasa				
<i>Transporte al campo evitado</i>				
	Transport of sludge by van	tkm	1,02E-02	Delivery van <3,5 t
<i>Aplicación evitada</i>				
	Spreading	ha	3,84E-01	Fertilising, by broadcaster {CH} processing Alloc Def, U
<i>Producción evitada</i>				
	Urea (46/0)	kg	1,84E-01	Urea, as N {GLO} market for Alloc Def, U
	Calcium ammonium nitrate (24,0)	kg	2,36E-01	Calcium nitrate {GLO} market for Alloc Def, U
	Ammonium sulphate (21,0)	kg	8,68E-02	Ammonium sulphate {GLO} market for Alloc Def, U
<i>Metales pesados evitados por aplicación de fertilizantes</i>				
Urea	Arsénico	mg	3,53E-04	Arsenic, agricultural
	Cadmio	mg	8,71E-06	Cadmium, agricultural



	Cobre	mg	7,23E-04	Copper, agricultural
	Zinc	mg	3,19E-03	Zinc, agricultural
	Plomo	mg	3,05E-04	Lead, agricultural
	Niquel	mg	2,35E-04	Nickel, agricultural
	Cromo	mg	5,31E-04	Chromium, agricultural
	Mercurio	mg	8,71E-06	Mercury, agricultural
Calcium ammonium nitrate	Arsénico	mg	2,70E-04	Arsenic, agricultural
	Cadmio	mg	4,35E-05	Cadmium, agricultural
	Cobre	mg	1,16E-03	Copper, agricultural
	Zinc	mg	3,22E-02	Zinc, agricultural
	Plomo	mg	1,67E-02	Lead, agricultural
	Niquel	mg	2,61E-05	Nickel, agricultural
	Cromo	mg	6,96E-04	Chromium, agricultural
	Mercurio	mg	8,71E-06	Mercury, agricultural
Ammonium Sulphate	Arsénico	mg	6,29E-05	Arsenic, agricultural
	Cadmio	mg	4,19E-06	Cadmium, agricultural
	Cobre	mg	3,44E-04	Copper, agricultural
	Zinc	mg	1,72E-04	Zinc, agricultural
	Plomo	mg	2,52E-05	Lead, agricultural
	Niquel	mg	1,13E-04	Nickel, agricultural
	Cromo	mg	3,44E-04	Chromium, agricultural



	Mercurio	mg	4,19E-06	Mercury, agricultural
<i>Emisiones suelo evitadas (MIX Nitrógeno)</i>				
	N2O Directo evitado	kg	2,62E-03	Dinitrogen monoxide, air, low population density
	N2O Indirecto evitado	kg	5,23E-04	Dinitrogen monoxide, air, low population density
	NH3 evitado	kg	4,04E-03	Ammonia, ES, air, low population density
	NOx evitado	kg	6,59E-04	Nitrogen oxides, ES, air, low population density
<i>Lixiviación evitada (MIX Nitrógeno)</i>				
	N lixiviado evitado	kg	1,14E-02	Nitrate, groundwater
D. MATERIALES				
<i>Materiales de construcción</i>				
	Thin layer	m3	6,61E-04	Concrete, normal {CH} market for Alloc Def, S
	Centrífuga	kg	1,01E-02	Steel, unalloyed {GLO} market for Alloc Def, S
	Bomba purín	kg	3,49E-05	Steel, stainless 304, scrap/kg/GLO
	Bomba agua limpia	kg	3,81E-05	Steel, stainless 304, scrap/kg/GLO
	Bombas agua centrifugada	kg	3,23E-05	Steel, stainless 304, scrap/kg/GLO
	Mezclador	kg	6,35E-05	Cast iron {RER} production Alloc Rec, U
	Balsa dilución	m3	3,27E-04	Concrete, normal {CH} market for Alloc Def, S
	PEHD (balsa almacenamiento purín)	kg	5,45E-03	Polyethylene high density granulate (PE-HD), production mix, at plant RER
	PVC (cisterna biomasa)	kg	6,89E-03	PVC pipe E
<i>Procesos</i>				
	Extrusión PEHD	kg	5,45E-03	Extrusion, plastic pipes {RER} production Alloc Def, U
	Extrusión PVC	kg	6,89E-03	Extrusion, plastic pipes {RER} production Alloc Def, U
	Electricidad extrusión	kWh	6,96E-03	Electricity, medium voltage {ES} market for Alloc Def, U
	Excavación	m3	5,48E+00	



				Excavation, hydraulic digger {GLO} market for Alloc Def, U
	Ocupación del terreno	m3	1,97E-02	Occupation, construction site
	Transformación del terreno, campo a pradera	m3	1,97E-02	Transformation, from pasture and meadow
	Transformación del terreno, construido	m3	1,32E-02	Transformation, to industrial area, built up
	Transformación del terreno, vegetación	m3	6,58E-03	Transformation, to industrial area, vegetation
	Ocupación del terreno, área industrial	m3	3,29E-01	Occupation, industrial area, built up
	Ocupación del terreno, vegetación	m3	1,64E-01	Occupation, industrial area, vegetation