



Universidad de Valladolid



**MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL**  
**ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES**  
**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**Estudio ambiental mediante ACV del tratamiento biológico de purines porcinos con microalgas, con valorización como bioestimulante del cultivo de biomasa algal generado.**

Autor: Alberto Manuel Ruiz González

Tutores: D. Rubén Irusta Mata

Dña. Silvia Bolado Rodríguez

Valladolid, septiembre 2022



## ÍNDICE

Índice de ilustraciones.....	3
Índice de tablas .....	4
1. INTRODUCCIÓN.....	6
1.1. Problemática .....	6
1.2. Sistemas de producción de microalgas.....	8
1.3. Análisis del Ciclo de Vida (ACV).....	9
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	10
2.1. Objetivo y alcance del ACV.....	10
2.1.1. Procedencia y caracterización del purín .....	12
2.1.2. Descripción del tratamiento (Escenario 1).....	14
2.1.3. Balance de materia.....	15
2.2. Metodología ACV .....	18
2.3. Análisis de inventario (Escenario 1) .....	19
2.3.1. Cálculo del consumo eléctrico.....	19
2.3.2. Emisiones.....	21
2.3.3. Cargas evitadas.....	31
2.4. Análisis de inventario (Escenario 0) .....	35
2.4.1. Emisiones.....	35
2.4.2. Cargas evitadas.....	38
2.5. Resumen de resultados.....	41
3. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	44
3.1. Evaluación de impacto del ciclo de vida.....	44
3.1.1. Escenario 1 .....	44
3.1.2. Escenario 0 .....	49
3.1.3. Comparación de los impactos escenarios 0 y 1 .....	50
3.1.4. Conclusiones.....	55
Bibliografía .....	56
ANEXOS .....	58
Consumo eléctrico (Escenario 1).....	58
Pretratamiento.....	59
Mezclador.....	59
Bombeo purín.....	61
Bombeo agua fresca.....	61



Bombeo recirculación .....	61
Bombeo a hidrólisis .....	61
Bombeo 1ª centrifugación .....	61
Bombeo 2ª centrifugación .....	62
High Pressure Homogenization .....	62
Hidrólisis enzimática .....	62
Emisiones en el almacenamiento (Escenarios 0 y 1).....	62
Metano (CH <sub>4</sub> ).....	62
Emisiones directas de N <sub>2</sub> O .....	62
Emisiones indirectas de N <sub>2</sub> O .....	63
Emisiones de NH <sub>3</sub> .....	63
Emisiones de NO <sub>x</sub> .....	63
Emisiones de transporte (Escenario 1).....	63
Emisiones en la aplicación en el suelo (Escenario 1) .....	64
Emisiones directas de N <sub>2</sub> O .....	64
Emisiones indirectas de N <sub>2</sub> O .....	64
Emisiones de NH <sub>3</sub> .....	64
Emisiones de NO <sub>x</sub> .....	65
Lixiviación de nitratos.....	65
Lixiviación de fósforos .....	65
Metales pesados .....	65
Cargas evitadas (Escenario 1).....	66
Emisiones en la aplicación en el suelo .....	66
Metales Pesados .....	67
Emisiones escenario 0 .....	69
Emisiones directas de N <sub>2</sub> O .....	69
Emisiones indirectas de N <sub>2</sub> O .....	69
Emisiones de NH <sub>3</sub> .....	69
Emisiones de NO <sub>x</sub> .....	70
Lixiviación de nitratos.....	70
Lixiviación de fósforos.....	70
Metales pesados .....	70
Cargas evitadas (Escenario 0).....	71
Emisiones en la aplicación en el suelo .....	71



Metales Pesados ..... 72

## Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Ranking de países con mayor producción de carne porcina en 2021 (Fuente: 3tres3.com [3])..... 6

Ilustración 2. Capa algal superficial provocada por eutrofización del agua (Fuente: Elaboración propia, generada con DreamStudio IA)..... 7

Ilustración 3. Reactor cascada Thin-Layer en la Estación Experimental IFAPA (Almería, España) (Fuente: [7])..... 9

Ilustración 4. Diagrama de flujo de la producción y tratamiento de microalgas y obtención final de bioestimulante ..... 10

Ilustración 5. Esquema del análisis de ciclo de vida para el escenario de no tratamiento (Fuente: Elaboración propia)..... 11

Ilustración 6. Esquema del análisis de ciclo de vida para el escenario 1 (Fuente: Elaboración propia) ..... 11

Ilustración 7. Localización de la planta de tratamiento y las granjas de cerdos (Fuente: Google Maps)..... 13

Ilustración 8. Balance de materia del proceso de tratamiento del escenario 1 (Fuente: Elaboración propia) ..... 16

Ilustración 9. Plano infraestructura planta de tratamiento (Fuente: Elaboración propia) ..... 29

Ilustración 10. Plano tanque de almacenamiento (Fuente: Elaboración propia) ..... 30

Ilustración 11. Medidas de tuberías para el transporte del purín entre los distintos procesos del tratamiento (Fuente: Elaboración propia) ..... 30

Ilustración 12. Caracterización del daño para el Escenario 1 (Fuente: Elaboración propia, SimaPro 8) ..... 44

Ilustración 13. Normalización de la evaluación de daño por categorías de impacto (Fuente: Elaboración propia, SimaPro 2008)..... 45

Ilustración 14. Evaluación del daño por sustancia en el escenario 1 para la categoría 'Ecotoxicidad terrestre' (Fuente: Elaboración propia, SimaPro8)..... 46

Ilustración 15. Evaluación del daño por sustancia en el escenario 1 para la categoría 'respiratorios inorgánicos' (Fuente: Elaboración propia, SimaPro8) ..... 46

Ilustración 16. Evaluación del daño por sustancia en el escenario 1 para la categoría 'no carcinógenos' (Fuente: Elaboración propia, SimaPro8)..... 47

Ilustración 17. Evaluación del daño por sustancia en el escenario 1 para la categoría 'calentamiento global' (Fuente: Elaboración propia, SimaPro8) ..... 48

Ilustración 18. Evaluación del daño por sustancia en el escenario 1 para la categoría 'acidificación/eutrofización terrestre' (Fuente: Elaboración propia, SimaPro8) ..... 48

Ilustración 19. Caracterización del daño para el Escenario 0 (Fuente: Elaboración propia, SimaPro 8) ..... 49

Ilustración 20. Comparación de las categorías de impacto para los escenarios 0 y 1 para las mismas hectáreas (Fuente: Elaboración propia, SimaPro) ..... 51



Ilustración 21. Comparación de las categorías de impacto para los escenarios 0 y 1 (Fuente: Elaboración propia, SimaPro)..... 51

Ilustración 22. Ficha técnica agitador de mezcla (Fuente WAMGroup.es)..... 60

Ilustración 23. Especificaciones de modelos de agitadores de mezcla (Fuente: WAMGroup.es) ..... 60

## Índice de tablas

Tabla 1. Granjas con registro en Cuéllar (Segovia, C.P. 40200) (Fuente: Elaboración propia) ... 12

Tabla 2. Concentraciones iniciales del purín a tratar (Fuente: elaboración propia)..... 13

Tabla 3. Resumen de parámetros asumidos para el cálculo del balance de materia (Fuente: Elaboración propia) ..... 18

Tabla 4. Consumo energético por kg de materia seca del HPH, según condiciones de presión y número de pases (Fuente: Navarro et al. (2020))..... 21

Tabla 5. Estimación ponderación de cada granja para cálculo de tkm para transporte de la biomasa (Fuente: Elaboración propia)..... 25

Tabla 6. Concentración de metales pesados en el purín crudo (Fuente: Elaboración propia) ... 27

Tabla 7. Coeficientes de reparto para metales en el tratamiento del purín (Fuente: elaboración propia) ..... 28

Tabla 8. Emisión de metales pesados en la aplicación del bioestimulante en el suelo (Fuente: Elaboración propia) ..... 28

Tabla 9. Medidas diseño planta de tratamiento (Fuente: elaboración propia) ..... 29

Tabla 10. Medidas diseño reactor biológico Thin Layer (Fuente: Elaboración propia) ..... 29

Tabla 11. Medidas diseño tanque de almacenamiento (Fuente: Elaboración propia) ..... 30

Tabla 12. Medidas del diseño de las tuberías (Fuente: Elaboración propia) ..... 31

Tabla 13. Cuotas de consumo de fertilizantes convencionales en España (Fuente: IFA, 2021) . 31

Tabla 14. Concentraciones de metales pesados en los fertilizantes químicos (Fuente: Corbala et al (2018) [1])..... 34

Tabla 15. Emisiones de metales pesados en los fertilizantes químicos para la UF (Fuente: Elaboración propia) ..... 34

Tabla 16. Cálculo tkm del transporte del fertilizante químico a cada granja (Fuente: Elaboración propia) ..... 35

Tabla 17. Concentraciones de metales pesados / kg de masa seca (Fuente: Elaboración propia) ..... 37

Tabla 18. Metales pesados en la aplicación del purín (Fuente: Elaboración propia) ..... 38

Tabla 19. Emisiones de metales pesados en los fertilizantes químicos para la UF (Fuente: Elaboración propia) ..... 41

Tabla 20. Cálculo tkm de transporte de fertilizante a las granjas (Fuente: Elaboración propia) 41

Tabla 21. Resumen resultados del inventario del ACV para los escenarios 0 y 1 ..... 42

Tabla 22. Valores límites para las cantidades anuales de metales pesados que se podrán introducir en los suelos (Fuente: RD 1310/1990) ..... 54

Tabla 23. Metales pesados aplicados por ha y por año en el suelo para escenario 1 (Fuente: Elaboración propia) ..... 54

Tabla 24. Eficiencia de bombeo para diferentes fluidos (Fuente: Life cycle assessment in biorefineries) ..... 59



Tabla 25. Cálculo tkm para el transporte del purín de cada granja a la planta de tratamiento (Fuente: Elaboración propia).....	63
Tabla 26. Cálculo tkm para el transporte del bioestimulante tratado en la planta a cada granja (Fuente: Elaboración propia).....	64
Tabla 27. Coeficientes de reparto de metales en la biomasa (Fuente: Elaboración propia) .....	65
Tabla 28. Concentración de metales (kg/m <sup>3</sup> ) en el bioestimulante (Fuente: Elaboración propia) .....	66
Tabla 29. Concentraciones de metales pesados en los fertilizantes químicos (Fuente: Corbala et al (2018) [1]).....	67
Tabla 30. Concentración de metales pesados en masa de purín seco (Fuente: Elaboración propia) .....	70
Tabla 31. Concentración metales pesados en el purín crudo (Fuente: Elaboración propia) .....	71
Tabla 32. Concentraciones de metales pesados en los fertilizantes químicos (Fuente: Corbala et al (2018) [1]).....	73
Tabla 33. Factores de emisión de metano procedentes de gestión de purín de cerdo (Fuente: IPCC 2006) .....	75
Tabla 34. Factores de emisión para emisiones directas de N <sub>2</sub> O para tratamiento de purín (Fuente: IPCC 2006).....	75
Tabla 35. Factores de emisión para emisiones indirectas de N <sub>2</sub> O (Fuente IPCC 2006) .....	76
Tabla 36. Factores de emisión para emisiones de Amonio, metodología Tier 2 (Fuente: EMEP-EEA, cap 3B).....	76

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Problemática

La producción ganadera lleva en crecimiento en todo el mundo desde los años 60, debido al rápido aumento de la población mundial y la cantidad de tierras agrícolas [1]. En concreto, en 2021, el sector porcino español (3.8 Mt) superó a Alemania en producción de carne de cerdo, colocándose a la cabeza de la Unión Europea y cuarto a nivel mundial, sólo por detrás de China (51 Mt, casi la mitad del total general), Estados Unidos (12.3 Mt) y Brasil (4.4 Mt) (Ilustración 1). Esto supone un crecimiento del 4.30% en el número de cabezas de cerdo sacrificadas en comparación con el año anterior [2] [3].

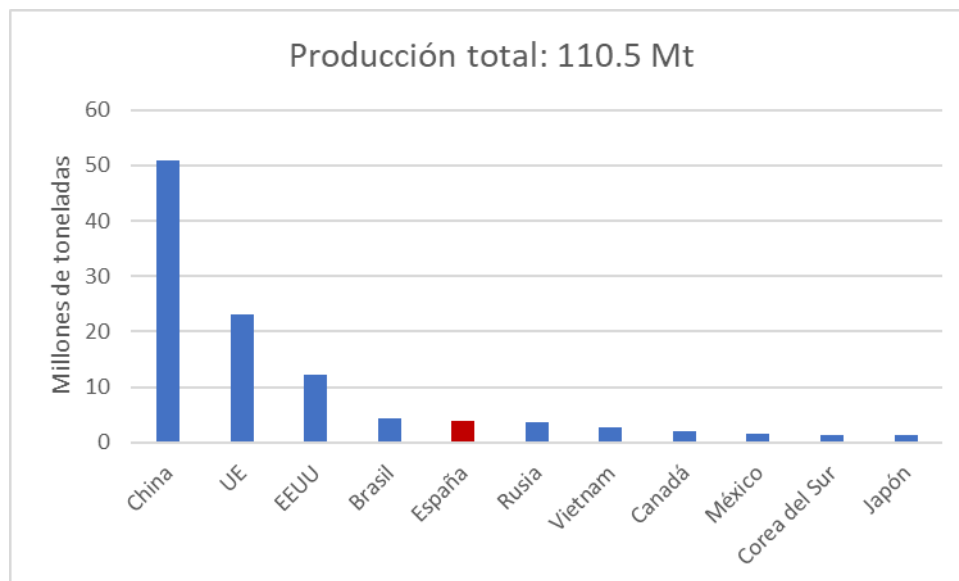


Ilustración 1. Ranking de países con mayor producción de carne porcina en 2021 (Fuente: 3tres3.com [3])

A nivel nacional, en Castilla y León se encuentra el 10% de las granjas dedicadas a la explotación de ganado porcino. Es la cuarta Comunidad Autónoma en este aspecto, por detrás de Galicia, Andalucía y Extremadura [4].

Estos datos reflejan la importancia de esta actividad económica y el impacto que tiene en el mundo actual. A partir de esto, hay que tener en cuenta la cantidad de purín que se genera, formado por la mezcla del estiércol, agua de lavado, pérdidas de alimento y paja generados en las granjas de explotación porcina, y el tratamiento que estas necesitan previo a su vertido. En este sentido, teniendo en cuenta que cada cerdo produce una estimación de 2.15 m<sup>3</sup> de purín al año y que en el año 2020 se reportaron 32.68 millones de cabezas de ganado [4], se puede calcular fácilmente que en España en el año 2020 se produjeron más de 70 millones de m<sup>3</sup> de purín de cerdo.

Estas aguas residuales tienen altas concentraciones de materia orgánica, sólidos, nutrientes, metales pesados y otros contaminantes de preocupación emergente (CEC, según sus siglas en inglés), que en grandes cantidades suponen una fuente de contaminación importante. Por ello, es necesario aplicar unas medidas de tratamiento eficientes y medioambientalmente sostenibles para limpiar estos efluentes y obtener un

agua de buena calidad que se pueda verter. Un mal o nulo tratamiento del purín puede acarrear serios problemas medioambientales.

Existen varias formas de tratar el exceso de producción de purín. Tradicionalmente, se ha utilizado por los agricultores como fertilizante natural para los cultivos reemplazando al fertilizante químico, debido a que incluye en su composición los principales nutrientes que permiten a las plantas crecer, es decir, nitrógeno, fósforo y potasio. Esta actividad, sin un tratamiento adecuado lleva a problemas en la calidad del agua, el aire y el suelo, [5], entre ellos:

- **Sobre-fertilización** y abrasión de los suelos: Los campos fertilizados tienen una capacidad limitada de asimilar los nutrientes, por lo que una sobre-fertilización puede provocar problemas serios en el estado de calidad del suelo, que ve dañada su materia.
- **Liberación de amoníaco a la atmósfera:** Una alta concentración de nitrógeno en forma de amonio hace que este se libere a la atmósfera en forma de amoníaco por stripping. También se da la contaminación de aguas subterráneas, provocada por la filtración de estos compuestos a los acuíferos cercanos. Esto, además de ser un grave problema medioambiental, también supone un problema sanitario ya que estas aguas subterráneas acumuladas en pozos o acuíferos dotan a gran cantidad de zonas rurales de agua. Según el Real Decreto 140/2003, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano, una concentración de más 50 mg/L de nitratos ya no se considerará apta para consumo.
- **Contaminación por nitratos y fosfatos:** Estos nutrientes provocan un crecimiento acelerado de algas u otras especies vegetales. Un exceso de micro o macroalgas afecta de forma muy negativa a la calidad del agua, pudiendo causar el fenómeno conocido como eutrofización (Ilustración 2). Este fenómeno genera una capa algal superficial en el agua que impide el paso de luz solar y, por consecuencia, las actividades fotosintéticas de los organismos del fondo. Además, consumen gran cantidad del oxígeno disuelto y aportan materia orgánica, en forma de fango, prácticamente impidiendo la existencia de seres vivos en el medio.

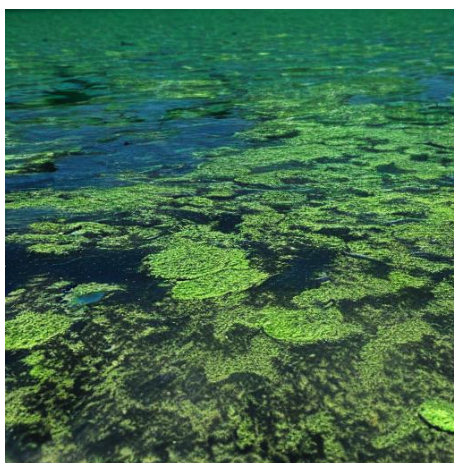


Ilustración 2. Capa algal superficial provocada por eutrofización del agua (Fuente: Elaboración propia, generada con DreamStudio IA)





- **Concentración de metales pesados:** La presencia de metales pesados en los purines depende, en gran parte, de la alimentación de los cerdos. Elementos como Cu o Zn, son esenciales para las plantas, pero a concentraciones elevadas son altamente tóxicos, no sólo para las plantas, sino también para microorganismos e invertebrados del suelo [6].

## 1.2. Sistemas de producción de microalgas

Con el objetivo de reducir el impacto de estos problemas, existen varios métodos de tratamiento como, por ejemplo, el tratamiento anaerobio o los procesos de nitrificación-desnitrificación aerobio-anóxico. Estos son los más convencionales. Sin embargo, estos sistemas de tratamiento conllevan elevados costes de operación e impactos ambientales. Además, en algunos purines producidos en Europa se han encontrado hasta 8000 mgN/L y 500 mgP/L, concentraciones que no son asumibles por un sistema convencional.

Como alternativa a estos sistemas convencionales surgen los sistemas de producción de microalgas. Existen diferentes tecnologías para la producción de microalgas [7], entre ellos:

- Sistemas abiertos
  - Balsas
  - Canales o Raceways
  - Capa fina o Thin Layer
  - Piscinas inclinadas
  - Tanques circulares
- Sistemas cerrados
  - Cámara de microalgas
  - Fotobiorreactores: Pueden ser columnas de burbujeo, planos, inclinados, verticales o tubulares.

Los sistemas reactores abiertos son los más recomendados para sistemas de tratamiento de aguas residuales, ya que los costes de instalación y operación son mucho menores. Estos reactores abiertos se llevan utilizando desde los años 50 y durante la última década se ha demostrado la viabilidad de la producción de microalgas utilizando purines como única fuente de nutrientes a escala piloto. Dentro de este tipo de reactores, el reactor Thin-Layer (Ilustración 3) permite maximizar la eficiencia del uso de la luz, ya que opera con muy poca profundidad (0.5-5 cm), lo que permite maximizar la producción de biomasa algal y la recuperación de nutrientes [8]. Este sistema es muy útil en zonas con clima Mediterráneo, que presentan las condiciones climáticas idóneas para el crecimiento de microalgas [9].



Ilustración 3. Reactor cascada Thin-Layer en la Estación Experimental IFAPA (Almería, España) (Fuente: [7])

Además, como proceso adicional, esta biomasa microalgal formada se puede tratar en un proceso HPH (*High Pressure Homogenization*) seguido de una hidrólisis enzimática, con lo que se obtiene un concentrado de bioestimulantes de uso agrícola [10].

### 1.3. Análisis del Ciclo de Vida (ACV)

A través de un Análisis del Ciclo de Vida (ACV) se puede evaluar la sostenibilidad ambiental de un proceso durante su ciclo de vida completo. Se ha utilizado mucho en recientes estudios para evaluar el impacto de sistemas de producción de microalgas, demostrando que reduce el impacto ambiental y los costes asociados al tratamiento de aguas comparado con sistemas convencionales, especialmente en comunidades pequeñas. La metodología del ACV tiene en cuenta y cuantifica todos los intercambios medioambientales (recursos, energía, emisiones, residuos...) que se producen durante todas las etapas del ciclo de vida.

A través de este trabajo, se van a evaluar los potenciales impactos ambientales asociados a un sistema de producción de algas procedentes de aguas de purín de cerdo, en la localidad de Cuéllar (Segovia, España). Los impactos ambientales de esta opción de tratamiento del purín (Escenario 1) se van a comparar al de una aplicación directa en el suelo del purín sin tratar (Escenario 0). Esta comparación aporta información respecto a las compensaciones medioambientales entre dos escenarios para la gestión del exceso de nitrógeno en el purín de cerdo.

Los datos en SimaPro están estructurados según los pasos establecidos en la norma ISO 14044 (2006) para el ACV: Definición de objetivo y alcance, Inventario, Evaluación de impacto e Interpretación de resultados.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Objetivo y alcance del ACV

El objetivo de este estudio es crear un inventario y evaluar el potencial impacto ambiental de un proceso biológico de producción de bioestimulantes agrícolas, a partir del tratamiento de microalgas producidas a través de purín de cerdo como fuente de nutrientes (Escenario 1, tratamiento). En la Ilustración 4 se puede observar un diagrama de bloques de este caso. Estos bioestimulantes sustituyen a una aplicación, más tradicional, del purín crudo sin tratar (Escenario 0, no tratamiento), del que también se hará una evaluación de impacto ambiental. Para ambos escenarios se van a restar los impactos causados por el sustituto evitado (en este caso, un mix de fertilizante químico de N y P). Las Ilustraciones 5 y 6 muestran una visión general de las entradas y salidas, los sistemas de fondo y los de primer plano.

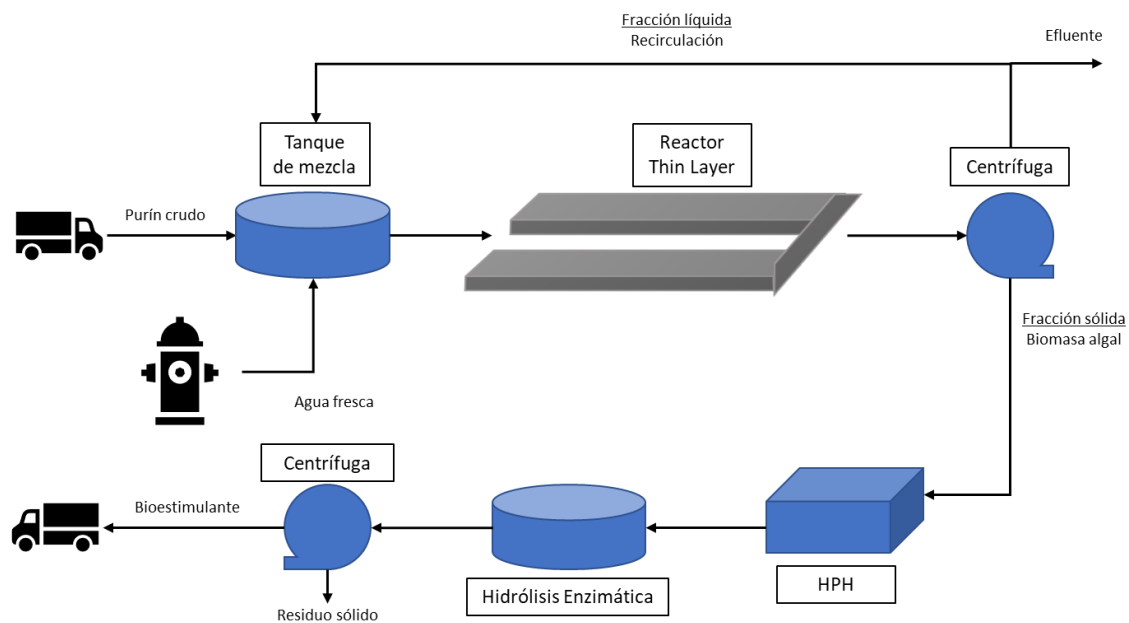


Ilustración 4. Diagrama de flujo de la producción y tratamiento de microalgas y obtención final de bioestimulante

La Unidad Funcional (UF) usada es 1 m<sup>3</sup> de purín crudo tratado en una planta con un consorcio microalgas/bacterias, capaz de tratar 75547 m<sup>3</sup> de purín al año, con una vida media de 25 años. Se elige esta UF ya que la producción final generada en cada etapa es diferente y el volumen es la UF más utilizada para el análisis de plantas de tratamiento de aguas residuales (EDAR) [1].

ENTRADAS

ESCENARIO 0: SIN TRATAMIENTO

SALIDAS

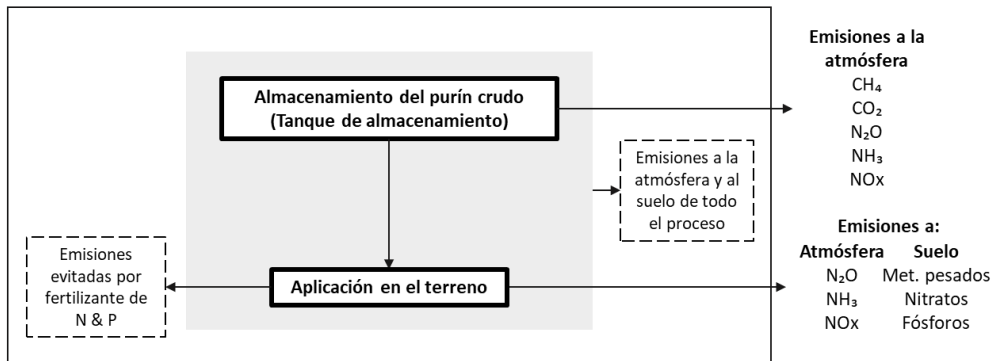


Ilustración 5. Esquema del análisis de ciclo de vida para el escenario de no tratamiento (Fuente: Elaboración propia)

ENTRADAS

ESCENARIO 1: TRATAMIENTO BIOLÓGICO

SALIDAS

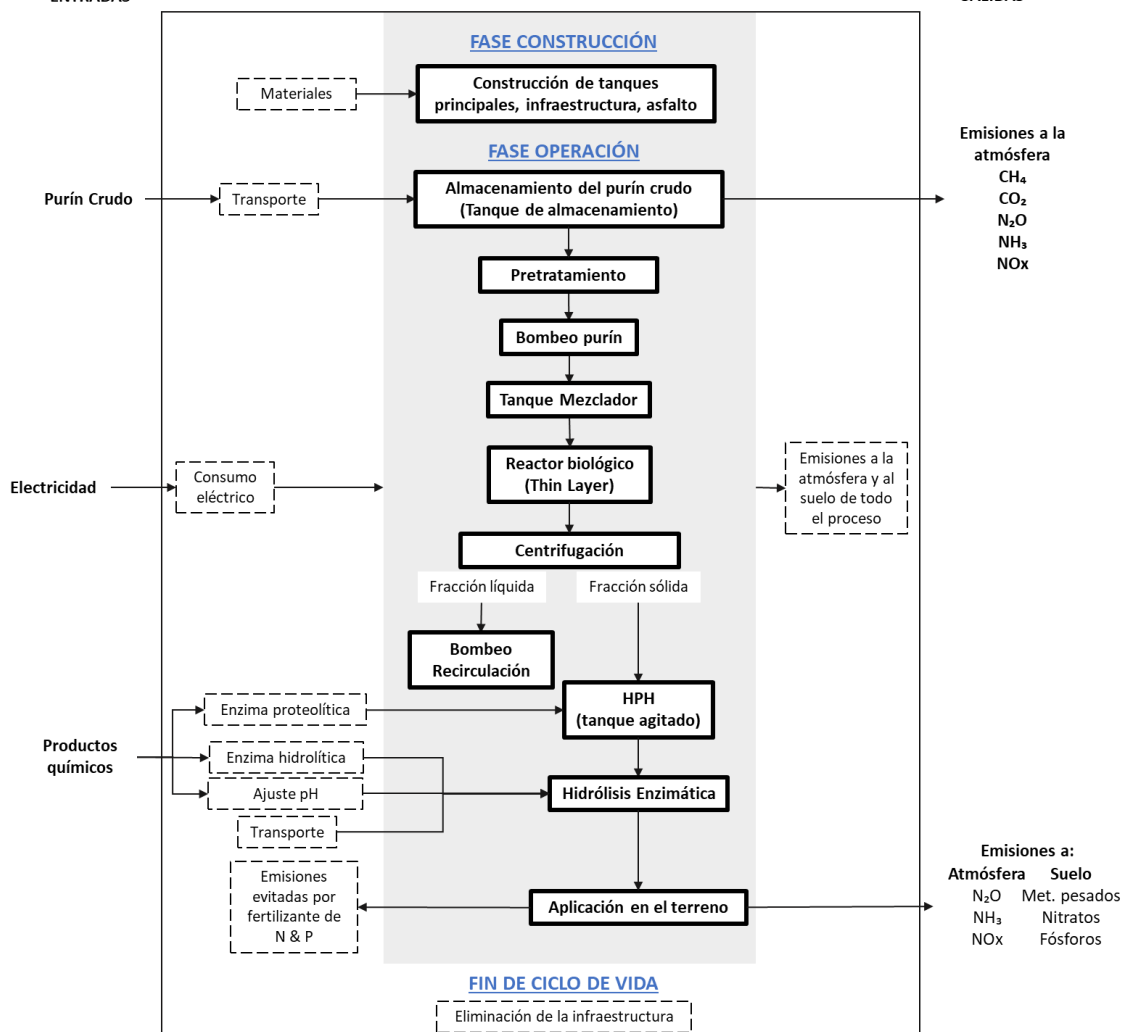


Ilustración 6. Esquema del análisis de ciclo de vida para el escenario 1 (Fuente: Elaboración propia)

Una vez obtenidas las evaluaciones de ambos escenarios, se va a comparar si el incremento de carga evitada por el uso de bioestimulantes compensa con el incremento



de impacto ambiental que se genera al producir la biomasa algal y, posteriormente, tratarla para obtener dichos bioestimulantes.

### 2.1.1. Procedencia y caracterización del purín

El purín es el residuo resultante de la limpieza diaria, con agua, de los excrementos de los cerdos, mezclado con otros desechos que se acumulan en las granjas como paja o restos de comida. Su composición es en un 98% agua, así que, para los siguientes cálculos que se realicen, se considerará su densidad igual a la densidad del agua  $\approx 1000 \text{ kg/m}^3$ .

Se ha establecido que la procedencia del purín sea de granjas dedicadas a la explotación de ganado porcino, todas ellas con registro en el municipio de Cuéllar (Segovia). Para ello se ha hecho una búsqueda en el Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes (PRTR España), reduciendo la búsqueda a las empresas de Segovia dedicadas a la sección 7.a.ii.: 2000 plazas para cerdos de cebo de más de 30 kg. De la búsqueda resultante, se han seleccionado 11 granjas (Tabla 1) con el código postal 40200, correspondiente al municipio de Cuéllar [11].

Luego, a través de la aplicación de Google Maps se ha calculado la distancia en carretera de cada una de las granjas a la planta de tratamiento, que se ubicará a las afueras de Cuéllar (Ilustración 7), ya que no puede estar en una zona muy poblada debido a los malos olores generados.

Tabla 1. Granjas con registro en Cuéllar (Segovia, C.P. 40200) (Fuente: Elaboración propia)

Código PRTR	Nombre del complejo	Distancia a la planta de tratamiento (km)	Nº cabezas de cerdo (Cap. Máxima)
8244	Julia Cabrero Martín	5.2	2460
8228	Inversiones Ganaderas de Páramo	5.3	3952
8220	Diego Tejero Pascual	8.1	3536
7938	Sonlleva XXI S.L.	7.3	3843
7930	Torregutierrez	8.8	2774
7936	Los Albares	8.8	4240
7873	La Gabina, ESPJ	4.1	2520
7702	Sociedad Civil Pozuelo	6.9	2344
4401	Pinos Albos	10.9	3500
4024	Juan Antonio Nieto Montalvillo	12.8	2609
4232	El Cigüeñal	14.3	3360

En total se tiene una producción de 35138 cabezas de cerdo al año, lo que daría, teniendo en cuenta que, de media, cada cerdo produce  $2.15 \text{ m}^3$  de purín al año, un total de  $75546.7 \text{ m}^3$  de purín al año, o lo que es lo mismo,  $206.98 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  de purín.



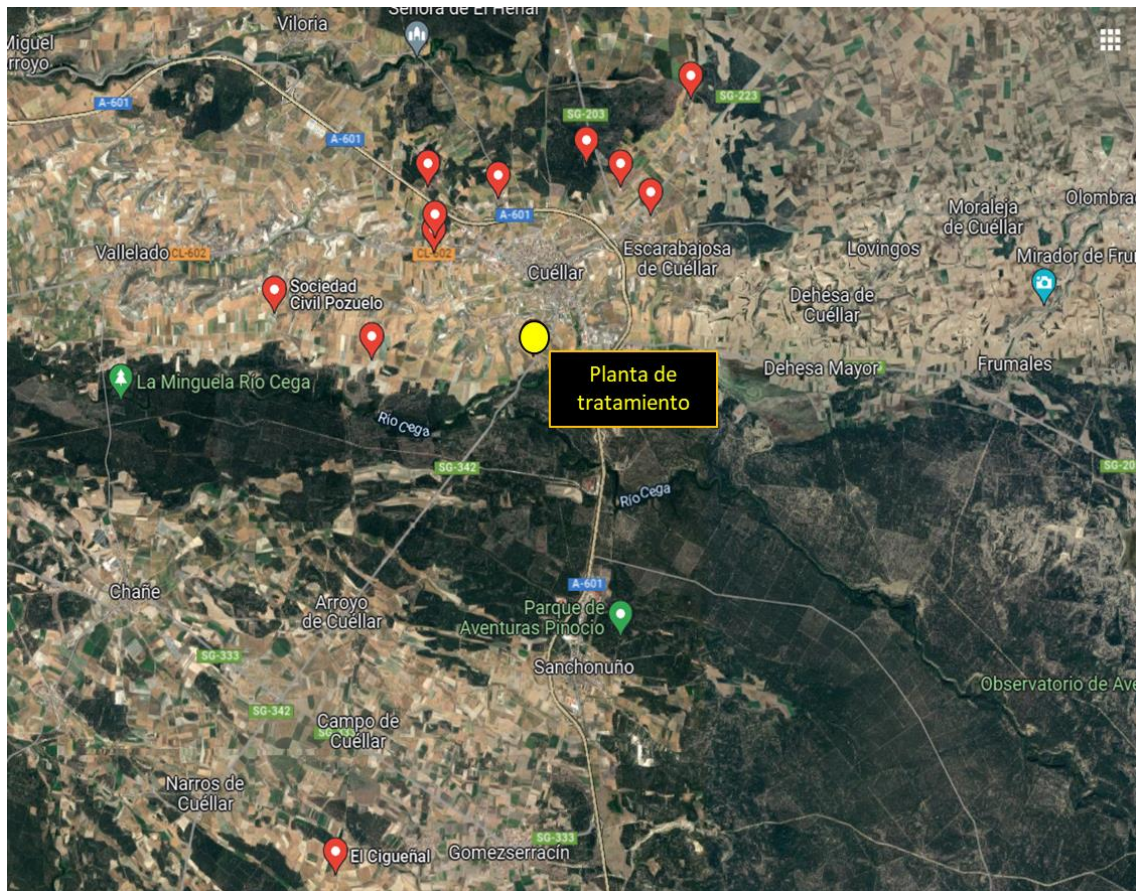


Ilustración 7. Localización de la planta de tratamiento y las granjas de cerdos (Fuente: Google Maps)

Como se ha comentado, el purín está compuesto mayoritariamente por agua: El 1% restante se compone de diferentes compuestos sólidos orgánicos, de macronutrientes (N, P, K) y diferentes micronutrientes.

Para caracterizar el purín que se va a estudiar se han tenido en cuenta varias referencias bibliográficas, intentado alcanzar unos datos que sean coherentes a lo que se encontraría en un caso real. Finalmente, los datos obtenidos (Tabla 2) son lo que aplica *Collao Javiera et al.* [12] en su estudio. Estos serán los datos del purín aplicado en el escenario 0.

Tabla 2. Concentraciones iniciales del purín a tratar (Fuente: elaboración propia)

Parámetro	Unidades	Valores
SST	mg/L	8400
COT	mg/L	14260
NT	mg/L	5120
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	mg/L	3328
TP	mg/L	76

Conocidos los valores de las concentraciones iniciales y junto con el caudal inicial, calculado anteriormente, se puede pasar a la fase de tratamiento.



## 2.1.2. Descripción del tratamiento (Escenario 1)

### 2.1.2.1. Pretratamiento

El tratamiento comienza con la recogida del purín de las 11 granjas de Cuéllar, que se transporta con camiones cisterna, cada uno con capacidad para 20000 L de purín. En la primera etapa del tratamiento el purín se recepciona, descarga y almacena antes de su introducción en el proceso biológico.

Los camiones cisterna descargan el purín que se dirige a un canal de desbaste inicial, compuesto por una reja de gruesos, de 1.5 cm de luz de paso, en la que se separan los sólidos de mayor tamaño. Pasado este proceso, el purín es transportado mediante colectores a una arqueta de recepción y desbaste inicial [13].

El líquido se impulsa por gravedad a un tanque de almacenamiento, donde se retendrá el purín por un periodo de 3.6 horas, mientras se mezcla por un lado con agua fresca, y por otro por una recirculación de la fase líquida que origina la centrifugación del final, en una proporción de 1/20 para el purín crudo (dilución del 5%), obteniendo un caudal de  $4139.55 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  de purín diluido. Esto se hace para evitar inhibición microbiana, consecuencia de la toxicidad del purín, debido principalmente a las altas concentraciones de amonio.

Ambas inyecciones de agua serán impulsadas por bombeo. Además, en esta fase, la mezcla se produce con ayuda de dos agitadores que homogeneizan el purín y lo estabilizan para no dañar el proceso.

### 2.1.2.2. Tratamiento biológico con Thin-Layer

Para este estudio, los parámetros de diseño se calcularon teniendo en cuenta los resultados experimentales obtenidos en los equipos localizados en las instalaciones de la Estación Experimental de la Universidad de Almería.

En este tipo de tratamientos de microalgas el consumo de agua es un gran inconveniente, debido a las grandes evaporaciones directas a la atmósfera, en torno a  $6 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , pudiendo aumentar en épocas de mucho calor. Para minimizar el impacto de estos problemas se realiza una recirculación que utiliza la fase líquida que se genera en la bomba centrífuga posterior al Thin-Layer [8]. Además, para completar esta dilución, se mete una corriente agua fresca, como puede apreciarse en la Ilustración 4.

Una vez obtenida la dilución del 5%, se bombea el purín hasta el reactor Thin-Layer, donde comenzará el proceso biológico. Este reactor opera con un TRH de 3 días, y unas dimensiones de  $248373 \text{ m}^2$  de superficie y 0.05 m de profundidad. Esta profundidad permite maximizar la disponibilidad de luz y, por tanto, la productividad de biomasa y la recuperación de nutrientes. Así, se alcanza una producción de algas de  $30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , lo que da una concentración de  $1800 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  en el efluente que sale del reactor.

Este efluente de salida se envía a una bomba centrífuga, que lo separa en una fase líquida rica en sólida y otra líquida exenta de sólidos. La suspensión contiene la biomasa algal, con una concentración en sólidos del 4%. Por otro lado, parte de la fase líquida se recircula, como ya se ha comentado anteriormente, para diluir el purín crudo.



### 2.1.2.3. Homogeneización a alta presión (HPH)

Posteriormente, la biomasa generada se lleva a unos medios de homogeneización por alta presión, a unos 400 bares, donde se homogeneiza hasta provocar la rotura celular de las paredes de dichas microalgas y así se libera el contenido celular con el que se obtendrán los agentes fitoestimulantes necesario para obtener el bioestimulante agrícola [10].

### 2.1.2.4. Hidrólisis enzimática

La hidrólisis enzimática consiste en el empleo de enzimas, que terminan de romper las paredes celulares de las microalgas y libera los aminoácidos que se necesitan para la formulación del bioestimulante. La biomasa sólida entrante debe estar, siguiendo los datos obtenidos en los estudios experimentales realizados en Almería, a una dilución del 4%. La reacción se realiza en un reactor de tanque agitado, donde empieza el proceso de hidrólisis. Se trabaja a unos 200 rpm, controlando el pH en torno a 7.0 y la temperatura a 50°C, siguiendo los datos de la patente del proceso [10]. El reactor, según los estudios realizados en Almería, trabaja con una potencia de mezcla de  $1\text{kW}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Para llevarlo a cabo, se añade una enzima hidrolítica del tipo celulasa en una concentración del 0.1%. Esta enzima se deja reaccionar durante 250 min, en este proceso continúa la rotura de las paredes y libera el contenido celular. Además, para optimizar el proceso, se irá ajustando el pH con ácido clorhídrico y la temperatura a los niveles adecuados.

Después de que actúe la enzima, se añade una mezcla de proteasas en proporción 1:3, que se encarga de liberar los aminoácidos libres a partir de la proteína constituyente de la biomasa de microalgas. Se deja reaccionar durante 5 horas con una agitación constante de 200 rpm mientras, otra vez, se controlan los valores de pH y temperatura.

Por último, para estabilizar el producto, se añaden excipientes de Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K). Con esto se evitan fermentaciones indeseadas una vez obtenido el producto final. Estas adiciones de enzimas o ajustes de pH varían la concentración de los nutrientes en la biomasa, lo que afectará a la aplicación final en el cultivo.

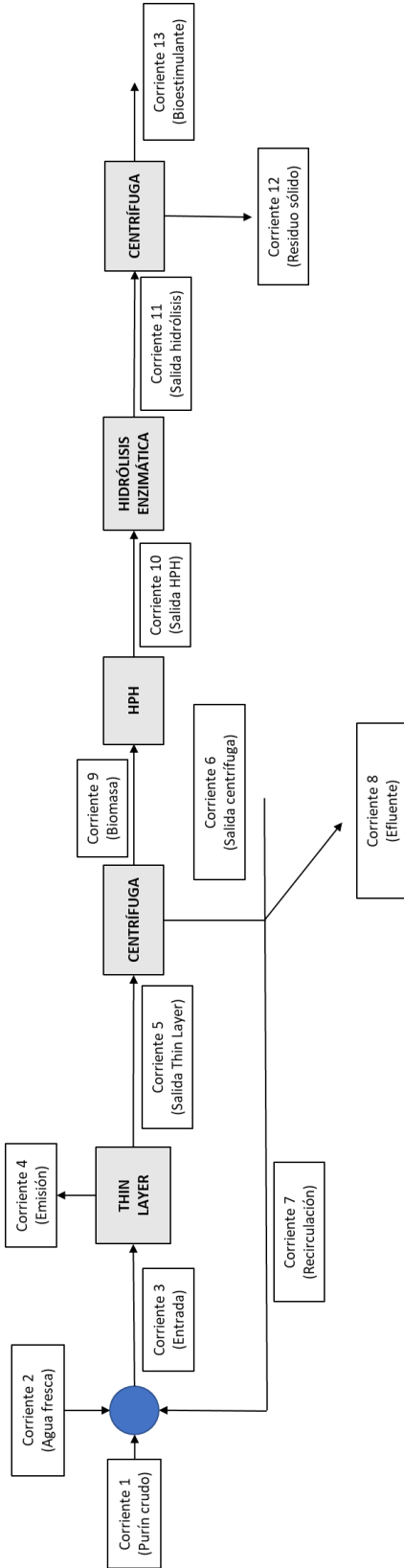
### 2.1.3. Balance de materia

En la Ilustración 8 se ven representadas las corrientes que conforman el balance de materia calculado para el ACV. En ella se miden los caudales totales de cada corriente, la cantidad de agua, Sólidos Suspendedos Totales (SST), Carbono Orgánico Total (COT), Nitrógeno Total (NT), Fósforos Totales (TP) y, por último, los nutrientes en Proteínas, Carbohidratos y Lípidos. Las proporciones de estos tres nutrientes en las microalgas de cada corriente se han estimado según los datos iniciales analizados en la Estación Experimental de la Universidad de Almería: 51.70% Proteínas, 22.30% Carbohidratos y 13.40% Lípidos.

El purín crudo que llega de las granjas da como resultado un caudal de  $206.98\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$  de entrada al proceso (Corriente 1). Esta corriente pasa por el pretratamiento antes de llevarse al tanque de mezcla, donde se diluirá al 5% con una corriente de agua fresca



(Corriente 2) y una recirculación (Corriente 7) que compense las pérdidas de agua por evaporación en el biorreactor.



Corrientes	Q1 (Purín)	Q2 (Agua fresca)	Q3 (Entrada)	Q4 (Emisión)	Q5 (Salida Thin Layer)	Q6 (Salida Centrífuga)	Q7 (recirculación)	Q8 (Efluente)	Q9 (biomasa)	Q10 (Salida HPH)	Q11 (Salida hidrólisis)	Q11 (Fracción líquida)	Q12 (residuo sólido)	Q13 (Bioestimulante)
Q1 (m <sup>3</sup> /d)	206.98	3932.57	5629.78	1490.24	4139.55	3962.58	1490.24	2472.34	176.97	176.97	176.97	3.66	173.30	173.30
Q1 (kg/d)	206977.26	3932567.95	5629781.48	1490236.27	4139545.21	3962579.66	1490236.27	2472343.37	176965.56	176965.56	176965.56	3662.91	173022.65	173022.65
Agua (kg/d)	205238.65	3932567.95	5627902.76	1490236.27	4132094.02	3962207.09	1490096.16	2472110.93	169886.94	169886.94	173495.43	366.29	173193.14	173193.14
Microorgs (g/d)	0	-	37086.21	-	745181.37	372559.07	140111.01	232448.06	707862.230	707862.230	3470124.70	65855.37	3296618.46	173506.73
SST (g/d)	1738608.99	-	1878720.00	-	318990.81	632945.22	238412.41	393532.81	3653851.39	3653851.39	622599.26	8657.42	320896.40	246954.99
COT (g/d)	2951957.73	-	131082.05	-	26354.76	667039.66	29898.48	416311.18	622599.26	622599.26	622599.26	8657.42	58324.55	39384.74
NT (g/d)	68820332	-	717121.15	-	7859.79	7581.93	26311.83	467970.11	327285	327285	9643.68	1787.00	7311.67	2171.01
IP (g/d)	13730.27	-	19459.92	-	3663.77	9271.13	1077.95	36942.08	36942.08	36942.08	358662.73	157853.77	7311.67	2171.01
Compost (g/d)	-	-	3124.72	-	186163.45	8908.67	3124.72	151825.92	157853.77	157853.77	157853.77	948335.39	7311.67	2171.01
Lípidos (g/d)	-	-	18774.88	-	998463.30	46922.93	18774.88	31148.04	948335.39	948335.39	948335.39	948335.39	7311.67	2171.01

Corrientes	Q1 (Purín)	Q2 (Agua fresca)	Q3 (Entrada)	Q4 (Emisión)	Q5 (Salida Thin Layer)	Q6 (Salida Centrífuga)	Q7 (recirculación)	Q8 (Efluente)	Q9 (biomasa)	Q10 (Salida HPH)	Q11 (Salida hidrólisis)	Q11 (Fracción líquida)	Q12 (residuo sólido)	Q13 (Bioestimulante)
Microorgs (mg/L)	-	-	6.59	-	1800	94.02	94.02	94.02	40000	40000	19609.04	378.60	90000	1001.17
SST (mg/L)	8400	-	333.71	-	1800	94.02	94.02	94.02	40000	40000	19609.04	378.60	90000	1001.17
COT (mg/L)	14260	-	566.61	-	77.06	159.98	159.98	159.98	20647.25	20647.25	20647.25	378.60	90000	1001.17
NT (mg/L)	5120	-	232.79	-	388.86	168.33	168.33	168.33	3518.03	3518.03	3518.03	493.0	1927.12	226.97
IP (mg/L)	3828	-	127.38	-	199.58	9.19	9.19	9.19	358.64	358.64	358.64	493.0	1927.12	226.97
IP (mg/d)	76	-	3.46	-	1.88	2.50	2.50	2.50	59.92	59.92	59.92	10.30	2012.52	12.53

Ilustración 8. Balance de materia del proceso de tratamiento del escenario 1 (Fuente: Elaboración propia)



La superficie del reactor se ha estimado a partir de los resultados obtenidos en los estudios experimentales en Almería, donde se opera con un Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) de 3 días, y una profundidad, típica de este tipo de reactores, de 0.05 m. Conociendo estos datos y la corriente de entrada se calcula una superficie de 248373 m<sup>2</sup>.

Para la Corriente 4 se ha tenido en cuenta que en el reactor se produce evaporación a un ritmo de 6 L·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>, siguiendo los datos de Arashiro et al. [9]. Teniendo en cuenta la superficie calculada, se tiene una corriente de evaporación de 1490.24 m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup> (Corriente 4). Además, en el reactor se tienen en cuenta unos rendimientos de eliminación de COT, N y P de 90%, 60% y 60%, respectivamente, siguiendo los datos estimados por Javiera et al. [12].

A la salida del reactor se obtiene la Corriente 5 para llegar a la centrífuga, que separa la corriente en dos fracciones. El rendimiento de separación en la centrifugación se estima de un 95%, siguiendo el estudio de Valderrobres (2009) [13] y la cantidad formada de biomasa final se ha estimado de 30 g·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>, según el estudio de Petersen et al. [14]. Esto ayudará a calcular la cantidad del consorcio microalgas/bacterias, que compondrán los SST, de la Corriente 9, en la que la concentración de microalgas/bacterias se estima de 40000 mg/L, según los datos de Javiera et al. [12] y de la Corriente 6.

La fase líquida que sale de la centrífuga (Corriente 6) se divide en dos: por un lado, la recirculación que irá a los procesos iniciales de mezcla (Corriente 7) y, por otro lado, el efluente, que se vierte al medio receptor (Corriente 8).

Una vez obtenida la biomasa de la fase sólida, se lleva al proceso de HPH, donde se realiza la rotura celular de la biomasa y se libera el contenido celular. Siguiendo el estudio de Navarro et al. (2020) [15], este proceso se realizan 2 pases, a una presión de 400 bares. Bajo estas condiciones, se consigue un flujo de biomasa húmeda de 176.97 m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>, con una biomasa con el contenido celular liberado.

La Corriente 10, resultante del proceso de HPH, se bombea al reactor de tanque agitado, donde tendrá lugar la hidrólisis enzimática. Aquí, como se ha comentado anteriormente, se trabaja con una dilución de la biomasa del 4%, agitando a velocidad de 200 rpm, y manteniendo los niveles de pH y temperatura. En este proceso se produce una solubilización de los nutrientes de la biomasa, a razón de 71.7%, 42.3% y 33.4% para las proteínas, los carbohidratos y los lípidos, respectivamente, que se mezclan con la fase líquida.

La corriente saliente se lleva a una última centrifugación, que vuelve a separar, con un rendimiento del 95%, en fases sólida y líquida. La fase sólida es un residuo orgánico, por lo que sale del proceso y se puede llevar o a una planta de digestión anaerobia o a compostaje. Para esta fase, según los datos obtenidos en los estudios experimentales realizados en Almería, se asume un % de fracción sólida del 90%. Por otro lado, la fase líquida obtenida será el bioestimulante final que se aplicará en el cultivo.

En la tabla 3, se muestra un resumen de las principales variables de diseño consideradas para el cálculo del balance de materia.

Tabla 3. Resumen de parámetros asumidos para el cálculo del balance de materia (Fuente: Elaboración propia)

Parámetro	Unidades	Valor	
Q purín	m <sup>3</sup> /año	75546.7	
	m <sup>3</sup> /d	206.98	
Dilución	%	5	
Q diluido	m <sup>3</sup> /d	4139.55	
Producción algas	g/m <sup>2</sup> /d	30	
Evaporación Thin Layer	L/m <sup>2</sup> /d	6	
Área Thin Layer	m <sup>2</sup>	248372.71	
Rend. Centrífuga	%	95	
Profundidad Thin Layer	m	0.05	
Volumen Thin Layer	m <sup>3</sup>	12418.64	
Velocidad dilución	1/d	6.67	
TRH	d	3	
	COT	%	90
Rend. Eliminación	NT	%	60
	TP	%	60
Concentración SST de entrada al HPH	%	4	
% Fracción sólida 2ª centrífuga	%	90	
% hidrólisis	%	51	

## 2.2. Metodología ACV

El software que se utiliza en este trabajo y que se aplica para el ACV, es la octava generación del software para el Análisis del Ciclo de Vida (ACV) o Life Cycle Assessment (LCA). Este programa permite analizar y comparar los aspectos medioambientales de un modo sistemático y consistente, con unas potentes bases de datos en materia ambiental.

En este trabajo el ACV se aborda empleando la metodología IMPACT 2002+, que contempla 15 categorías de impacto de punto medio que se agrupan en cuatro categorías principales de daño: a la salud humana, a la calidad del medio ambiente, a los recursos naturales y al cambio climático [16].

La estructura base del método es: Caracterización, Evaluación del daño, Normalización y Ponderación. Para la Caracterización de las categorías de impacto, una vez definidas éstas, los resultados del inventario de ciclo de vida son asignados a cada una de las categorías de impacto. Los factores de caracterización deben reflejar la contribución relativa de un resultado del ICV al resultado del indicador de la categoría de impacto.

Cuando indicadores de la categoría de impacto se agrupan al mismo punto final o categoría de daño, son definidos de tal manera que la unidad del resultado del indicador es la misma. Esto permite la suma de los resultados del indicador para cada categoría de daño y con ello la Evaluación de Daño.

La Normalización analiza la contribución relativa respectiva de cada impacto al daño global de la categoría de daño considerada. La normalización se realiza dividiendo el impacto a las categorías de daño, por los respectivos factores de normalización. Estos



factores son el resultado de dividir el impacto por unidad de emisión entre el impacto total de todas las sustancias de una categoría específica por persona y por año para Europa. Es decir, se considera como factor de normalización el promedio anual provocado por un habitante europeo [16].

La Ponderación convierte los resultados de los indicadores normalizados de las diferentes categorías de impacto en otros valores utilizando factores numéricos (factores de ponderación), basados en valoraciones subjetivas. El proceso de ponderación consiste en multiplicar los factores de ponderación por el resultado de la normalización para cada categoría de impacto. En este trabajo se considera que el criterio de ponderación empleado es 1 para todas las categorías de daño. Es decir, se considera que todas las categorías de daño tienen la misma importancia y se le asigna el mismo peso a la hora de obtener la puntuación final única.

### 2.3. Análisis de inventario (Escenario 1)

En este apartado se van a exponer los métodos usados para calcular el inventario del ciclo de vida para el escenario de 1 para la Unidad Funcional fijada ( $1 \text{ m}^3$  de purín crudo), así como las cargas evitadas por el uso de fertilizante químico convencional. Los cálculos completos se incluyen en los Anexos y los resultados de estos se incluirán a modo de resumen al final de este mismo apartado.

Además, se va a incluir la fase de construcción de la planta de tratamiento para el escenario 1, que requiere una ocupación de terreno de  $300000 \text{ m}^2$ , los tanques, reactores, bombas... y las tuberías que transportan el purín a lo largo del proceso. Los materiales, medidas y otros detalles de la infraestructura para la fase de construcción se han realizado basándose en el trabajo realizado por el Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Aragón [13], en el que se trabaja con un caudal similar al de este proyecto, y el trabajo de *Corbala et al.* [1].

#### 2.3.1. Cálculo del consumo eléctrico

El consumo eléctrico es una de las principales fuentes de impacto ambiental del escenario 1, ya que el tratamiento biológico requiere alto consumo en varios puntos diferentes.

##### 2.3.1.1. Consumo eléctrico en el pretratamiento

Una vez que el purín llega a la planta pasa al pretratamiento, donde ya aparecen los primeros consumos de electricidad necesarios. Este consta de un desbaste inicial y una rampa de separación de sólidos.

Según el estudio de *Valderrobres* (2009) [13], en el que se diseña una planta de tratamiento para purín de cerdo, un equipo de reja automática de desbaste con luz de paso de  $15 \text{ mm}$  tiene una potencia de  $0.18 \text{ kW}$ . Para la rampa de separación de sólidos, con una luz de paso de  $0.65 \text{ mm}$ , se estima una potencia de  $0.25 \text{ kW}$  en el mismo estudio de *Valderrobres* (2009).

Usando la Ecuación 1 se obtiene el consumo eléctrico (CE) del pretratamiento para la Unidad Funcional ( $1 \text{ m}^3$  de purín crudo), que será de  $0.05 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$  de purín crudo.

$$CE \left[ \frac{kWh}{m^3 \text{ purín crudo}} \right] = \frac{P[kW] \cdot t[h]}{V_{\text{Purín}}[m^3 \text{ purín crudo}]} \quad \text{Ec. (1)}$$

### 2.3.1.2. Consumo eléctrico en el mezclador

Para este estudio, se ha buscado un modelo de agitador sumergible de la empresa WAMGroup, especialista en este tipo de equipos. El modelo SE-022 tiene una potencia de 2.2 kW y puede operar con flujos de hasta de 450 m<sup>3</sup>/h. Aplicando la Ecuación 1 se calcula el consumo eléctrico en esta fase del tratamiento, que será de 0.26 kWh·m<sup>-3</sup> de purín crudo.

### 2.3.1.3. Consumo eléctrico de bombeo

Este consumo depende de varios factores, como la densidad del purín, la distancia de transporte, caudal, velocidad, etc. Para este proyecto, se ha seguido el método usado por *Corbala et al. (2018)* [1] que, mediante las ecuaciones 1 y 2, calcula la potencia y consumo de la bombas.

$$P[\text{Wattios}] = \frac{Q \left[ \frac{m^3}{s} \right] \cdot H[m] \cdot g \left[ \frac{m}{s^2} \right] \cdot \rho \left[ \frac{kg}{m^3} \right]}{\eta} \quad \text{Ec. (2)}$$

$$CE \left[ \frac{kWh}{m^3 \text{ purín crudo}} \right] = \frac{P[kW] \cdot t_{\text{Pumping}}[h]}{V_{\text{Purín}}[m^3 \text{ purín crudo}]} \quad \text{Ec. (1)}$$

Los cálculos se han realizado considerando una densidad del purín de 1000 kg·m<sup>-3</sup>.

Para el bombeo del purín al mezclador se tiene un caudal (Corriente 1) de 206.98 m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>, o lo que es lo mismo, 0.0024 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>. La altura se ha estimado de 12 m y la eficiencia del 70%. El consumo final obtenido será de 0.047 kWh·m<sup>-3</sup> de purín crudo.

El segundo bombeo a tener en cuenta es el que se utiliza para incorporar al tanque de mezcla agua de dilución limpia (Corriente 2), de 0.0455 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>, que se suministra de una acequia cercana a la planta de tratamiento, se ha estimado una altura de 5 m y una eficiencia también del 70%. Realizando los cálculos se obtiene un consumo de 0.37 kWh·m<sup>-3</sup> de purín crudo.

El tercer bombeo que se tiene en cuenta es el que recircula la fase líquida que sale de la centrífuga (Corriente 7), de 0.0172 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>. Para este se ha estimado una altura de 10 m y eficiencia del 65% y se obtiene un consumo de 0.30 kWh·m<sup>-3</sup>.

El cuarto y último bombeo a tener en cuenta es el que tiene lugar a la salida del HPH, para conducir la biomasa algal a la hidrólisis enzimática. Este conduce un caudal mucho menor que el resto, por lo que la potencia necesaria será también muy baja. Se tiene en cuenta una altura de 5 m y una eficiencia también del 70%, lo que da un consumo final de 0.0166 kWh·m<sup>-3</sup>.

Por último, se ha estimado el consumo eléctrico de las centrífugas, situadas a la salida del reactor biológico y a la salida de la hidrólisis.

Para la primera centrifugación se ha tenido en cuenta el estudio de *Valderrobres (2009)*, que utiliza una centrífuga para un caudal similar al de este estudio. En él se estiman unas

potencias para las diferentes partes de la bomba: Motor principal (30 kW), Rotovariador (15 kW), Motor saca-sólidos (0.75 kW) y un Motor ventilador (1.1 kW). Utilizando la ecuación 1, se calcula un consumo de  $5.43 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$  de purín crudo.

Para la segunda centrifugación se ha buscado una bomba en el mercado, siendo el de este caso de  $176.97 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$  (Corriente 14). El modelo Hidrobex HCPF-70 de la empresa ModregoHogar [17] trabaja con caudales pequeños, con una potencia de 1.5 kW. Para calcular el consumo eléctrico se utiliza la Ecuación 1 para esta potencia, lo que da como resultado un consumo de  $0.17 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$  de purín crudo.

#### 2.3.1.4. Consumo eléctrico en el HPH

Navarro *et al.* (2020), utiliza una tabla (Tabla 3) en la que relaciona el consumo eléctrico de este proceso a la presión y el número de pases que hace la biomasa [15].

Tabla 4. Consumo energético por kg de materia seca del HPH, según condiciones de presión y número de pases (Fuente: Navarro *et al.* (2020))

Pressure (bar)	Energy consumption (MJ/Kg dry biomass)				
	Number of passes				
	1	2	3	4	5
200	0.45	0.97	1.61	2.45	3.88
400	0.84	1.93	3.45	4.95	6.20
600	1.13	2.45	3.74	5.82	6.92
800	1.83	4.21	6.92	8.16	11.43

Para este estudio, se van a realizar 2 pases de biomasa a una presión de 400 bares. Esto, multiplicado por la materia seca en la Corriente 9 ( $34.2 \text{ kg SST}\cdot\text{m}^{-3}$  de purín crudo), da un consumo de  $66 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$  de purín crudo, es decir,  $18.34 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$  de purín crudo.

#### 2.3.1.5. Consumo eléctrico en la hidrólisis enzimática

Para calcular este consumo se han tenido en cuenta los datos obtenidos en los estudios experimentales en Almería, cuyo reactor tiene una energía de  $1 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-3}$  de reactor. Conociendo el tiempo TRH del HPH, que es de 250 min, y la Corriente 9 que entra, se calcula el consumo de la siguiente manera:

$$176.97 \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right] \cdot 250 [\text{min}] \cdot 1440 \left[ \frac{\text{min}}{\text{d}} \right] = 30.7 \text{ m}^3$$

$$1 \left[ \frac{\text{kW}}{\text{m}^3} \right] \cdot 30.7 [\text{m}^3] \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{\text{d}}{\text{m}^3} \right] \cdot 24 \left[ \frac{\text{h}}{\text{d}} \right] = 3.56 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}$$

Por lo que el resultado es de  $3.56 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ .

### 2.3.2. Emisiones

#### 2.3.2.1. Emisiones en el almacenamiento del purín

De acuerdo con el informe realizado por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2010) [18], la frecuencia de retirada del purín de los sistemas de almacenamiento exterior, en tanque abierto, es del 43.81% para frecuencias mayores de



1 mes, 29.31% mensual y 26.88% menor a un mes. Por tanto, para los cálculos se tendrá en cuenta que el purín que llega a la planta se almacena en tanque abierto durante 2 meses con una temperatura media de 12.2°C en Cuéllar (Segovia).

### Emisiones de metano (CH<sub>4</sub>)

El cálculo de las emisiones de metano en la fase de almacenamiento, según *Corbala et al. (2018)*, depende de la cantidad de sólidos volátiles (VS) excretados por los cerdos y la capacidad máxima de producción de metano del purín [19] (Ecuación 3).

$$CH_{4(T)} \left[ \frac{\text{kg CH}_4}{\text{m}^3 \text{ purín}} \right] = \left[ VS_{(T)} \left[ \frac{\text{kg VS}}{\text{animal} \cdot \text{d}} \right] \cdot 365 \left[ \frac{\text{d}}{\text{año}} \right] \right] \cdot \left[ B_{0(T)} \left[ \frac{\text{m}^3 \text{ CH}_4}{\text{kg VS}} \right] \cdot 0.67 \left[ \frac{\text{kg CH}_4}{\text{m}^3 \text{ CH}_4} \right] \cdot \sum_{s,k} MCF_{(sk)} \cdot MS_{(T,s,k)} \right] \cdot \frac{1}{2.15} \left[ \frac{\text{animal} \cdot \text{año}}{\text{m}^3 \text{ purín}} \right]$$

Ec. 3

Este modelo tiene cálculos para diferentes tipos de ganado, al escoger los datos se tiene que buscar la categoría (T). La S y K hacen referencia al sistema y región, respectivamente; VS<sub>(T)</sub> hace referencia a la cantidad de sólido volátil excretado a diario; B<sub>0(T)</sub> es la máxima capacidad de metano producido por el purín; 0.67 es la densidad del metano; MCF es el factor de conversión del metano en un sistema S y una región K; y MS<sub>(T,s,k)</sub> es la fracción de purín, usando el sistema de gestión S en la región K.

**Consideraciones en el cálculo:** La cantidad media de VS excretados por un cerdo en el oeste de Europa es de 0.59 kg VS d<sup>-1</sup> [20]; B<sub>0</sub> en el oeste de Europa es de 0.45 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> kg<sup>-1</sup> VS [21]; MCF para almacenamiento de purín con una temperatura media de 12.2°C es del 20% [21]; y MS para purín almacenado en foso durante más de 1 mes en el oeste de Europa es 69.8% [21]. Por último, se divide entre los 2.15 m<sup>3</sup>·cerdo<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup> obtener los kg CH<sub>4</sub> para la UF, dando un resultado de 4.25 kg CH<sub>4</sub>·m<sup>-3</sup> de purín crudo.

### Emisiones directas de N<sub>2</sub>O

Las emisiones directas de N<sub>2</sub>O, según el método empleado por *Corbala et al. (2018)*, utiliza la ecuación 4 [1].

$$N_2O_{D(mm)} \left[ \frac{\text{kg N}_2\text{O}}{\text{m}^3 \text{ purín}} \right] = \left[ \sum_s \left[ \sum_T \left( N_{(T)} \cdot Nex_{(T)} \left[ \frac{\text{kg N}}{\text{d}} \right] \cdot MS_{(T,s)} \right) \right] \cdot EF_{3(s)} \left[ \frac{\text{kg N}_2\text{O-N}}{\text{kg N}} \right] \right] \cdot \frac{44}{28} \left[ \frac{\text{kg N}_2\text{O}}{\text{kg N}_2\text{O-N}} \right] \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{\text{d}}{\text{m}^3 \text{ purín}} \right]$$

Ec. 4

En esta, N<sub>(T)</sub> es el número de cabezas de ganado de la categoría T; Nex<sub>(T)</sub> es la media de N excretado anualmente por cabeza de la especie/categoría T en el país; MS<sub>(T,s)</sub> es la fracción de N total excretado por cada ganado de la especie/categoría T que se gestiona con el sistema S en el país; EF<sub>3</sub> es el factor de emisión para emisiones directas de N<sub>2</sub>O del sistema de gestión S en el país; y  $\frac{44}{28}$  es el factor de conversión de 1 kg N<sub>2</sub>O-N a 1 kg de N<sub>2</sub>O gaseoso.

**Consideraciones en el cálculo:** MS para sistema de gestión de almacenamiento en foso de purín de cerdo durante más de 1 mes en el oeste de Europa es 69.8% [21] y EF<sub>3</sub> es del 0.2% [21]; N<sub>(T)</sub>·Nex<sub>(T)</sub> se obtiene del balance de materia, donde se obtiene 1059.7 kgN·d<sup>-1</sup>.

Por último, se divide entre la corriente de purín inicial para obtener el resultado respecto a la UF, obteniendo  $0.01 \text{ kg N}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-3}$  de purín crudo.

### Emisiones indirectas de $\text{N}_2\text{O}$

Estas son emisiones de nitrógeno en otras formas, p.ej. en forma de amonio u óxidos nitrosos en el almacenamiento. El nitrógeno volatilizado como amonio se escapa a favor del viento de forma que contribuye a las emisiones indirectas de  $\text{N}_2\text{O}$ . Para calcularlo se utiliza el método de IPCC (2006) (Ecuaciones 5 y 6), tal como hizo *Corbala et al. (2018)*.

$$\sum_s \left[ \sum_T \left[ \left( N_{(T)} \cdot Nex_{(T)} \left[ \frac{\text{kg N}}{d} \right] \cdot MS_{(T,S)} \right) \cdot Frac_{GasMS_{(T,S)}} \left[ \frac{\text{kg NH}_3-N+NO_x-N_{Volatilized}}{\text{kg N}} \right] \right] \right] \quad \text{Ec. 5}$$

$$N_{2O_G(mm)} \left[ \frac{\text{kg N}_2\text{O}}{\text{m}^3 \text{ purín}} \right] = \left( N_{volatilization-MMS} \cdot EF_4 \left[ \frac{\text{kg N}_2\text{O-N}}{\text{kg NH}_3-N+NO_x-N_{Volatilized}} \right] \right) \cdot \frac{44}{28} \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{d}{\text{m}^3 \text{ purín}} \right] \quad \text{Ec. 6}$$

$N_{volatilization-MMS}$  es la cantidad de nitrógeno del purín que se pierde debido a la volatilización de  $\text{NH}_3$  y  $\text{NO}_x$ ;  $N_{(T)}$  es la excreción media anual de N por cabeza de especie/categoría T;  $N_{ex(T)}$  es la excreción media anual de N por cabeza de la especie/categoría T en el país;  $MS_{(T,s)}$  es la fracción de la excreción total anual de nitrógeno para cada especie/categoría de ganado T que se volatiliza como  $\text{NH}_3$  y  $\text{NO}_x$  en el sistema de gestión del purín S (%);  $N_{2O_G(mm)}$  son las emisiones indirectas de  $\text{N}_2\text{O}$  debidas a la volatilización del N procedente de la gestión del estiércol en el país;  $EF_4$  es el factor de emisión de las emisiones de  $\text{N}_2\text{O}$  procedentes de la deposición atmosférica de nitrógeno en los suelos y las superficies de agua;  $\frac{44}{28}$  es el factor de conversión de  $\text{kg N}_2\text{O-N}$  a  $\text{kg N}_2\text{O}$  gaseoso.

**Consideraciones en el cálculo:** El  $EF_4$  por defecto es de  $0.01 \text{ kg N}_2\text{O-N (kg NH}_3\text{-N + NO}_x\text{-N volatilizado)}^{-1}$ ; MS para el sistema de gestión del purín de cerdo de almacenamiento en fosa durante más de un mes es de 69.8% [21]; y el  $Frac_{GasMS}$  para purín de cerdo almacenado es del 20% [21];  $N_{(T)} \cdot Nex_{(T)}$  se obtiene del balance de materia, donde se obtiene  $1059.7 \text{ kgN}\cdot\text{d}^{-1}$ . Por último, se divide entre la corriente de purín inicial para obtener el resultado respecto a la UF, lo que da  $0.00003 \text{ kg N}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-3}$  de purín crudo.

### Emisiones de Amonio ( $\text{NH}_3$ )

El cálculo de amonio se hace de acuerdo con la metodología Tier 2 para el cálculo de emisiones de  $\text{NH}_3\text{-N}$  de gestión del purín, de acuerdo con el EMAP-EEA (2019) Tabla 3.9, tal como aplicó *Corbala et al. (2018)*. (Ecuación 7).

$$NH_3 \left[ \frac{\text{kg NH}_3}{\text{m}^3 \text{ purín}} \right] = TAN \left[ \frac{\text{kg TAN}}{d} \right] \cdot 0.11 \left[ \frac{\text{kg NH}_3-N}{TAN} \right] \cdot 65\% \cdot \frac{17}{14} \frac{\text{kg NH}_3}{\text{kg NH}_3-N} \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{d}{\text{m}^3 \text{ purín}} \right] \quad \text{Ec. 7}$$

La cantidad de TAN (Nitrógeno Amoniacal Total) en el purín se obtiene del balance de materia, siendo de  $688.82 \text{ kg TAN}\cdot\text{d}^{-1}$ . El FE de  $\text{NH}_3\text{-N}$  (Factor de emisión del Amoníaco) por defecto para el almacenamiento de purín de cerdo es de  $0.11 \text{ kg NH}_3\text{-N}\cdot\text{kg TAN}^{-1}$ . La proporción de TAN para cerdos de engorde y cerdas es del 65% del N total. Esta cantidad de emisiones de  $\text{NH}_3\text{-N}$  se convierten en  $\text{NH}_3$  multiplicando por 17/14. El  $\text{NH}_3$  resultante





se divide entre el purín inicial tratado y así obtener la emisión para la UF. El resultado obtenido es de  $0.31 \text{ kg NH}_3 \cdot \text{m}^{-3}$  de purín crudo.

### Emisiones de $\text{NO}_x$

Las emisiones de  $\text{NO}_x$  se determinan usando la metodología de Tier 2 para el cálculo de emisiones de óxidos nítricos de gestión de purín, de acuerdo con el EMAP-EAA (2019) tabla 3.10, tal como usa *Corbala et al. (2018)* (Ecuación 8). El  $\text{FE}_{\text{Almacenamiento-purín}}$  de  $\text{NO}$  (óxido nítrico) por defecto es de  $0.0001 \text{ kg NO} \cdot \text{kg TAN}^{-1}$ . La proporción de TAN para cerdos de engorde es de 0.65 del total de N.

$$\text{NO} \left[ \frac{\text{kg NO}}{\text{m}^3 \text{purín}} \right] = \text{TAN} \left[ \frac{\text{kg TAN}}{\text{d}} \right] \cdot 0.0001 \left[ \frac{\text{kg NO}}{\text{kg TAN}} \right] \cdot 65\% \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{\text{d}}{\text{m}^3 \text{purín}} \right] \quad \text{Ec. 8}$$

El resultado de aplicar la ecuación 8 es de  $0.0002 \text{ kg NO}_x \cdot \text{m}^{-3}$  de purín crudo.

#### 2.3.2.2. Emisiones en el reactor biológico

Las emisiones en el reactor biológico se producen por la vaporización de gases en el proceso. Estos se calcularon en la corriente del balance de materia. La evaporación en el proceso se estima de  $6 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ . Con el área del reactor se puede obtener la corriente de evaporación y sólo quedaría saber la concentración de contaminantes que van a ir con esta evaporación. El resultado se divide entre la corriente de purín inicial para tener el resultado respecto a la UF, que es  $-19.45 \text{ kg CO}_2 \cdot \text{m}^{-3}$  de purín crudo y  $0.124 \text{ kg NH}_3 \cdot \text{m}^{-3}$  de purín crudo.

#### 2.3.2.3. Emisiones de transporte

Se han calculado las emisiones provocadas, por un lado, por el transporte del purín crudo de cada una de las 11 granjas de Cuéllar a la planta de tratamiento, y por otro lado del transporte de la biomasa equivalente tratada a cada una de esas granjas, donde se va a aplicar el producto.

Conociendo las distancias de cada granja a la planta de tratamiento, la producción de purín de cada granja y la capacidad de los camiones ( $20 \text{ m}^3$ ) se ha estimado el número de viajes que deben hacer estos para recoger el purín. Luego, con el número total de viajes se hace una ponderación de lo que afecta cada viaje al total (*Tabla 4*) y, multiplicando por la distancia recorrida, se obtienen los tkm necesarios para valorar el impacto. Se ha contado el doble de la distancia de cada viaje, ya que se tiene en cuenta el viaje tanto de ida como de vuelta. Se ha estimado que cada cerdo produce una cantidad de  $2.15 \text{ m}^3$  de purín al año. El resultado final es de  $16.98 \text{ tkm} \cdot \text{m}^{-3}$  de purín crudo.

Tabla 4. Estimación de ponderación de cada granja para el cálculo del tkm de transporte del purín

	Distancia (km)	Cabezas de cerdo (Capacidad)	Purín (m <sup>3</sup> /año)	Nº viajes camión	Ponderación viaje
Julia Cabrero Martín	5.2	2460	5289	265	0.07
Inversiones Ganaderas de Páramo	5.3	3952	8496.8	425	0.11
Diego Tejero Pascual	8.1	3536	7602.4	381	0.10
Sonlleva XXI S.L.	7.3	3843	8262.45	414	0.11
Torregutierrez	8.8	2774	5964.1	299	0.08
Los Albares	8.8	4240	9116	456	0.12
La Gabina, ESPJ	4.1	2520	5418	271	0.07
Sociedad Civil Pozuelo	6.9	2344	5039.6	252	0.07
Pinos Albos	10.9	3500	7525	377	0.10
Juan Antonio Nieto Montalvillo	12.8	2609	5609.35	281	0.07
El Cigüeñal	14.3	3360	7224	362	0.10
				3783	

El proceso es el mismo para los viajes de transporte de la biomasa desde la planta de tratamiento a cada granja. En este caso se calcula la biomasa que corresponde a cada granja por el purín que ha producido. Este impacto será mucho menor, ya que el volumen de purín crudo que entra en la planta es mucho mayor que el de bioestimulante que sale (Tabla 5), siendo que por cada m<sup>3</sup> de purín que entra, se generan 0.84 m<sup>3</sup> de bioestimulante. El resultado es de 14.22 tkm·m<sup>-3</sup> de purín crudo.

Tabla 5. Estimación ponderación de cada granja para cálculo de tkm para transporte de la biomasa (Fuente: Elaboración propia)

	m <sup>3</sup> biomasa bioestimulante equivalente/año	distancia (km)	nº viajes	ponderación
Julia Cabrero Martín	4428.49	5.2	222	0.070
Inversiones Ganaderas de Páramo	7114.39	5.3	356	0.112
Diego Tejero Pascual	6365.51	8.1	319	0.101
Sonlleva XXI S.L.	6918.17	7.3	346	0.109
Torregutierrez	4993.76	8.8	250	0.079
Los Albares	7632.85	8.8	382	0.121
La Gabina, ESPJ	4536.51	4.1	227	0.072
Sociedad Civil Pozuelo	4219.67	6.9	211	0.067
Pinos Albos	6300.70	10.9	316	0.100
Juan Antonio Nieto Montalvillo	4696.72	12.8	235	0.074
El Cigüeñal	6048.68	14.3	303	0.096
			3167	

Para conocer la producción de cada granja se ha usado el Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes (PRTR España), donde viene registrada la capacidad de estas.

### 2.3.2.4. Emisiones en la aplicación en el suelo

#### Emisiones directas de N<sub>2</sub>O

Para el cálculo de las emisiones directas de N<sub>2</sub>O se utiliza el método del IPCC (2006) (Ecuación 9) [19], tal como aplica Corbala et al. (2018) en su estudio [1].

$$N_2O_{Direct} = N \left[ \frac{kg N_2O}{m^3 purín} \right] = (F_{SN} + F_{ON}) \left[ \frac{kg N_{input}}{d} \right] \cdot EF_1 \left[ \frac{kg N_2O-N}{kg N_{input}} \right] \cdot \frac{44}{28} \left[ \frac{kg N_2O}{kg N_2O-N} \right] \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{d}{m^3 purín} \right] \quad Ec. 9$$

En esta, F<sub>SN</sub> es la cantidad diaria de nitrógeno en fertilizante sintético aplicado al suelo; F<sub>ON</sub> es la cantidad nitrógeno en purín, compost u otro compuesto orgánico aplicado al suelo; EF<sub>1</sub> es el factor de emisión para emisiones de N<sub>2</sub>O en los aportes de N; y  $\frac{44}{28}$  es el factor de conversión de kg N<sub>2</sub>O-N a kg N<sub>2</sub>O gaseoso.

**Consideraciones en el cálculo:** ( $F_{SN} + F_{ON}$ ) se saca del balance de materia, donde hay 39.33 kgN·d<sup>-1</sup>; EF<sub>1</sub> en aplicaciones de nitrógeno procedente del efluente de biomasa es 0.01 [19]. Por último, se divide entre la cantidad de purín que se trata para obtener la emisión para UF. El resultado es de 0.003 kg N<sub>2</sub>O ·m<sup>-3</sup> de purín crudo.

### Emisiones indirectas de N<sub>2</sub>O

Las emisiones indirectas procedentes de nitrógeno volatilizado (en forma de NH<sub>3</sub> y NO<sub>x</sub>) de los suelos se estimaron basándose en el IPCC (2006) (Ecuación 10), tal como hizo *Corbala et al. (2018)* [1].

$$N_2O_{Indirect} \left[ \frac{kg N_2O}{m^3 purin} \right] = F_{ON} \left[ \frac{kg N_{input}}{d} \right] \cdot Frac_{GasM} \left[ \frac{kg NH_3-N+NO_x-N_{Volatilized}}{kg N_{input}} \right] \cdot EF_4 \left[ \frac{kg N_2O-N}{kg NH_3-N+NO_x-N_{Volatilized}} \right] \cdot \frac{44}{28} \left[ \frac{kg N_2O}{kg N_2O-N} \right] \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{d}{m^3 purin} \right] \quad Ec. 10$$

F<sub>ON</sub> es la cantidad nitrógeno en purín, compost u otro compuesto orgánico aplicado al suelo; Frac<sub>GasM</sub> es la fracción de nitrógeno orgánico aplicado que se volatiliza como NH<sub>3</sub> o NO<sub>x</sub>; Frac<sub>GasF</sub> es la fracción de nitrógeno sintético aplicado que se volatiliza como NH<sub>3</sub> o NO<sub>x</sub>; EF<sub>4</sub> es el factor de emisión de emisiones de N<sub>2</sub>O de deposiciones atmosféricas de nitrógeno en suelos y superficies acuosas; y  $\frac{44}{28}$  es el factor de conversión de kg de N<sub>2</sub>O-N a kg de N<sub>2</sub>O gaseoso. Por último, se divide entre la corriente de purín crudo inicial para obtener el resultado respecto a la UF.

**Consideraciones en el cálculo:** F<sub>on</sub> se saca del balance de materia, donde hay 39.33 kgN·d<sup>-1</sup>; Frac<sub>GasM</sub> para los fertilizantes orgánicos de nitrógeno y del estiércol y la orina depositados por animales de pastoreo, es de 0.2; y el EF<sub>4</sub> de compuestos de nitrógeno tanto sintéticos como orgánicos es de 0.01 [19].

El resultado final es de 0.0006 kg N<sub>2</sub>O ·m<sup>-3</sup> de purín crudo.

### Emisiones de NH<sub>3</sub>

La emisión de NH<sub>3</sub> se determina usando la base de la metodología Tier 2 para el cálculo de emisiones de NH<sub>3</sub>-N procedentes de la gestión del estiércol, de acuerdo con la tabla 3-8 del EMAP-EEA (2019) y tal como aplicó *Corbala et al. (2018)*. El NT se obtiene del balance, con una emisión de 39.33 kg NT·m<sup>-3</sup> de purín. El FE (Factor de Emisión) para purín de cerdo es de 0.4 kg NH<sub>3</sub>-N·kg TAN<sup>-1</sup>. La proporción de TAN para este tipo de cerdos es del 65% del N total. Multiplicando por  $\frac{17}{14}$  se pasan los kg de NH<sub>3</sub>-N a kg de NH<sub>3</sub>. La cantidad para la UF se calcula dividiendo el resultado entre el purín tratado. (Ecuación 11). El resultado final es de 0.05 kg NH<sub>3</sub>·m<sup>-3</sup> de purín crudo.

$$NH_3 \left[ \frac{kg NH_3}{m^3 purin} \right] = NT \left[ \frac{kg NT}{d} \right] \cdot 65\% \left[ \frac{kg TAN}{kg NT} \right] \cdot FE \left[ \frac{kg NH_3-N}{kg TAN} \right] \cdot \frac{17}{14} \left[ \frac{kg NH_3}{kg NH_3-N} \right] \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{d}{m^3 purin} \right] \quad Ec. 11$$

### Emisiones de NO<sub>x</sub>

La emisión de NO<sub>x</sub> se aplica el método usado por *Corbala et al. (2018)*, en el que multiplica el N<sub>2</sub>O emitido total (directo e indirecto) por 0.21 [1]. El resultado da una emisión de 0.0008 kg NO<sub>x</sub> ·m<sup>-3</sup> de purín crudo.

### Lixiviación de nitratos

Este tipo de contaminación al suelo por la aplicación de la biomasa se calcula usando el modelo de *Smaling (2013)* y aplicado por *Corbala et al. (2018)* (Ecuación 12).

$$NO_3 - N_{leach} \left[ \frac{kg NO_3 - N}{m^3 \text{ purín crudo}} \right] = \frac{N_{applied} \left[ \frac{kg N}{d} \right] \cdot (0.021 \cdot P_{prec+irr} \left[ \frac{mm}{año} \right] - 3.90) \cdot \frac{1}{100}}{V_{Purín \text{ crudo}} \left[ \frac{m^3}{d} \right]} \quad \text{Ec. 12}$$

El  $N_{applied}$  es el contenido de nitrógeno en el efluente biológico aplicado, en este caso es de 39.33 kg N·d<sup>-1</sup>;  $P_{prec+irr}$  es la precipitación anual estimada, que es de 511 mm·año<sup>-1</sup> en Cuéllar, el riego se asume que es 0 para este estudio. Esta ecuación se usa para suelos con un contenido de arcilla por debajo del 35%. El suelo en la zona de Cuéllar tiene entre un 16% y un 20% de arcilla. [22].  $V_{Raw \text{ Manure}}$  es el flujo de purín inicial, en este caso 206.98 m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>. El resultado final es de 0.013 kg N-NO<sub>3</sub>·m<sup>-3</sup> de purín crudo.

### Lixiviación de fósforos

Este cálculo se realiza utilizando el modelo de SALCA-P, aplicado por *Corbala et al. (2018)* (Ecuación 13).

$$P_{leach} \left[ \frac{kg P}{m^3 \text{ purín crudo}} \right] = \frac{P_{applied} \left[ \frac{kg P_2O_5}{d} \right] \cdot P_{lost} \left[ \frac{kg P}{kg P_2O_5} \right]}{V_{Purín \text{ crudo}} \left[ \frac{m^3}{d} \right]} \quad \text{Ec. 13}$$

Donde  $P_{applied}$  es el contenido de fósforo efectivo aplicado en el bioestimulante, en este caso 4.97 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·d<sup>-1</sup>; y  $P_{Lost}$  es la cantidad media de fósforo perdido por escorrentías superficiales y/o lixiviación a aguas subterráneas; la pérdida es de 0.00184  $\frac{kg P}{kg P_2O_5}$  para el efluente biológico.  $V_{Purín \text{ crudo}}$  es el flujo de purín inicial, en este caso 206.98 m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>. El resultado final es de 0.00004 kg P·m<sup>-3</sup> de purín crudo.

### Metales pesados

Las concentraciones de metales pesados en el purín se han tomado de ASAE (American Society of Agricultural Engineers), se pueden ver en la tabla 6.

Tabla 6. Concentración de metales pesados en el purín crudo (Fuente: Elaboración propia)

Metal	Concentración (mg/L)
Cu	14.28
Mn	22.62
Zn	59.52
Fe	190.48
K	3452.38
Na	797.62
Pb	0
Cd	0.32

Para calcular la cantidad de concentración que quedará en el efluente se ha seguido el método planteado por *Doka (2003)* [23]. Los datos de coeficientes de transferencia (Tabla 7) de estos son tomados de este mismo estudio.

Tabla 7. Coeficientes de reparto para metales en el tratamiento del purín (Fuente: elaboración propia)

	Coef. reparto metales	
	al fango (%)	metales al efluente (%)
	En materia particulada	Disuelto en el agua
<b>Cu</b>	75%	25%
<b>Mn</b>	50%	50%
<b>Zn</b>	70%	30%
<b>Fe</b>	50%	50%
<b>K</b>	0%	100%
<b>Na</b>	0%	100%
<b>Pb</b>	90%	10%
<b>Cd</b>	50%	50%

Estos repartos determinan qué cantidad de los metales iniciales va a la biomasa y qué cantidad al efluente. A partir de estos coeficientes, y conociendo las concentraciones iniciales se calcula la concentración de estos metales pesados en la biomasa resultante que se pasan posteriormente a la UF. Los resultados de emisión por UF se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 8. Emisión de metales pesados en la aplicación del bioestimulante en el suelo (Fuente: Elaboración propia)

Metal	kg/m <sup>3</sup> purín
<b>Cu</b>	0.004
<b>Mn</b>	0.011
<b>Zn</b>	0.018
<b>Fe</b>	0.095
<b>K</b>	3.452
<b>Na</b>	0.798
<b>Pb</b>	0.000
<b>Cd</b>	0.0002

### 2.3.2.5. Fase de construcción

#### Infraestructura

Para la infraestructura se asume una superficie de 300000 m<sup>2</sup> (Ilustración 9), para que entre el reactor Thin Layer que, al ser de poca profundidad, tiene una superficie considerable (248373 m<sup>2</sup>). Además, cuenta con capacidad para los tanques y maquinaria de los demás procesos de tratamiento.

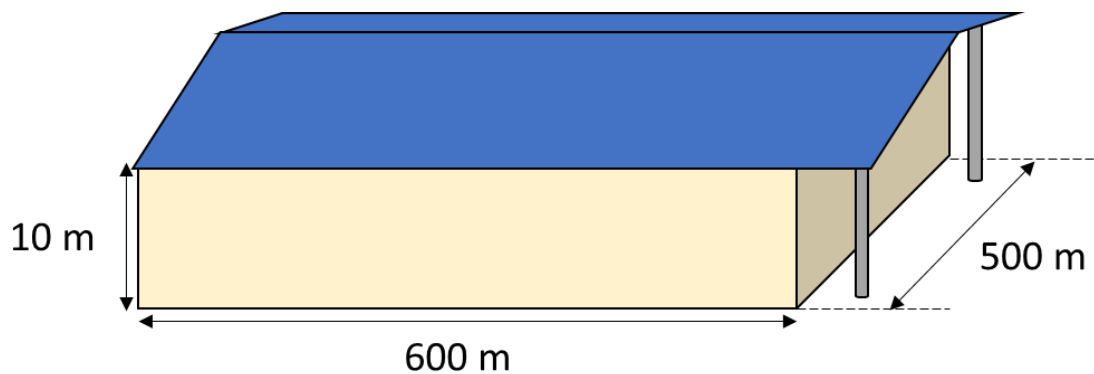


Ilustración 9. Plano infraestructura planta de tratamiento (Fuente: Elaboración propia)

Se calcula una necesidad de 150000 m<sup>3</sup> de hormigón para la construcción de la planta. (Tabla 9).

Tabla 9. Medidas diseño planta de tratamiento (Fuente: elaboración propia)

	Diseño	Valores	Unidad
	Altura	10	m
Estación de tratamiento	Área base	300000	m <sup>2</sup>
	Grosor paredes	0.5	m
	Volumen de hormigón	150000	m <sup>3</sup>

### Reactor biológico Thin Layer

Conocido el caudal de entrada (206.98 m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>) y asumiendo un TRH de 60 días y una profundidad del reactor de 0.05 m, se puede calcular que la superficie de este será de 248373 m<sup>2</sup>.

Para la fabricación de los canales de este tipo de reactores se utilizan materiales resistentes como acero, cristal, hormigón o fibra de vidrio. Para este caso se ha asumido que se utiliza conjuntamente acero y fibra de vidrio.

Tabla 10. Medidas diseño reactor biológico Thin Layer (Fuente: Elaboración propia)

	Diseño	Valores	Unidad
Reactor biológico Thin Layer	Superficie	248373	m <sup>2</sup>
	Altura paredes	0.1	m
	Grosor paredes	0.05	m
	Volumen acero	4000	m <sup>3</sup>
	Volumen fibra de vidrio	2200	m <sup>3</sup>

### Tanque de mezcla

El tanque de almacenamiento (Ilustración 10) se asume como una construcción de hormigón, con capacidad para 500 m<sup>3</sup>, la superficie de 100 m<sup>2</sup> y el grosor de las paredes de 0.5 m, con estos datos se estima el volumen de hormigón necesario (Tabla 11).

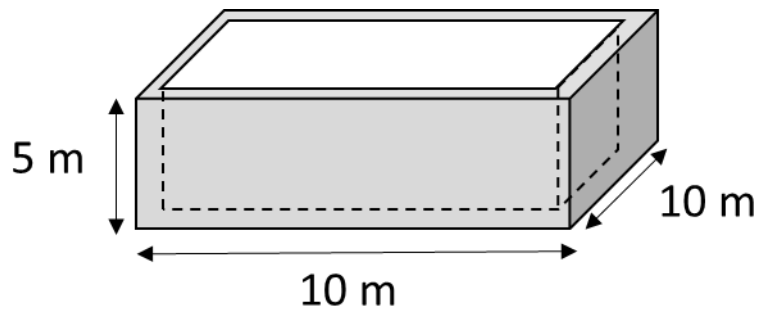


Ilustración 10. Plano tanque de almacenamiento (Fuente: Elaboración propia)

Tabla 11. Medidas diseño tanque de almacenamiento (Fuente: Elaboración propia)

	Diseño	Valores	Unidad
Tanque de almacenamiento del purín crudo con mezcla de agua fresca	Volumen	500	m <sup>3</sup>
	Altura	5	m
	Base	100	m <sup>2</sup>
	Grosor paredes	0.5	m
	Volumen de hormigón	165.5	m <sup>3</sup>

A partir de estas suposiciones en la infraestructura se estiman trabajos para la construcción de excavación y transporte.

### Tuberías

Las tuberías empleadas serán de PVC, que es el material más utilizado para el transporte de aguas residuales. Según Monge, Miguel (2019) [24], las tuberías para mover este tipo de aguas, no deberían bajar de 200 mm de diámetro interno. Para calcular la cantidad necesaria se han estimado las medidas representadas en la Ilustración 11.

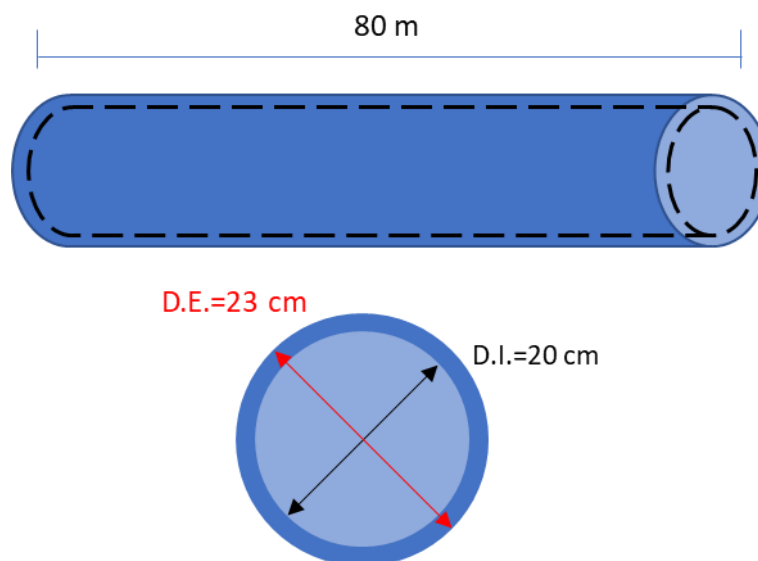


Ilustración 11. Medidas de tuberías para el transporte del purín entre los distintos procesos del tratamiento (Fuente: Elaboración propia)

A partir de estas medidas, se calcula la cantidad de material de fabricación necesario (Tabla 12).

Tabla 12. Medidas del diseño de las tuberías (Fuente: Elaboración propia)

	Diseño	Valores	Unidad
Tuberías	Longitud	80	m
	Diámetro interior	0.2	m
	Diámetro exterior	0.23	m
	Volumen de PVC	3.26	m <sup>3</sup>

### 2.3.3. Cargas evitadas

#### 2.3.3.1. Fertilizante mixto de N y fertilizante de P

La aplicación del bioestimulante se usa como reemplazo de un fertilizante químico convencional. Para calcularlos, se elige un mix de fertilizantes convencionales de N, que serán Urea (46% N), Nitrato Amónico Cálcico (NAC) (27% N) y Sulfato de amonio (21% N) y uno de P, Superfosfato triple (46% P).

Para calcular las proporciones de cada fertilizante en el mix de N se basó en las estadísticas de consumo de fertilizantes de la Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes [25] para diferentes tipos de fertilizantes químicos en España (para mezclas de fertilizantes simples de N y P) en el año 2020. Para calcular el contenido medio de N y P en el mix de fertilizante se utilizaron los porcentajes de consumo para cada fertilizante (Tabla 13).

Tabla 13. Cuotas de consumo de fertilizantes convencionales en España (Fuente: IFA, 2021)

Componente		Consumo		
<b>Mezcla fertilizante nitrogenado (N,P)</b>	<b>%N</b>	<b>Kton N/año</b>	<b>Kton producto/año</b>	<b>% Producto</b>
Urea (46/0/0)	46%	290.8	632.2	51%
Nitrato de amonio de calcio (27/0/0)	27%	218.4	808.9	38%
Sulfato de amonio (21/0/0)	21%	62.6	298.1	11%
<b>Mezcla fertilizante fósforo (P)</b>	<b>%P</b>	<b>Kton P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/año</b>	<b>Kton producto/año</b>	<b>% Producto</b>
Superfosfato triple (0/46/0)	46%	8.5	18.5	100%

Según los datos registrados, se usan 632.2 kton·año<sup>-1</sup> de Urea, 808.89 kton·año<sup>-1</sup> de Nitrato Amónico Cálcico y 298.1 kton·año<sup>-1</sup> de Sulfato de amonio. Por tanto, se tiene un producto fertilizante mixto con una concentración en Urea, NAC y Sulfato de amonio de 51%, 38% y 11%, respectivamente.

La cantidad de Nitrógeno aplicado, que se ha sustituido por el bioestimulante, es de 0.19 kgN·m<sup>-3</sup> de purín crudo. Esta será la cantidad de N también aplicada con el fertilizante convencional. Aplicando la proporción de cada uno, se tiene un mix de fertilizante de N de 0.21 kg Urea·m<sup>-3</sup> de purín crudo, 0.27 kg CAN·m<sup>-3</sup> de purín crudo y 0.1 kg Sulfato de Amonio·m<sup>-3</sup> de purín crudo.



Para el fertilizante de P, se tiene una cantidad aplicada de  $0.01 \text{ kg P}\cdot\text{m}^{-3}$  de purín crudo. El Superfosfato triple se cuantifica en términos de  $\text{P}_2\text{O}_5$ . La relación  $\text{P}_2\text{O}_5/\text{P}$ , es de 142/62, por lo que la cantidad de Superfosfato triple es de  $0.024 \text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{m}^{-3}$  de purín crudo.

### 2.3.3.2. Emisiones por la aplicación en el suelo

#### Emisiones directas de $\text{N}_2\text{O}$

Para el cálculo de las emisiones directas de  $\text{N}_2\text{O}$  se utiliza el método del IPCC (2006) (Ecuación 9) [19], tal como aplica *Corbala et al. (2018)* en su estudio [1].

$$N_2O_{Direct} - N \left[ \frac{\text{kg } N_2O}{\text{m}^3 \text{ purín}} \right] = (F_{SN} + F_{ON}) \left[ \frac{\text{kg } N_{input}}{d} \right] \cdot EF_1 \left[ \frac{\text{kg } N_2O-N}{\text{kg } N_{input}} \right] \cdot \frac{44}{28} \left[ \frac{\text{kg } N_2O}{\text{kg } N_2O-N} \right] \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{d}{\text{m}^3 \text{ purín}} \right] \quad \text{Ec. 9}$$

**Consideraciones en el cálculo:**  $(F_{SN} + F_{ON})$  se saca de los kg de N aplicados en el fertilizante, que será de  $39.33 \text{ kg N}\cdot\text{d}^{-1}$ ;  $EF_1$  en aplicaciones de nitrógeno procedentes de fertilizantes sintéticos es 0.01 [19]. Los kg de  $\text{N}_2\text{O}-\text{N}$  se pasan a kg de  $\text{N}_2\text{O}$  multiplicando por  $\frac{44}{28}$ . Por último, se divide entre la cantidad de purín que se trata para obtener la emisión para UF. El resultado es de  $0.003 \text{ kg } N_2O \cdot \text{m}^{-3}$  de purín crudo.

#### Emisiones indirectas de $\text{N}_2\text{O}$

Las emisiones indirectas procedentes de nitrógeno volatilizado (en forma de  $\text{NH}_3$  y  $\text{NO}_x$ ) de los suelos se estimaron basándose en el IPCC (2006) (Ecuación 10), tal como hizo *Corbala et al. (2018)* [1].

$$N_2O_{Indirect} \left[ \frac{\text{kg } N_2O}{\text{m}^3 \text{ purín}} \right] = F_{ON} \left[ \frac{\text{kg } N_{input}}{d} \right] \cdot Frac_{GasM} \left[ \frac{\text{kg } NH_3-N+NO_x-N_{Volatilized}}{\text{kg } N_{input}} \right] \cdot EF_4 \left[ \frac{\text{kg } N_2O-N}{\text{kg } NH_3-N+NO_x-N_{Volatilized}} \right] \cdot \frac{44}{28} \left[ \frac{\text{kg } N_2O}{\text{kg } N_2O-N} \right] \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{d}{\text{m}^3 \text{ purín}} \right] \quad \text{Ec. 10}$$

**Consideraciones en el cálculo:**  $F_{ON}$  se obtiene del balance de materia, donde hay  $39.33 \text{ kg N}\cdot\text{d}^{-1}$ ;  $Frac_{GasM}$  para los fertilizantes sintéticos de N es de 0.2; y el  $EF_4$  de compuestos de nitrógeno tanto sintéticos como orgánicos es de 0.01 [19]. El resultado final es de  $0.0006 \text{ kg } N_2O \cdot \text{m}^{-3}$  de purín crudo.

#### Emisiones de $\text{NH}_3$

La emisión de  $\text{NH}_3$  se determina usando la base de la metodología Tier 2 para el cálculo de emisiones de  $\text{NH}_3-\text{N}$  procedentes de la gestión del estiércol, de acuerdo con la tabla 3-8 del EMAP-EEA (2019) y tal como aplicó *Corbala et al. (2018)*. El FE (Factor de Emisión) para fertilizantes sintéticos es de  $0.02 \text{ kg } NH_3-\text{N}\cdot\text{kg } NT$ . Multiplicando por  $\frac{17}{14}$  se pasan los kg de  $\text{NH}_3-\text{N}$  a kg de  $\text{NH}_3$ . La cantidad para la UF se calcula dividiendo el resultado entre el purín tratado. (Ecuación 14). El resultado final es de  $0.005 \text{ kg } NH_3\cdot\text{m}^{-3}$  de purín crudo.

$$NH_3 \left[ \frac{\text{kg } NH_3}{\text{m}^3 \text{ purín}} \right] = NT \left[ \frac{\text{kg } NT}{d} \right] \cdot FE \left[ \frac{\text{kg } NH_3-N}{\text{kg } NT} \right] \cdot \frac{17}{14} \left[ \frac{\text{kg } NH_3}{\text{kg } NH_3-N} \right] \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{d}{\text{m}^3 \text{ purín}} \right] \quad \text{Ec. 14}$$

### Emisiones de NO<sub>x</sub>

La emisión de NO<sub>x</sub> se aplica el método usado por *Corbala et al. (2018)*, en el que multiplica el N<sub>2</sub>O emitido total (directo e indirecto) por 0.21 [1]. El resultado da una emisión de 0.0008 kg NO<sub>x</sub>·m<sup>-3</sup> de purín crudo.

### Lixiviación de nitratos

Este tipo de contaminación al suelo por la aplicación de fertilizante químico se calcula usando el modelo de *Smaling (2013)* y aplicado por *Corbala et al. (2018)* (Ecuación 12).

$$NO_3 - N_{leach} \left[ \frac{kg NO_3 - N}{m^3 \text{ purín crudo}} \right] = \frac{N_{applied} \left[ \frac{kg N}{d} \right] \cdot \left( 0.021 \cdot P_{prec+irr} \left[ \frac{mm}{año} \right] - 3.90 \right) \cdot \frac{1}{100}}{V_{purín \text{ crudo}} \left[ \frac{m^3}{d} \right]} \quad \text{Ec. 12}$$

El N<sub>applied</sub> es el contenido de nitrógeno del fertilizante sintético evitado, en este caso es de 39.33 kgN·d<sup>-1</sup>; P<sub>prec+irr</sub> es la precipitación anual estimada, que es de 511 mm·año<sup>-1</sup> en Cuéllar, el riego se asume que es 0 para este estudio. Esta ecuación se usa para suelos con un contenido de arcilla por debajo del 35%. El suelo en la zona de Cuéllar tiene entre un 16% y un 20% de arcilla. [22]. V<sub>Purín crudo</sub> es el flujo de purín inicial, en este caso 206.98 m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>. El resultado final es de 0.013 kg N·m<sup>-3</sup> de purín crudo.

### Lixiviación de fósforos

Este cálculo se realiza utilizando el modelo de SALCA-P, aplicado por *Corbala et al. (2018)* (Ecuación 13).

$$P_{leach} \left[ \frac{kg P}{m^3 \text{ purín crudo}} \right] = \frac{P_{applied} \left[ \frac{kg P_2O_5}{d} \right] \cdot P_{lost} \left[ \frac{kg P}{kg P_2O_5} \right]}{V_{purín \text{ crudo}} \left[ \frac{m^3}{d} \right]} \quad \text{Ec. 13}$$

Donde P<sub>applied</sub> es el contenido de fósforo aplicado en el fertilizante, en este caso 4.97 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·d<sup>-1</sup>; y P<sub>Lost</sub> es la cantidad media de fósforo perdido por escorrentías superficiales y/o lixiviación a aguas subterráneas; la pérdida es de 0.00048  $\frac{kg P}{kg P_2O_5}$  para fertilizantes. V<sub>Purín crudo</sub> es el flujo de purín inicial, en este caso 206.98 m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>. El resultado final es de 1.15·10<sup>-5</sup> kg P·m<sup>-3</sup> de purín crudo.

#### 2.3.3.3. Metales pesados

Ahora, se van a calcular las emisiones de metales pesados del fertilizante químico evitado. Las concentraciones iniciales se han obtenido de acuerdo al estudio de *Corbala et al. (2018)* [1] (Tabla 14).

Tabla 14. Concentraciones de metales pesados en los fertilizantes químicos (Fuente: Corbala et al (2018) [1])

Metales	mg/kg de producto	
	Mix fertilizante	Superfosfato triple
<b>Cu</b>	0.05	6.31
<b>Mn</b>	0.004	28.57
<b>Zn</b>	0.18	15.47
<b>Fe</b>	2.89	357.89
<b>K</b>	1.35	14.86
<b>Na</b>	0.03	21.13
<b>Pb</b>	0.12	231.52
<b>Cd</b>	0.002	0.02

Conocidas las concentraciones en los fertilizantes, se pasa a calcular la emisión respecto a la UF. Para ello, se aplica el método empleado por *Corbala et al.(2018)* [1] (Ecuación 15).

$$\text{cantidad de fertilizante} \left[ \frac{\text{kg Producto}}{\text{m}^3 \text{ purín crud}} \right] \cdot \text{metal pesado} \left[ \frac{\text{mg metal pesado}}{\text{kg producto}} \right] \cdot \frac{1}{10^6} \left[ \frac{\text{kg metal pesado}}{\text{mg metal pesado}} \right] = \text{Metal pesado}_{\text{fertilizante}} \left[ \frac{\text{kg metal pesado}}{\text{m}^3 \text{ purín}} \right] \quad \text{Ec. 15}$$

Donde *cantidad de fertilizante* es la cantidad de fertilizante aplicado por UF; *metal pesado* es la concentración del metal pesado por kg de producto. Se pasa de mg de metal pesado a kg de metal pesado dividiendo entre  $10^6$ .

Aplicando la Ecuación 15, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 15.

Tabla 15. Emisiones de metales pesados en los fertilizantes químicos para la UF (Fuente: Elaboración propia)

Metales	kg/m <sup>3</sup> de purín	
	Mix fertilizante	Superfosfato triple
<b>Cu</b>	3.16E-08	1.81E-07
<b>Mn</b>	2.57E-09	8.20E-07
<b>Zn</b>	1.01E-07	4.44E-07
<b>Fe</b>	1.67E-06	1.03E-05
<b>K</b>	7.82E-07	4.26E-07
<b>Na</b>	1.70E-08	6.06E-07
<b>Pb</b>	6.86E-08	6.64E-06
<b>Cd</b>	9.82E-10	5.74E-10

#### 2.3.3.4. Transporte de fertilizante a granjas

El método usado para el cálculo de los tkm producidos por el transporte de los fertilizantes químicos de N y P es el mismo que el aplicado anteriormente para calcular el transporte del purín o el bioestimulante.

En este caso, se ha buscado un proveedor de este tipo de fertilizantes en las mediaciones de Cuéllar. Se eligió la empresa Pablo Izquierdo S.L., situada en la Ctra. Cantalejo, 1, 40200 Cuéllar, Segovia. Una vez conocida la localización, utilizando Google Maps, se calcula la distancia en carretera desde este local a cada una de las granjas.

A cada granja se lleva el fertilizante que corresponde a la cantidad de bioestimulante formado con el purín que han generado cada una.

Teniendo 0.58 kg fertilizante N·m<sup>-3</sup> de purín y 0.024 kg fertilizante P·m<sup>-3</sup> de purín, se tienen 0.6 kg fertilizante total·m<sup>-3</sup> de purín. Multiplicándolos por los 206.98 m<sup>-3</sup> de purín·d<sup>-1</sup> se obtienen 125 kg de fertilizante aplicado al día, que al dividirlos por el bioestimulante obtenido se obtiene una relación de kg de fertilizante/m<sup>3</sup> de bioestimulante de 0.72. Con este dato se calcula el número de viajes que hace una furgoneta, con capacidad de 3000 kg, a las granjas y se da una ponderación de lo que afecta cada viaje al total (Tabla 16).

Tabla 16. Cálculo tkm del transporte del fertilizante químico a cada granja (Fuente: Elaboración propia)

	m <sup>3</sup> bioestimulante cada granja/año	distancia desde pablo izquierdo (km)	kg de fertilizante equivalente	nº viajes	ponderacion
Julia Cabrero Martín	4428.49	5.1	3208.94	2	0.09
Inversiones Ganaderas de Páramo	7114.39	5.3	5155.17	2	0.09
Diego Tejero Pascual	6365.51	7.9	4612.52	2	0.09
Sonlleva XXI S.L.	6918.17	7.2	5012.99	2	0.09
Torregutierrez	4993.76	8.4	3618.53	2	0.09
Los Albares	7632.85	8.4	5530.85	2	0.09
La Gabina, ESPJ	4536.51	7	3287.20	2	0.09
Sociedad Civil Pozuelo	4219.67	9.8	3057.62	2	0.09
Pinos Albos	6300.70	10.4	4565.56	2	0.09
Juan Antonio Nieto Montalvillo	4696.72	12.4	3403.30	2	0.09
El Cigüeñal	6048.68	19.4	4382.94	2	0.09
				22	

Los datos de distancia expresados en la tabla se multiplican por 2, ya que se tienen en cuenta los viajes de ida y vuelta del transporte. Los kg de fertilizante equivalente se multiplican por los m<sup>3</sup> de bioestimulante de cada granja al año, por la relación de 0.6 kg fertilizante total·m<sup>-3</sup> de purín y por las distancias, dando un resultado de 0.01 tkm·m<sup>-3</sup> de purín crudo.

## 2.4. Análisis de inventario (Escenario 0)

### 2.4.1. Emisiones

#### 2.4.1.1. Emisiones en el almacenamiento del purín

En este caso, el almacenamiento del purín se realiza en el mismo momento que en el escenario 1, ya que el purín todavía no ha sido tratado. Las emisiones, por tanto, no varían respecto a las calculadas en el escenario 1.

#### 2.4.1.2. Emisiones en la aplicación en el suelo

### Emisiones directas de N<sub>2</sub>O

Para el cálculo de las emisiones directas de N<sub>2</sub>O se utiliza el método del IPCC (2006) (Ecuación 9) [19], tal como aplica *Corbala et al. (2018)* en su estudio [1].

$$N_2O_{Direct} - N \left[ \frac{kg N_2O}{m^3 purin} \right] = (F_{SN} + F_{ON}) \left[ \frac{kg N_{input}}{d} \right] \cdot EF_1 \left[ \frac{kg N_2O-N}{kg N_{input}} \right] \cdot \frac{44}{28} \left[ \frac{kg N_2O}{kg N_2O-N} \right] \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{d}{m^3 purin} \right] \quad Ec. 9$$

**Consideraciones en el cálculo:** EF<sub>1</sub> en aplicaciones de nitrógeno procedente del purín crudo es 0.01 [19]; F<sub>SN</sub>+F<sub>ON</sub> se obtiene de la cantidad de N presente en el purín inicial (1059.72 kg N·d<sup>-1</sup>). Los kg de N<sub>2</sub>O-N resultantes se multiplican por  $\frac{44}{28}$  para pasarlos a kg de N<sub>2</sub>O. Por último, se divide entre la cantidad de purín tratado para obtener el resultado respecto a la UF, que será de 0.08 kg N<sub>2</sub>O·m<sup>-3</sup> de purín.

### Emisiones indirectas de N<sub>2</sub>O

Las emisiones indirectas procedentes de nitrógeno volatilizado (en forma de NH<sub>3</sub> y NO<sub>x</sub>) de los suelos se estimaron basándose en el IPCC (2006) (Ecuación 10), tal como hizo *Corbala et al. (2018)* [1].

$$N_2O_{Indirect} \left[ \frac{kg N_2O}{m^3 purin} \right] = F_{ON} \left[ \frac{kg N_{input}}{d} \right] \cdot Frac_{GasM} \left[ \frac{kg NH_3-N+NO_x-N_{Volatilized}}{kg N_{input}} \right] \cdot EF_4 \left[ \frac{kg N_2O-N}{kg NH_3-N+NO_x-N_{Volatilized}} \right] \cdot \frac{44}{28} \left[ \frac{kg N_2O}{kg N_2O-N} \right] \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{d}{m^3 purin} \right] \quad Ec. 10$$

**Consideraciones en el cálculo:** F<sub>ON</sub> se obtiene de la cantidad de N presente en el purín inicial (1059.72 kg N·d<sup>-1</sup>); Frac<sub>GasM</sub> para los fertilizantes orgánicos de nitrógeno y del estiércol y la orina depositados por animales de pastoreo, es de 0.2; y el EF<sub>4</sub> de compuestos de nitrógeno tanto sintéticos como orgánicos es de 0.01 [19]. Los kg de N<sub>2</sub>O-N resultantes se multiplican por  $\frac{44}{28}$  para pasarlos a kg de N<sub>2</sub>O. Para obtener la cantidad de N<sub>2</sub>O por UF se divide entre la corriente de purín inicial, dando un resultado de 0.016 kg N<sub>2</sub>O·m<sup>-3</sup> de purín.

### Emisiones de NH<sub>3</sub>

La emisión de NH<sub>3</sub> se determina usando la base de la metodología Tier 2 para el cálculo de emisiones de NH<sub>3</sub>-N procedentes de la gestión del estiércol, de acuerdo con la tabla 3-8 del EMAP-EEA (2019) y tal como aplicó *Corbala et al. (2018)* (Ecuación 11).

$$NH_3 \left[ \frac{kg NH_3}{m^3 purin} \right] = NT \left[ \frac{kg NT}{d} \right] \cdot 65\% \left[ \frac{kg TAN}{kg NT} \right] \cdot FE \left[ \frac{kg NH_3-N}{kg TAN} \right] \cdot \frac{17}{14} \left[ \frac{kg NH_3}{kg NH_3-N} \right] \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{d}{m^3 purin} \right] \quad Ec. 11$$

La cantidad de NT en el purín es de 1059.72 kg·d<sup>-1</sup> de NT; el FE (Factor de Emisión) para purín de cerdo es de 0.4 kg NH<sub>3</sub>-N·kg TAN<sup>-1</sup>. La proporción de TAN para este tipo de cerdos es del 65% del N total. Multiplicando por  $\frac{17}{14}$  se pasan los kg de NH<sub>3</sub>-N a kg de NH<sub>3</sub>. La cantidad para la UF se calcula dividiendo el resultado entre el purín tratado. Siendo el resultado final de 1.62 kg NH<sub>3</sub>·m<sup>-3</sup> de purín crudo.

### Emisiones de NO<sub>x</sub>

La emisión de NO<sub>x</sub> se aplica el método usado por *Corbala et al. (2018)*, en el que multiplica el N<sub>2</sub>O emitido total por 0.21. El resultado final es de 0.02 kg NO<sub>x</sub>·m<sup>-3</sup> de purín crudo.

### Lixiviación de nitratos

Este tipo de contaminación al suelo por la aplicación de la biomasa se calcula usando el modelo de *Smaling (2013)* y aplicado por *Corbala et al. (2018)*. (Ecuación 12).

$$NO_3 - N_{leach} \left[ \frac{kg NO_3-N}{m^3 purin\ crudo} \right] = \frac{N_{applied} \left[ \frac{kg N}{d} \right] \cdot (0.021 \cdot P_{prec+irr} \left[ \frac{mm}{año} \right] - 3.90)}{V_{Purin\ crudo} \left[ \frac{m^3}{d} \right]} \cdot \frac{1}{100} \quad Ec. 12$$

El N<sub>applied</sub> es el contenido de nitrógeno en el efluente biológico aplicado, en este caso es de 1059.72 kgN·d<sup>-1</sup>; P<sub>prec+irr</sub> es la precipitación anual estimada, que es de 511 mm·año<sup>-1</sup> en Cuéllar, el riego se asume que es 0 para este estudio. Esta ecuación se usa para suelos con un contenido de arcilla por debajo del 35%. El suelo en la zona de Cuéllar tiene entre

un 16% y un 20% de arcilla. [22].  $V_{\text{Purín crudo}}$  es el flujo de purín inicial, en este caso  $206.98 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ . El resultado final es de  $0.35 \text{ kg N-NO}_3 \cdot \text{m}^{-3}$  de purín crudo.

### Lixiviación de fósforos

Este cálculo se realiza utilizando el modelo de SALCA-P, aplicado por *Corbala et al. (2018)* (Ecuación 13).

$$P_{\text{leach}} \left[ \frac{\text{kg P}}{\text{m}^3 \text{ purín crudo}} \right] = \frac{P_{\text{applied}} \left[ \frac{\text{kg P}_2\text{O}_5}{\text{d}} \right] \cdot P_{\text{lost}} \left[ \frac{\text{kg P}}{\text{kg P}_2\text{O}_5} \right]}{V_{\text{Purín crudo}} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right]} \quad \text{Ec. 13}$$

Donde  $P_{\text{applied}}$  es el contenido de fósforo efectivo aplicado en el efluente biológico, en este caso  $36.02 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{d}^{-1}$ ; y  $P_{\text{Lost}}$  es la cantidad media de fósforo perdido por escorrentías superficiales y/o lixiviación a aguas subterráneas; la pérdida es de  $0.00184 \frac{\text{kg P}}{\text{kg P}_2\text{O}_5}$  para el efluente biológico.  $V_{\text{Purín crudo}}$  es el flujo de purín inicial, en este caso  $206.98 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ . El resultado final es de  $0.00032 \text{ kg P} \cdot \text{m}^{-3}$  de purín crudo.

### Metales pesados

Para el cálculo de metales pesados en la aplicación del purín crudo se ha utilizado la ecuación empleada por *Corbala et al. [1]* (Ecuación 16).

$$\rho_{\text{Purín crudo}} \left[ \frac{\text{kg Purín crudo}}{\text{m}^3 \text{ Purín crudo}} \right] \cdot DM \left[ \frac{\text{kg DM}}{\text{kg Purín crudo}} \right] \cdot Metal\ pesado \left[ \frac{\text{mg metal pesado}}{\text{kg DM}} \right] \cdot \frac{1}{10^6} \left[ \frac{\text{kg Metal pesado}}{\text{mg Metal pesado}} \right] = \quad \text{Ec. 16}$$

Donde  $\rho_{\text{Raw manure}}$  es la densidad del purín crudo, que es de  $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  de purín; DM es la fracción de purín seco en el total, en este caso de 0.8%; *Metal pesado* es la cantidad de metal pesado en el purín crudo seco, calculados a través del balance de materia (Tabla 17); y  $\frac{1}{10^6}$  es para pasar de los mg de metal pesado a kg de metal pesado. Los resultados finales se muestran en la Tabla 18.

Tabla 17. Concentraciones de metales pesados / kg de masa seca (Fuente: Elaboración propia)

Metal	Kg Heavy metal / kg DM
Cu	1700.68
Mn	2692.74
Zn	7086.17
Fe	22675.74
K	410997.73
Na	94954.65
Pb	0.00
Cd	38.27

Tabla 18. Metales pesados en la aplicación del purín (Fuente: Elaboración propia)

Metales pesados en la aplicación del purín	
Metal	kg/m <sup>3</sup>
Cu	0.01
Mn	0.02
Zn	0.06
Fe	0.19
K	3.45
Na	0.8
Pb	0
Cd	0.0003

## 2.4.2. Cargas evitadas

### 2.4.2.1. Fertilizante mixto de N y fertilizante de P

En este escenario, es la aplicación del purín la que se usa como reemplazo de un fertilizante químico convencional. Para calcular las cargas evitadas de fertilizante químico, se elige un mix de fertilizantes convencionales de N, que serán Urea (46% N), Nitrato Amónico Cálculo (NAC) (27% N) y Sulfato de amonio (21% N) y uno de P, Superfosfato triple (46% P), tal como hace *Corbala et al (2018)* en su estudio.

La composición del fertilizante químico usada será la misma que la calculada para el Escenario 1. Se tiene, finalmente, un mix de fertilizante de N compuesto en un 51% de Urea, un 38% de NAC y un 11% de Sulfato de amonio, con una concentración en N del 33%.

En este caso, el N aplicado con el purín no tiene una efectividad del 100%, como para el bioestimulante, sino que es del 60%. Por lo tanto, se obtiene que el resultado de aplicar los 1059.72 kg NT·d<sup>-1</sup>, entre la UF es de 3.07 kg N·m<sup>-3</sup> de purín crudo. Para calcular el mix equivalente de N que ha sustituido esta emisión, se aplican los porcentajes calculados. El resultado es un fertilizante formado por 3.4 kg Urea·m<sup>-3</sup> de purín crudo, 4.35 kg NAC·m<sup>-3</sup> de purín crudo y 1.6 kg Sulfato de Amonio·m<sup>-3</sup> de purín crudo.

Para el fertilizante de P aplicado en el purín se tiene una efectividad del 100%, por lo que se considera todo el P de la Corriente 1 por UF, el resultado es una cantidad aplicada de 0.076 kg P·m<sup>-3</sup> de purín crudo. El Superfosfato triple se expresa en términos de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y la relación P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/P, es de 142/62, por lo que la cantidad de Superfosfato triple es de 0.17 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·m<sup>-3</sup> de purín crudo.

### 2.4.2.2. Emisiones por la aplicación en el suelo

#### Emisiones directas de N<sub>2</sub>O

Para el cálculo de las emisiones directas de N<sub>2</sub>O se utiliza el método del IPCC (2006) (Ecuación 9) [19], tal como aplica *Corbala et al. (2018)* en su estudio [1].

$$N_2O_{Direct} = N \left[ \frac{kg N_2O}{m^3 purin} \right] =$$



$$(F_{SN} + F_{ON}) \left[ \frac{\text{kg } N_{input}}{d} \right] \cdot EF_1 \left[ \frac{\text{kg } N_2O-N}{\text{kg } N_{input}} \right] \cdot \frac{44}{28} \left[ \frac{\text{kg } N_2O}{\text{kg } N_2O-N} \right] \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{d}{\text{m}^3 \text{ purín}} \right] \quad \text{Ec. 9}$$

**Consideraciones en el cálculo:**  $EF_1$  en aplicaciones de nitrógeno procedente de fertilizantes es 0.01 [19];  $F_{SN}+F_{ON}$  se obtiene de la cantidad de N aplicado con el fertilizante ( $1059.72 \text{ kg}\cdot\text{d}^{-3}$  de N). Los kg de  $N_2O-N$  resultantes se multiplican por  $\frac{44}{28}$  para pasarlos a kg de  $N_2O$ . Por último, se divide entre la cantidad de purín tratado para obtener el resultado respecto a la UF, que será de  $0.08 \text{ kg } N_2O\cdot\text{m}^{-3}$  de purín crudo.

### Emisiones indirectas de $N_2O$

Las emisiones indirectas procedentes de nitrógeno volatilizado (en forma de  $NH_3$  y  $NO_x$ ) de los suelos se estimaron basándose en el IPCC (2006) (Ecuación 10), tal como hizo *Corbala et al. (2018)* [1].

$$N_2O_{Indirect} \left[ \frac{\text{kg } N_2O}{\text{m}^3 \text{ purín}} \right] = F_{ON} \left[ \frac{\text{kg } N_{input}}{d} \right] \cdot \text{Frac}_{GasM} \left[ \frac{\text{kg } NH_3-N+NO_x-N_{Volatilized}}{\text{kg } N_{input}} \right] \cdot EF_4 \left[ \frac{\text{kg } N_2O-N}{\text{kg } NH_3-N+NO_x-N_{Volatilized}} \right] \cdot \frac{44}{28} \left[ \frac{\text{kg } N_2O}{\text{kg } N_2O-N} \right] \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{d}{\text{m}^3 \text{ purín}} \right] \quad \text{Ec. 10}$$

**Consideraciones en el cálculo:**  $F_{ON}$  se obtiene de la cantidad de N presente en el fertilizante aplicado ( $1059.72 \text{ kg}\cdot\text{d}^{-3}$  de N);  $\text{Frac}_{GasM}$  para los fertilizantes sintéticos es de 0.2; y el  $EF_4$  de compuestos de nitrógeno tanto sintéticos como orgánicos es de 0.01 [19]. Los kg de  $N_2O-N$  resultantes se multiplican por  $\frac{44}{28}$  para pasarlos a kg de  $N_2O$ . Para obtener la cantidad de  $N_2O$  por UF se divide entre la corriente de purín inicial, dando un resultado de  $0.016 \text{ kg } N_2O\cdot\text{m}^{-3}$  de purín crudo.

### Emisiones de $NH_3$

La emisión de  $NH_3$  se determina usando la base de la metodología Tier 2 para el cálculo de emisiones de  $NH_3-N$  procedentes de la gestión del estiércol, de acuerdo con la tabla 3-8 del EMAP-EEA (2019) y tal como aplicó *Corbala et al. (2018)* (Ecuación 14).

$$NH_3 \left[ \frac{\text{kg } NH_3}{\text{m}^3 \text{ purín}} \right] = NT \left[ \frac{\text{kg } NT}{d} \right] \cdot FE \left[ \frac{\text{kg } NH_3-N}{\text{kg } NT} \right] \cdot \frac{17}{14} \left[ \frac{\text{kg } NH_3}{\text{kg } NH_3-N} \right] \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{d}{\text{m}^3 \text{ purín}} \right] \quad \text{Ec. 14}$$

La cantidad de NT en el purín es de  $635.83 \text{ kg}\cdot\text{d}^{-3}$  de N; el FE (Factor de Emisión) para fertilizantes sintéticos es de  $0.02 \text{ kg } NH_3-N\cdot\text{kg } TAN^{-1}$ . Multiplicando por  $\frac{17}{14}$  se pasan los kg de  $NH_3-N$  a kg de  $NH_3$ . La cantidad para la UF se calcula dividiendo el resultado entre el purín tratado. Siendo el resultado final de  $0.12 \text{ kg } NH_3\cdot\text{m}^{-3}$  de purín crudo.

### Emisiones de $NO_x$

La emisión de  $NO_x$  se aplica el método usado por *Corbala et al. (2018)*, en el que multiplica el  $N_2O$  emitido total por 0.21. El resultado final es de  $0.02 \text{ kg } NO_x\cdot\text{m}^{-3}$  de purín crudo.

### Lixiviación de nitratos

Este tipo de contaminación al suelo por la aplicación de fertilizante se calcula usando el modelo de *Smaling (2013)* y aplicado por *Corbala et al. (2018)*. (Ecuación 12).



$$NO_3 - N_{leach} \left[ \frac{kg NO_3 - N}{m^3 \text{ purín crudo}} \right] = \frac{N_{applied} \left[ \frac{kg N}{d} \right] \cdot (0.021 \cdot P_{prec+irr} \left[ \frac{mm}{año} \right] - 3.90) \cdot \frac{1}{100}}{V_{purín \text{ crudo}} \left[ \frac{m^3}{d} \right]} \quad \text{Ec. 12}$$

El  $N_{applied}$  es el contenido de nitrógeno en el fertilizante aplicado, en este caso es de  $1059.72 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-3}$  de N;  $P_{prec+irr}$  es la precipitación anual estimada, que es de  $511 \text{ mm} \cdot \text{año}^{-1}$  en Cuéllar, el riego se asume que es 0 para este estudio. Esta ecuación se usa para suelos con un contenido de arcilla por debajo del 35%. El suelo en la zona de Cuéllar tiene entre un 16% y un 20% de arcilla. [22].  $V_{Purín \text{ crudo}}$  es el flujo de purín inicial, en este caso  $206.98 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ . El resultado final es de  $0.35 \text{ kg N} \cdot \text{m}^{-3}$  de purín crudo.

### Lixiviación de fósforos

Este cálculo se realiza utilizando el modelo de SALCA-P, aplicado por *Corbala et al. (2018)* (Ecuación 13).

$$P_{leach} \left[ \frac{kg P}{m^3 \text{ purín crudo}} \right] = \frac{P_{applied} \left[ \frac{kg P_2O_5}{d} \right] \cdot P_{lost} \left[ \frac{kg P}{kg P_2O_5} \right]}{V_{purín \text{ crudo}} \left[ \frac{m^3}{d} \right]} \quad \text{Ec. 13}$$

Donde  $P_{applied}$  es el contenido de fósforo efectivo aplicado en el fertilizante de P, en este caso  $34.2 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{d}^{-1}$ ; y  $P_{Lost}$  es la cantidad media de fósforo perdido por escorrentías superficiales y/o lixiviación a aguas subterráneas; la pérdida es de  $0.00048 \frac{kg P}{kg P_2O_5}$  para el fertilizante de P.  $V_{Purín \text{ crudo}}$  es el flujo de purín inicial, en este caso  $206.98 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ . El resultado final es de  $0.00008 \text{ kg P} \cdot \text{m}^{-3}$  de purín crudo.

#### 2.4.2.3. Metales pesados

Luego, se van a calcular las emisiones de metales pesados del fertilizante químico evitado. Las concentraciones iniciales coinciden con las se han obtenido de acuerdo al estudio de *Corbala et al. (2018)* [1] (Tabla 13).

Conocidas las concentraciones en los fertilizantes, se pasa a calcular la emisión respecto a la UF. Para ello, se aplica el método empleado por *Corbala et al. (2018)* [1] (Ecuación 15).

$$\text{cantidad de fertilizante} \left[ \frac{kg \text{ Producto}}{m^3 \text{ purín crud.}} \right] \cdot \text{metal pesado} \left[ \frac{mg \text{ metal pesado}}{kg \text{ producto}} \right] \cdot \frac{1}{10^6} \left[ \frac{kg \text{ metal pesado}}{mg \text{ metal pesado}} \right] = \text{Metal pesado}_{fertilizante} \left[ \frac{kg \text{ metal pesado}}{m^3 \text{ purín}} \right] \quad \text{Ec.15}$$

Donde *Cantidad de fertilizante* es la cantidad de fertilizante aplicado por UF; *metal pesado* es la concentración del metal pesado por kg de producto. Se pasa de mg de metal pesado a kg de metal pesado dividiendo entre  $10^6$ .

Aplicando la Ecuación 15, se obtienen los siguientes resultados, mostrados en la Tabla 19.

Tabla 19. Emisiones de metales pesados en los fertilizantes químicos para la UF (Fuente: Elaboración propia)

Metales	kg/m <sup>3</sup> de purín	
	Mix fertilizante	Superfosfato triple
<b>Cu</b>	5.10E-07	1.10E-06
<b>Mn</b>	4.16E-08	4.97E-06
<b>Zn</b>	1.64E-06	2.69E-06
<b>Fe</b>	2.70E-05	6.23E-05
<b>K</b>	1.26E-05	2.59E-06
<b>Na</b>	2.74E-07	3.68E-06
<b>Pb</b>	1.11E-06	4.03E-05
<b>Cd</b>	1.59E-08	3.48E-09

#### 2.4.2.4. Transporte de fertilizante a las granjas

El proceso es el explicado para los transportes anteriores. En este caso, sumando los 9.34 kg fertilizante N· m<sup>-3</sup> de purín crudo y los 0.17 kg fertilizante P· m<sup>-3</sup> de purín crudo, se tiene una cantidad total, entre fertilizante de N y fertilizante de P de 9.52 kg de fertilizante·m<sup>-3</sup> de purín crudo. Conociendo esta relación, se calculan los kg de fertilizante equivalente que se enviarán a cada granja y, con esto, el n° de viajes que tendrán que hacer para llevarlo (Tabla 20). Luego, se realizan las ponderaciones de lo que influye cada viaje al total.

Tabla 20. Cálculo tkm de transporte de fertilizante a las granjas (Fuente: Elaboración propia)

	Purín (m <sup>3</sup> /año)	distancia desde pablo izquierdo (km)	kg de fertilizante equivalente	n° viajes	ponderacion
Julia Cabrero Martín	5289.00	5.1	50339.14	17	0.07
Inversiones Ganaderas de Páramo	8496.80	5.3	80870.03	27	0.11
Diego Tejero Pascual	7602.40	7.9	72357.40	25	0.10
Sonlleva XXI S.L.	8262.45	7.2	78639.56	27	0.11
Torregutierrez	5964.10	8.4	56764.54	19	0.08
Los Albares	9116.00	8.4	86763.40	29	0.12
La Gabina, ESPJ	5418.00	7	51566.92	18	0.07
Sociedad Civil Pozuelo	5039.60	9.8	47965.42	16	0.07
Pinos Albos	7525.00	10.4	71620.73	24	0.10
Juan Antonio Nieto Montalvillo	5609.35	12.4	53388.14	18	0.07
El Cigüeñal	7224.00	19.4	68755.90	23	0.09
				243	

Una vez que se tienen las ponderaciones, se multiplican por la distancia a cada granja, contando ida y vuelta, y por las toneladas de fertilizante que se llevan. El resultado es una emisión de 0.2 tkm·m<sup>-3</sup>.

## 2.5. Resumen de resultados

En la Tabla 21 se presentan a modo de resumen los resultados de todos los cálculos hechos para los dos escenarios, incluyendo las cargas evitadas por el uso de fertilizante convencional de N y P. Todos los resultados se han calculado para la UF de 1 m<sup>3</sup> de purín crudo tratado.



Tabla 21. Resumen resultados del inventario del ACV para los escenarios 0 y 1

#	Artículo	Unidad	Cantidad	
			Escenario 1 (Tratamiento)	Escenario 0 (No Tratamiento)
<b>1. Entradas para la construcción de los Tanques principales</b>				
<i>Materiales/Montaje</i>				
	Hormigón preparado	m <sup>3</sup>	0.08	-
	Acero cromado 18%Cr, 8%Ni	kg	1.66	-
	PA 6 30% Fibra de vidrio	kg	3.03	-
	Asfalto	kg	0.005	-
	PVC	kg	2.24E-06	-
	Acero inoxidable	kg	0.773	-
<i>Procesos</i>				
	Excavación hidráulica	m <sup>3</sup>	0.00035	-
<b>2. Almacenamiento inicial del purín</b>				
<i>Emisiones a la atmósfera</i>				
	CH <sub>4</sub> (Metano)	kg	4.25	4.25
	Emisiones Directas de N <sub>2</sub> O	kg	0.01	0.01
	Emisiones Indirectas de N <sub>2</sub> O	kg	0.00003	0.00003
	NH <sub>3</sub> (Amonio)	kg	0.31	0.31
	NOx	kg	0.0002	0.0002
<b>3. Tratamiento en la planta</b>				
<i>Purín crudo</i>				
	Transporte del purín a la planta de tratamiento	tkm	16.98	-
<i>Consumo eléctrico</i>				
	Pretratamiento	kWh	0.05	-
	Bombeo del purín al mezclador	kWh	0.047	-
	Bombeo agua fresca al mezclador	kWh	0.37	-
	Bombeo recirculación	kWh	0.30	-
	Bomeo a hidrólisis	kWh	0.0166	-
	Mezcla en el almacenamiento	kWh	0.26	-
	1ª Bomba centrífuga	kWh	5.43	-
	2ª Bomba centrífuga	kWh	0.17	-
	Homogeneizador a alta presión	kWh	18.34	-
	Hidrólisis enzimática	kWh	3.56	-
<i>Emisiones a la atmósfera</i>				
	CO <sub>2</sub> (Dióxido de Carbono)	kg	-19.45	-
	NH <sub>3</sub> (Amonio)	kg	0.124	-

<b>4. Aplicación del bioestimulante en el suelo</b>			
<i>Bioestimulante</i>			
Transporte de bioestimulante a granjas	tkm	14.22	-
<i>Emisiones a la atmósfera</i>			
Emisiones directas de N <sub>2</sub> O	kg	0.003	-
Emisiones Indirectas de N <sub>2</sub> O	kg	0.0006	-
NH <sub>3</sub> (Amonio)	kg	0.05	-
NOx	kg	0.0008	-
<i>Emisiones al suelo</i>			
Lixiviación de nitratos	kg	0.01	-
Lixiviación de fósforos	kg	0.00004	-
Cu	kg	0.004	-
Mn	kg	0.011	-
Zn	kg	0.018	-
Fe	kg	0.095	-
K	kg	3.45	-
Na	kg	0.798	-
Pb	kg	0	-
Cd	kg	0.0002	-
<b>5. Aplicación del purín crudo en el suelo</b>			
<i>Emisiones a la atmósfera</i>			
Emisiones directas de N <sub>2</sub> O	kg	-	0.08
Emisiones Indirectas de N <sub>2</sub> O	kg	-	0.016
NH <sub>3</sub> (Amonio)	kg	-	1.62
NOx	kg	-	0.02
<i>Emisiones al suelo</i>			
Lixiviación de nitratos	kg	-	0.35
Lixiviación de fósforos	kg	-	0.00032
Cu	kg	-	0.01
Mn	kg	-	0.02
Zn	kg	-	0.06
Fe	kg	-	0.19
K	kg	-	3.45
Na	kg	-	0.8
Pb	kg	-	0
Cd	kg	-	0.0003
<b>6. Fertilizante evitado por la aplicación del bioestimulante</b>			
<i>Producción evitada</i>			
Producción evitada Urea	kg	0.21	-
Producción evitada de NAC	kg	0.27	-
Producción evitada de Sulfato de Amonio	kg	0.1	-
Producción evitada de fertilizante de P	kg	0.024	-
<i>Transporte</i>			
Transporte del biofertilizante a las granjas	tkm	0.01	-
<i>Emisiones a la atmósfera</i>			
Emisiones directas de N <sub>2</sub> O	kg	0.003	-
Emisiones Indirectas de N <sub>2</sub> O	kg	0.0006	-
NH <sub>3</sub> (Amonio)	kg	0.005	-
NOx	kg	0.0008	-
<i>Emisiones al suelo</i>			
Lixiviación de nitratos	kg	0.013	-
Lixiviación de fósforos	kg	1.15E-05	-
Cu	kg	1.83E-07	-
Mn	kg	6.89E-07	-
Zn	kg	4.73E-07	-
Fe	kg	1.03E-05	-
K	kg	1.14E-06	-
Na	kg	5.25E-07	-
Pb	kg	5.63E-06	-
Cd	kg	1.46E-09	-
<b>7. Fertilizante evitado por la aplicación del purín</b>			
<i>Producción evitada</i>			
Producción evitada Urea	kg	-	3.40
Producción evitada de NAC	kg	-	4.35
Producción evitada de Sulfato de Amonio	kg	-	1.60
Producción evitada de fertilizante de P	kg	-	0.17
<i>Transporte</i>			
Transporte del biofertilizante a las granjas	tkm	-	0.2
<i>Emisiones a la atmósfera</i>			
Emisiones directas de N <sub>2</sub> O	kg	-	0.08
Emisiones Indirectas de N <sub>2</sub> O	kg	-	0.016
NH <sub>3</sub> (Amonio)	kg	-	0.12
NOx	kg	-	0.02
<i>Emisiones al suelo</i>			
Lixiviación de nitratos	kg	-	0.35
Lixiviación de fósforos	kg	-	8E-05
Cu	kg	-	1.61E-06
Mn	kg	-	5.01E-06
Zn	kg	-	4.33E-06
Fe	kg	-	8.93E-05
K	kg	-	1.52E-05
Na	kg	-	3.95E-06
Pb	kg	-	4.14E-05
Cd	kg	-	1.94E-08

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

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

Una vez introducidos los datos en SimaPro se pasa a analizar utilizando el método 2002+ V2.13, esta versión ofrece varias formas de visualizar los resultados. En este apartado se verán los resultados de cada escenario por separado y luego se realizará una comparación para acabar con las conclusiones sacadas.

Se verá, en primer lugar, un análisis de la evaluación del daño para 15 categorías diferentes: Carcinógenos, no-carcinógenos, respiratorios inorgánicos, radiación ionizante, agotamiento de la capa de ozono, respiratorios orgánicos, ecotoxicidad acuática, ecotoxicidad terrestre, acidificación/eutrofización terrestre, ocupación del terreno, acidificación acuática, eutrofización acuática, calentamiento global, energías no renovables y extracción mineral. Esto permitirá hacer un análisis de los impactos, conociendo su efecto y su procedencia. Se hará un análisis más exhaustivo para el escenario de tratamiento (Escenario 1) que para el de no tratamiento. Después, se hará una comparación de ambos escenarios y se acabará con una conclusión final.

##### 3.1.1. Escenario 1

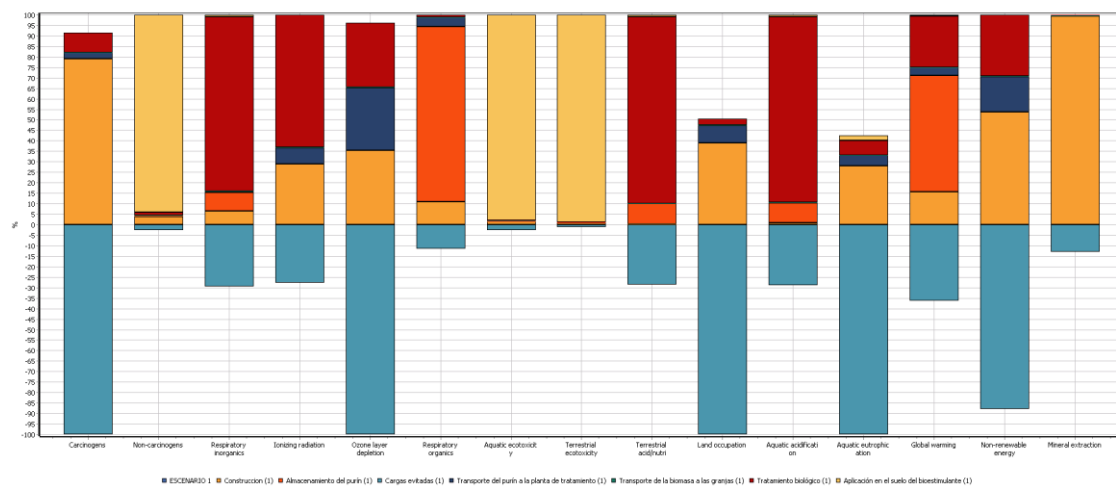


Ilustración 12. Caracterización del daño para el Escenario 1 (Fuente: Elaboración propia, SimaPro 8)

El primer análisis que ofrece SimaPro calcula la evaluación del daño de las distintas actividades que se han llevado a cabo en el Escenario 1. En él, se observa las 15 categorías que ofrece este método (Ilustración 12).

El tratamiento biológico presenta un gran impacto en respiratorios inorgánicos, radiación ionizante, acidificación/eutrofización terrestre y acidificación acuática; un poco menor en agotamiento de la capa de ozono, calentamiento global y energías no renovables y, casi inapreciable en eutrofización acuática, ocupación de terreno, carcinógenos y no carcinógenos. Este último impacto está provocado, casi al 100%, por la aplicación del bioestimulante en el suelo, junto con la toxicidad terrestre y acuática, que ocupa casi en su totalidad.

La aplicación del bioestimulante en el suelo presenta un alto impacto en no carcinógenos, ecotoxicidad acuática y ecotoxicidad terrestre, teniendo en los tres más del 90% del impacto total.

Otro proceso destacado en la gráfica es el de la construcción, con impacto sobre todo en carcinógenos, energías no renovables y extracción de minerales, en el que ocupa el 100% del impacto.

Por su parte, el almacenamiento del purín, centra gran parte de su impacto en respiratorios orgánicos y calentamiento global, también una pequeña parte en respiratorios inorgánicos, acidificación/eutrofización terrestre y acidificación acuática.

Los impactos provocados por el transporte del purín a la planta y, luego, el transporte del bioestimulante a las granjas, afecta sobre todo a agotamiento de la capa de ozono y a energías no renovables. También tiene un pequeño impacto en radiación ionizante, respiratorios orgánicos, ocupación del terreno, eutrofización acuática y calentamiento global.

Por último, las cargas evitadas recuperan los impactos en carcinógenos, agotamiento de la capa de ozono, ocupación del terreno y eutrofización acuática. Tienen impacto en todas las categorías pero sólo estas son recuperadas.

En la Ilustración 13 se observa el resultado de los impactos con Normalización, que analiza la contribución respectiva de cada impacto al daño global de la categoría de daño considerada.

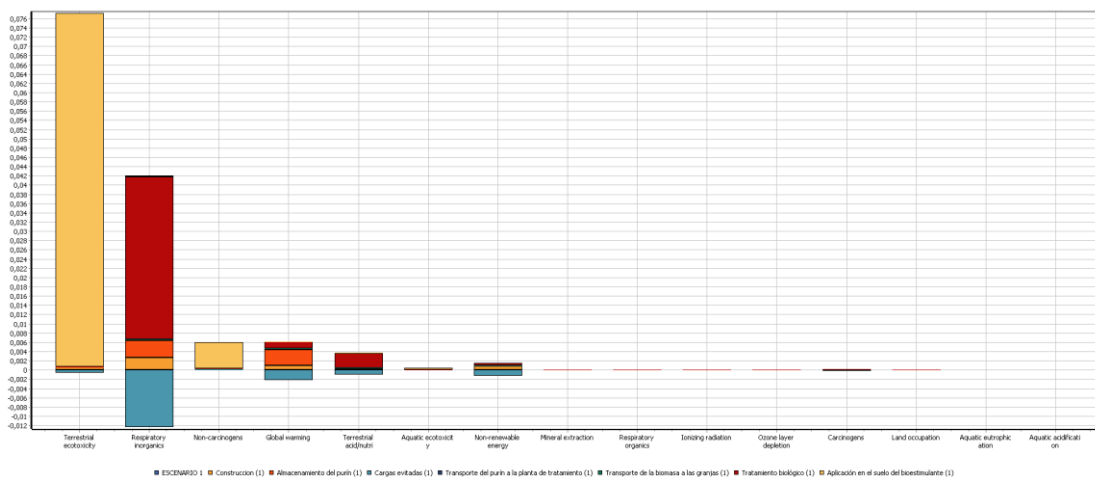


Ilustración 13. Normalización de la evaluación de daño por categorías de impacto (Fuente: Elaboración propia, SimaPro 2008)

Se ve un claro impacto en dos categorías, ecotoxicidad terrestre y respiratorios inorgánicos, muy por encima de no-carcinógenos, calentamiento global y acidificación/eutrofización terrestre. Muy lejos quedan las demás categorías de estas 5 primeras. En los siguientes puntos se van a ver estas 5 categorías en detalle.

### 3.1.1.1. Ecotoxicidad terrestre

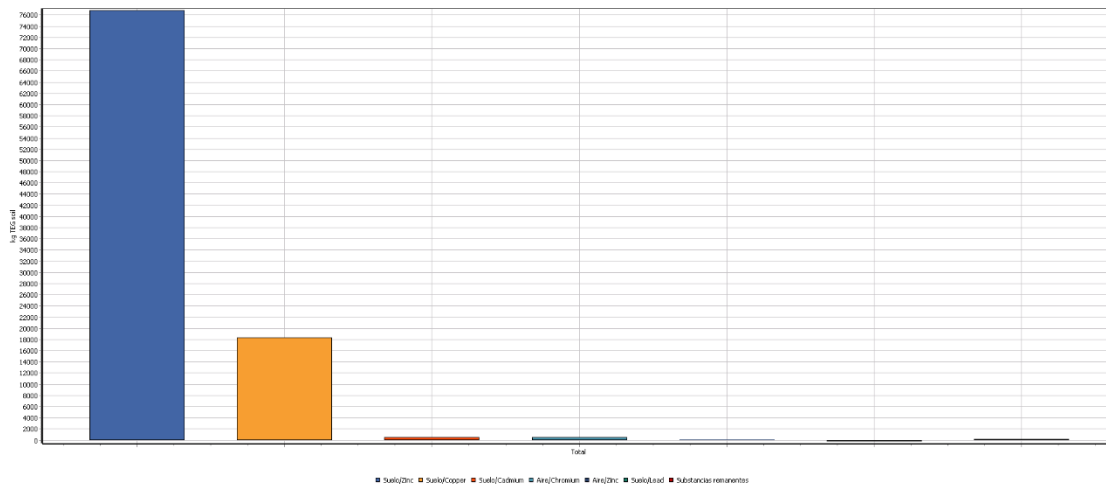


Ilustración 14. Evaluación del daño por sustancia en el escenario 1 para la categoría 'Ecotoxicidad terrestre' (Fuente: Elaboración propia, SimaPro8)

Esta categoría mide el impacto en kg de Trietilenglicol (TEG), líquido claro higroscópico, prácticamente inodoro e incoloro utilizado en la industria del papel, textil y de tintas, en sistemas de poliuretano, fibra poliéster, fluidos térmicos, hidráulicos y de frenos, desinfectantes y pesticidas, entre otros. Este impacto está causado en mas del 99% por la aplicación del purín en el suelo ( $9.61 \cdot 10^4$  kg TEG eq).

En la Ilustración 16 se ve un alto impacto causado por el zinc aplicado en el suelo ( $7.68 \cdot 10^4$  kg TEG eq), también de cobre ( $1.83 \cdot 10^4$  kg TEG eq), y en menor grado de cadmio. También afectan los procesos de producción de ferrocromo o ferrónquel utilizados en el proceso de construcción (972 kg TEG eq), sobre todo con la generación de cromo al aire.

### 3.1.1.2. Respiratorios inorgánicos

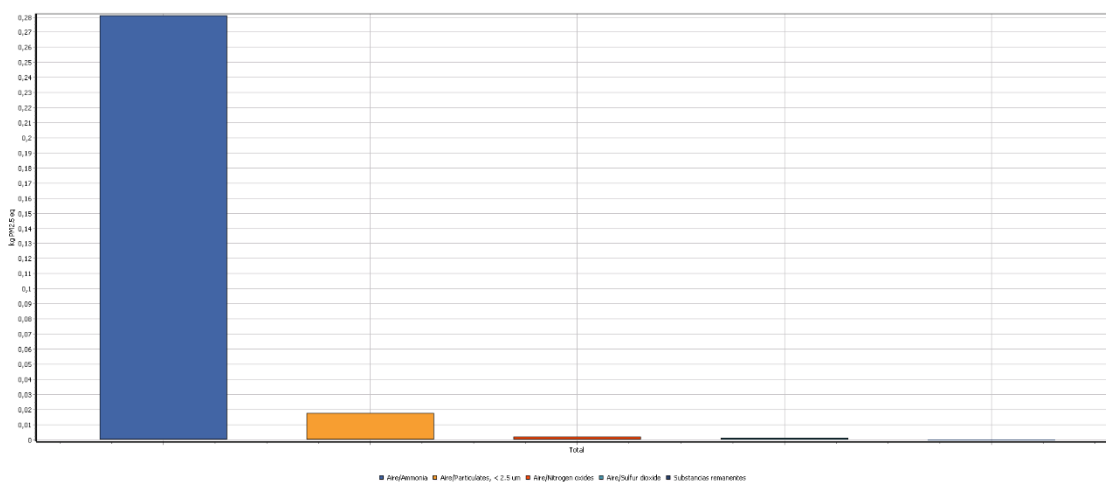


Ilustración 15. Evaluación del daño por sustancia en el escenario 1 para la categoría 'respiratorios inorgánicos' (Fuente: Elaboración propia, SimaPro8)



Para la categoría de respiratorios inorgánicos, se usa como medida kg de PM2.5 equivalentes. En la Ilustración 15 se aprecia una alta influencia del amonio, muy por encima de emisiones de partículas < 2.5 µm, óxidos de nitrógeno u otras sustancias remanentes. Este viene provocado principalmente por el tratamiento biológico (0.355 kg PM2.5 eq), donde se produce una alta emisión de amonio eliminado del purín inicial. Las cargas evitadas evitan un 35% de esta emisión (0.125 PM2.5 eq).

La producción de ferrocromo, ferroníquel en la construcción (0.0274 PM2.5 eq), el amonio emitido en el almacenamiento del purín (0.0376 PM2.5 eq), o los transportes realizados (0.003 PM2.5 eq), también provocan impacto en esta categoría, pero quedan totalmente opacados por un impacto muy alto de amonio.

### 3.1.1.3. No carcinógenos

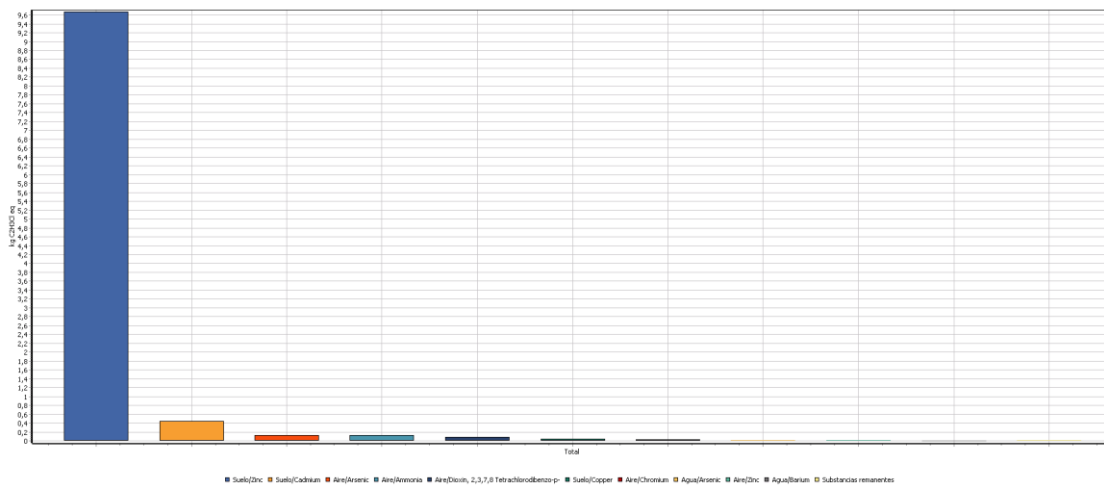


Ilustración 16. Evaluación del daño por sustancia en el escenario 1 para la categoría 'no carcinógenos' (Fuente: Elaboración propia, SimaPro8)

El impacto de esta categoría se mide en kg de cloruro de vinilo (C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>Cl) equivalente, la gran mayoría provocada por la emisión del zinc en el suelo, también de cadmio y cobre y de arsénico, amonio, dioxina y cromo al aire.

Casi el 98% de este impacto viene provocada por el proceso de aplicación del bioestimulante en el suelo (10.2 kg C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>Cl eq), lo que explica el alto porcentaje de zinc. El proceso de construcción (0.42 kg C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>Cl eq) o el de tratamiento en la planta (0.165 kg C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>Cl eq) también provocan ciertas emisiones, pero en comparación con las provocadas por el zinc presente en el bioestimulante, son insignificantes.

### 3.1.1.4. Calentamiento global

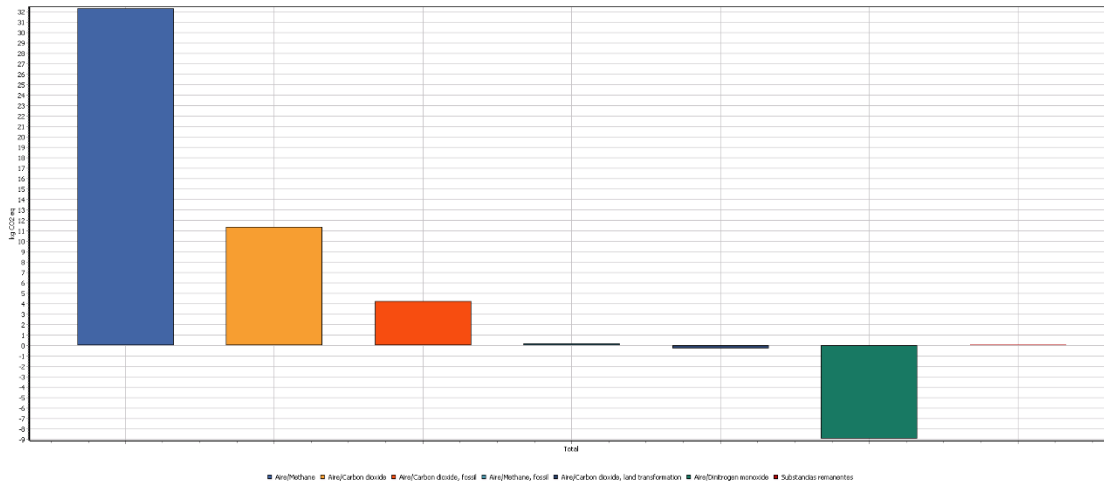


Ilustración 17. Evaluación del daño por sustancia en el escenario 1 para la categoría 'calentamiento global' (Fuente: Elaboración propia, SimaPro8)

El impacto de esta categoría se mide en kg de CO<sub>2</sub> equivalentes. Gran parte de este impacto está provocado por emisión de CH<sub>4</sub>, también de CO<sub>2</sub>. Las cargas evitadas reducen las emisiones de N<sub>2</sub>O del almacenamiento y gran parte de las emisiones de CO<sub>2</sub>, emitidas sobre todo en el proceso de construcción, transporte y tratamiento en la planta.

Casi el 90% de las emisiones provocadas en esta categoría provienen de proceso de almacenamiento del purín (33.9 kg CO<sub>2</sub> eq), del tratamiento biológico (15 kg CO<sub>2</sub> eq), los procesos de construcción (9.52 kg CO<sub>2</sub> eq), en la quema de combustible para obtener calor; y el transporte del purín inicial y el bioestimulante final (2.3 kg CO<sub>2</sub> eq).

### 3.1.1.5. Acidificación/eutrofización terrestre

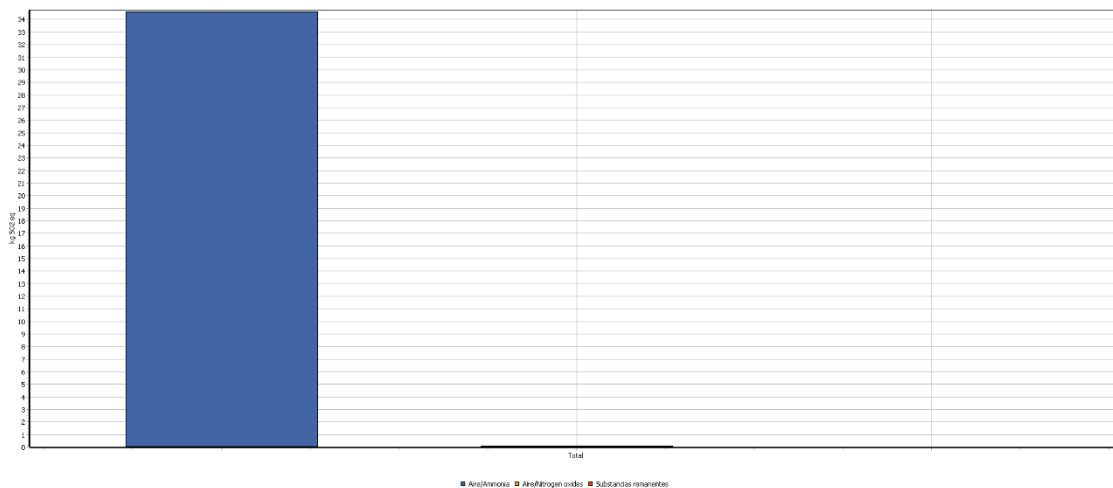


Ilustración 18. Evaluación del daño por sustancia en el escenario 1 para la categoría 'acidificación/eutrofización terrestre' (Fuente: Elaboración propia, SimaPro8)

Este impacto se mide en emisiones de SO<sub>2</sub> equivalentes. En la Ilustración 18 se ve un claro predominio en esta categoría del impacto causado por el amonio emitido al aire. Viendo la procedencia, se observa que la mayoría del impacto es provocado por el

tratamiento biológico (43.3 kg SO<sub>2</sub> eq), en la emisión de amonio producida en el Thin Layer. Las cargas evitadas reducen un 36% del impacto (13.9 SO<sub>2</sub> eq), pero sigue siendo muy significativo.

### 3.1.2. Escenario 0

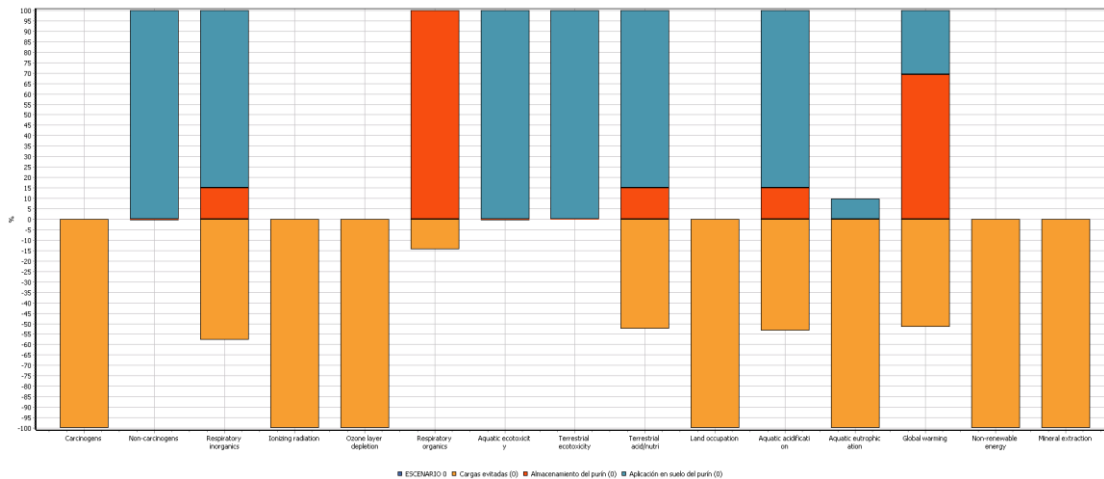


Ilustración 19. Caracterización del daño para el Escenario 0 (Fuente: Elaboración propia, SimaPro 8)

Para el escenario de no tratamiento, en la Ilustración 19 se aprecia cómo, para 7 de las 15 categorías de impacto, la aplicación del purín apenas afecta y son recuperadas por las cargas evitadas, sobre todo las categorías de recursos y cambio climático. En cambio, las categorías relacionadas con salud humana y calidad del ecosistema están muy afectadas por la aplicación del purín.

En concreto para la categoría de ecotoxicidad terrestre se produce un alto impacto causado por el proceso de aplicación del purín en el suelo, sobre todo provocado por los vertidos de metales pesados como zinc ( $3.55 \cdot 10^5$  kg TEG eq), cobre ( $6.92 \cdot 10^4$  kg TEG eq) y cadmio ( $1.58 \cdot 10^3$  kg TEG eq).

Las cargas evitadas recuperan las categorías de carcinógenos, radiación ionizante, agotamiento de la capa de ozono, ocupación del terreno, eutrofización acuática, energías no renovables y extracción mineral. Estas son emisiones evitadas por no aplicar el fertilizante de N formado por Urea, Nitrato Amónico Cálcico (NAC) y Sulfato de Amonio, y el de P formado por Superfosfato triple. Estas emisiones están sobre todo formadas por hidrocarburos, carbono 14, derivaciones de metano (Halón 1301, Halón 1211, CFC 12...) emitidos al aire, consumos energéticos para la producción del fertilizante o extracción de minerales como aluminio o cromo.

Las cargas evitadas también evitan ciertos impactos emitidos al suelo, pero estas son muy pequeñas comparadas con el daño que provoca el purín crudo, que contiene altas concentraciones de metales pesados y amonio.

### 3.1.3. Comparación de los impactos escenarios 0 y 1

Para hacer una comparación adecuada de los dos escenarios se va a analizar el impacto del escenario 0 para una proporción del purín equivalente a las hectáreas en las que se ha aplicado el bioestimulante del escenario 1, utilizando un límite para el N aplicado.

Según el RD 47/2022, de 18 de enero, sobre protección de las aguas contra la contaminación difusa producida por los nitratos procedentes de fuentes agrarias, el máximo de nitratos aplicado por hectárea es de  $170 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  de  $N_{\text{efectivo}}$ . Como se ha comentado anteriormente, la efectividad de N considerada para el bioestimulante es del 100%, por lo que, conociendo la concentración de N efectivo y el bioestimulante aplicado, se pueden calcular las hectáreas máximas en las que se puede aplicar el vertido, de la siguiente forma:

$$\frac{39.33 \frac{\text{kg } N_{\text{ef}}}{\text{d}}}{173.3 \frac{\text{m}^3 \text{ bioest}}{\text{d}}} = 0.23 \frac{\text{kg } N_{\text{ef}}}{\text{m}^3 \text{ bioest}}$$

$$\frac{170 \frac{\text{kg } N_{\text{ef}}}{\text{ha} \cdot \text{año}}}{0.23 \frac{\text{kg } N_{\text{ef}}}{\text{m}^3 \text{ bioest}}} = 739.1 \frac{\text{m}^3 \text{ bioest}}{\text{ha} \cdot \text{año}}$$

$$\frac{173.3 \frac{\text{m}^3 \text{ bioest}}{\text{d}} \cdot \frac{365 \text{ d}}{\text{año}}}{739.1 \frac{\text{m}^3 \text{ bioest}}{\text{ha} \cdot \text{año}}} = 85.58 \text{ ha}$$

Por tanto, con la concentración de N en el efluente que se va a aplicar en el suelo, se tiene un máximo de 85.58 hectáreas permitidas. Luego, para calcular la proporción de purín a aplicar:

$$170 \frac{\text{kg } N_{\text{ef}}}{\text{ha} \cdot \text{año}} \cdot 85.58 \text{ ha} = 14549.13 \frac{\text{kg } N_{\text{ef}}}{\text{ha} \cdot \text{año}}$$

La efectividad del N para el purín, según Corbala et al (2018) [1], es del 60%. En este caso, la concentración de  $N_{\text{ef}}$  en el purín es:

$$1059.72 \frac{\text{kg } N}{\text{ha} \cdot \text{año}} \cdot 60\% \cdot \frac{365 \text{ d}}{\text{año}} = 232078.68 \frac{\text{kg } N_{\text{ef}}}{\text{ha} \cdot \text{año}}$$

Por lo que la proporción que se puede aplicar es de:

$$\frac{14549.13 \frac{\text{kg } N_{\text{ef}}}{\text{ha} \cdot \text{año}}}{232078.68 \frac{\text{kg } N_{\text{ef}}}{\text{ha} \cdot \text{año}}} = 0.06 = 6\%$$

Se puede aplicar un 6% del purín total. Para hacer la comparación se cambian los datos en SimaPro según la proporción calculada para el escenario 0. Finalmente, haciendo la comparativa, se observan los datos representados en la Ilustración

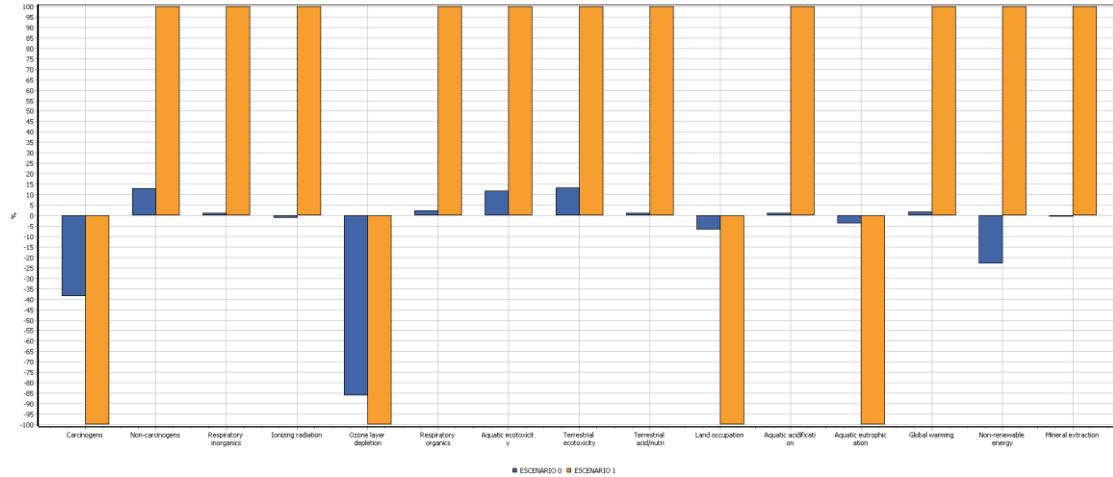


Ilustración 20. Comparación de las categorías de impacto para los escenarios 0 y 1 para las mismas hectáreas (Fuente: Elaboración propia, SimaPro)

El resultado muestra una clara superioridad en los impactos del escenario 1 sobre los del escenario 0. El alto contenido de nitrógeno presente en el purín hace que la cantidad final que se pueda aplicar se reduzca a sólo el 6% del total, reduciendo no sólo el nitrógeno aplicado, si no todos los demás nutrientes que se necesitan los cultivos, haciendo que la aplicación de este sea muy insignificante para el desarrollo del cultivo. Además, vuelve a surgir el problema de partida por el que se elabora este estudio: ¿Qué se hace con el 94% de purín restante que no se ha aplicado?

Por esto, se va a realizar una segunda comparación, en la que se aplique el 100% del purín que han generado las granjas, el mismo que se ha tratado en la planta (Ilustración 21). En este caso, el purín total da para aplicar a 1365.2 hectáreas, siguiendo las normativas para el límite de nitrógeno estipulada por el RD 47/2022, de 18 de enero.

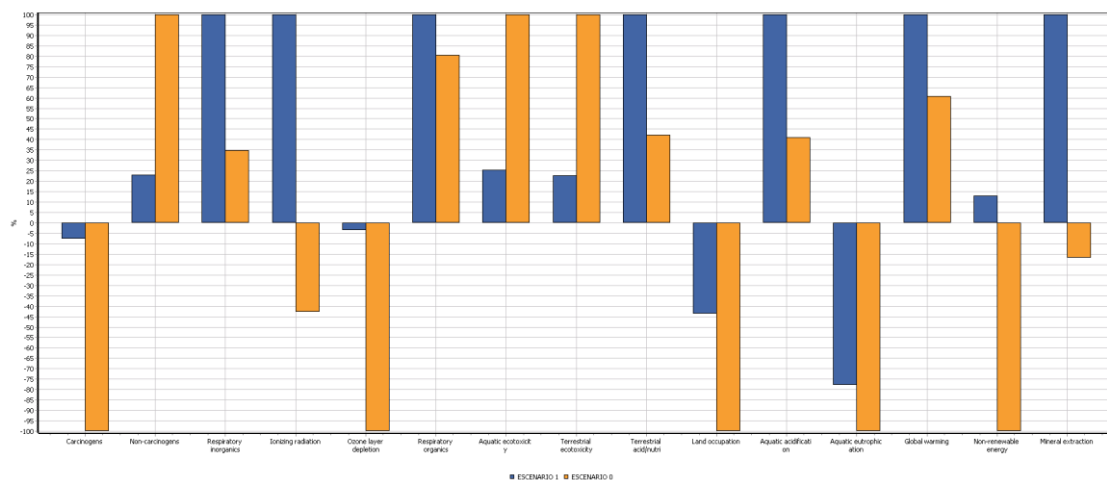


Ilustración 21. Comparación de las categorías de impacto para los escenarios 0 y 1 (Fuente: Elaboración propia, SimaPro)



Viendo el resultado por categorías de impacto (Ilustración 21), se aprecia cómo, para algunas categorías, el resultado final es recuperado por las cargas evitadas. Es el caso del impacto de carcinógenos, agotamiento de la capa de ozono, ocupación de terreno y eutrofización acuática. Además, el escenario de no tratamiento recupera en los impactos de radiación ionizante, energías no renovables y extracción mineral, en los que el escenario 1 sí tiene impacto emitido.

Para la categoría de carcinógenos, el escenario 1 recupera las emisiones provocadas en el proceso de construcción con las cargas evitadas por la aplicación del fertilizante químico, que provoca mayores emisiones por los procesos de su fabricación. En cambio, para el escenario 0, estas cargas son mucho mayores, ya que, además de que no emiten impacto de este tipo, el fertilizante evitado es mayor que para el escenario 1.

En cuanto al impacto de no carcinógenos, el impacto causado por el escenario 0 supera al del escenario 1, debido sobre todo a la alta concentración de zinc en el vertido de este. Aunque el bioestimulante aplicado en el escenario 1 también tiene concentraciones de zinc, estas son mucho menores que en el purín crudo, ya que se eliminó parte de esta en el tratamiento biológico.

Los impactos en respiratorios inorgánicos para el escenario 1 superan en casi un 200% al impacto del escenario 0. Esto se debe a que las emisiones de amonio que se producen en el escenario 1 son mucho mayores que para el escenario 0, debido a las que se producen en el tratamiento biológico en el Thin Layer, que son las que marcan la diferencia. Además, las cargas evitadas de en el escenario 0 por el uso de fertilizante químico, reducen bastante este impacto.

La categoría de radiación ionizante marca una gran diferencia. Estas son provocadas principalmente por emisiones al aire de Radón-222 y Carbono-14, que en el escenario 1 se produce en procesos de conversión de energía nuclear, como molienda de uranio, o consumo de energía nuclear. Por el contrario, para el escenario 0, no se utilizan apenas estos recursos, que se recuperan con las cargas evitadas.

El agotamiento de la capa de ozono, como se ha comentado, se recupera para los dos escenarios, aunque es mucho mayor para el escenario 0 que para el 1. Esta categoría está causada sobre todo por emisiones de derivados de metano, como halones o CFCs. Para el escenario 1 las cargas evitadas recuperan la totalidad de las emisiones de estos compuestos. Pero para el escenario 0, que no emite apenas de estos, el impacto se reduce totalmente.

La categoría de respiratorios inorgánicos está causada sobre todo por las emisiones de metano en el almacenamiento. Por lo tanto, es bastante similar en los dos escenarios. Sin embargo, para el escenario 0, que usa más fertilizante de cargas evitadas, estas se reducen, ya que el fertilizante emite otros compuestos orgánicos volátiles sin metano. Para el escenario 1 también se ven reducidos en cierto grado.

Para la ecotoxicidad acuática, el impacto causado por el escenario 0 supera, en casi un 200%, al impacto causado por el escenario 1. Esta emisión se mide en kg de TEG al agua y está causada principalmente por las emisiones de zinc y cobre que se producen en la



aplicación en el suelo. Las emisiones de estos metales pesados se reducen notablemente para el escenario 1, que reduce parte de esos metales en el proceso biológico.

El impacto a la ecotoxicidad terrestre es el más significativo, como se ha visto en las gráficas normalizadas de apartados anteriores. Esta categoría de impacto es muy alta en ambos escenarios, pero en el escenario 0 supera en un 200% la emisión del escenario 1. Están causadas sobre todo por la emisión de zinc, cobre y cadmio en la aplicación en el suelo de ambos escenarios.

La acidificación/eutrofización terrestre también señala diferencia entre ambos escenarios. En este caso está provocada por las emisiones de amonio al aire que se producen en ambos escenarios. Para ambos casos existe una emisión en el almacenamiento del purín y en la aplicación en el suelo. Pero para el escenario 1, este también se produce en el tratamiento biológico y este hecho marca la diferencia. Con las cargas evitadas se reduce parte de esta emisión.

Para la ocupación del terreno, como se ha comentado, se recuperan las emisiones con las cargas evitadas por el uso del fertilizante químico. Al ser el uso de fertilizante mayor en el escenario 0, esta se ve mucho más reducida. En el escenario 1, además, se tiene en cuenta un proceso de construcción, que hace que se equilibren un poco esas cargas evitadas.

En la categoría de acidificación acuática, al igual que otros procesos, está marcado por la diferencia de emisión de amonio, producida en el tratamiento biológico. El escenario 1 (4.38 kg SO<sub>2</sub> eq) tiene un impacto más de un 100% mayor que el escenario 0 (1.8 kg SO<sub>2</sub> eq).

En la categoría de eutrofización acuática, se tiene muy poco impacto por parte de los dos escenarios. Además, estas son recuperadas completamente con las cargas evitadas, que se reflejan sobre todo en emisiones de fosfatos al agua. Estos se producen en la producción de los fertilizantes químicos, como residuos sulfídicos o producciones químicas.

Para el calentamiento global, el impacto se produce por emisiones de metano en el almacenamiento y dióxidos de carbono. Para el escenario 1 este impacto es un 64% mayor que para el escenario 0, debido a las emisiones de CO<sub>2</sub> producidas en el tratamiento.

El escenario 0 no produce impactos en la categoría de energías no renovables, por lo tanto, todas las cargas evitadas en la producción del fertilizante químico dejan el impacto en negativo. En cambio, para el escenario 1, si existen emisiones, derivadas de los procesos de construcción, en el que se utiliza carbón, hierro y otros recursos, y transporte.

Igual que en la categoría de energías no renovables, el escenario 0 no produce ninguna emisión en la de extracción mineral. El escenario 1 sí tiene ciertas extracciones de minerales, sobre todo para la producción de ferróníquel, que se utiliza en aleaciones para el proceso de construcción.

Como se ha visto las gráficas normalizadas en los dos escenarios, el mayor problema se presenta en la ecotoxicidad terrestre, a causa del alto contenido de zinc y cadmio.





La toxicidad por cadmio reduce el crecimiento, la actividad fotosintética, el contenido de clorofilas y provoca clorosis principalmente en hojas jóvenes. También, interfiere en la entrada y transporte de nutrientes y ocasiona estrés oxidativo y afectaciones en las actividades enzimáticas.

El zinc tiene un aporte nutricional para el crecimiento del cultivo. Una de las funciones más relevante es el impacto que tiene este micronutriente en el funcionamiento y estabilidad estructural de muchas proteínas, para el desarrollo de acciones reguladoras, catalíticas y estructurales. Activa las enzimas responsables de la síntesis de una gran serie de proteínas. La presencia del zinc en el tejido foliar ayuda a las plantas a resistir bajas temperaturas. A pesar de esto, el exceso de zinc puede repercutir negativamente en el desarrollo, crecimiento y calidad de los cultivos, así que es conveniente comprobar que no se supera el límite establecido para los diferentes metales pesados que causan un problema de toxicidad terrestre.

Según el Anexo I C del RD 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario, los límites establecidos para kg de metales pesados por hectárea y año:

Tabla 22. Valores límites para las cantidades anuales de metales pesados que se podrán introducir en los suelos (Fuente: RD 1310/1990)

Parámetros	Valores límite
Cadmio	0,15
Cobre	12,00
Níquel	3,00
Plomo	15,00
Zinc	30,00
Mercurio	0,10
Cromo	3,00

Para este caso, los metales pesados aplicados:

Tabla 23. Metales pesados aplicados por ha y por año en el suelo para escenario 1 (Fuente: Elaboración propia)

Metal Pesado	Q13 (Bioestimulante)
Cu (kg/ha/año)	3.17
Mn (kg/ha/año)	10.05
Zn (kg/ha/año)	15.87
Fe (kg/ha/año)	84.65
K (kg/ha/año)	3068.42
Na (kg/ha/año)	708.91
Pb (kg/ha/año)	0.00
Cd (kg/ha/año)	0.14

Como se aprecia en la Ilustración 23, no se supera el límite permitido para ninguno de los metales pesados, aunque para el cadmio se queda justo al límite. Por lo tanto, el escenario 1 supone un aporte rico en nutrientes para el cultivo, dando salida a todo el purín generado en las granjas de Cuéllar en 1 año.



### 3.1.4. Conclusiones

Para el escenario 1, se tienen las siguientes conclusiones:

- La aplicación del bioestimulante en el suelo causa el mayor impacto en la ecotoxicidad terrestre, debido a la presencia de metales pesados, sobre todo de Zn y Cd. Aunque, como se ha comprobado, ninguno de estos supera el límite establecido aplicable.
- Se aprecia un alto impacto en los respiratorios inorgánicos, sobre todo causado por el tratamiento biológico, donde se emiten concentraciones de amonio al aire. En este impacto también participa el almacenamiento del purín, pero con mucha menos incidencia.

La sustitución de los fertilizantes sintéticos juega un papel importante en el impacto de ambos escenarios considerados. Para el escenario 1 se reducen los impactos de carcinógenos, agotamiento de la capa de ozono, ocupación del terreno y eutrofización acuática. Para el escenario 0 se reducen los mismos, más los impactos de radiación ionizante, energías no renovables y extracción mineral.

Considerando que se aplica todo el purín, el escenario 1 produce menos impactos en las categorías de no carcinógenos, ecotoxicidad acuática y ecotoxicidad terrestre. El resto de los impactos son los provocados por emisiones gaseosas en el proceso de construcción o el proceso de tratamiento.



## Bibliografía

- [1] L. Corbala-Robles, W. N. D. Sastafiana, V. Van linden, E. I. P. Volcke, and T. Schaubroeck, "Life cycle assessment of biological pig manure treatment versus direct land application – a trade-off story," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 131, no. August 2017, pp. 86–98, 2018.
- [2] M. A. Comin, "El sector porcino español, número 1 en Europa - Porcinnova," 2021. [Online]. Available: <https://porcinnova.es/el-sector-porcino-espanol-numero-1-en-europa/>. [Accessed: 28-Jun-2022].
- [3] "Ranking países productores de carne de cerdo y comercio internacional - Noticias - 3tres3, la página del Cerdo," 2022. [Online]. Available: [https://www.3tres3.com/ultima-hora/ranking-paises-productores-de-carne-de-cerdo-y-comercio-internacional\\_47981/](https://www.3tres3.com/ultima-hora/ranking-paises-productores-de-carne-de-cerdo-y-comercio-internacional_47981/). [Accessed: 28-Jun-2022].
- [4] SG de Producciones Ganaderas y Cinegéticas, "EL SECTOR DE LA CARNE DE CERDO EN CIFRAS: Principales indicadores económicos," *Minist. Agric. y Aliment.*, pp. 1–75, 2020.
- [5] C. Domínguez Labajo, R. Muñoz Torre, and D. A. García Guzmán, "Tratamiento biológico de aguas residuales de origen porcino . Estudio comparativo entre consorcio algas-bacterias y bacterias púrpuras fotosintéticas del no sulfuro," p. 93, 2018.
- [6] M. L. Fernández-Marcos and · E Álvarez-Rodríguez, "Contaminación del suelo por metales pesados resultante de la aplicación de purines y biosólidos," *Romkens & Salomons*, 2011.
- [7] A. González Céspedes, "Cultivos De Microalgas a Gran Escala: Sistemas De Producción," *ADNAgro*, p. 14, 2016.
- [8] J. M. Fernandez Sevilla and S. Bolado Rodriguez, "Producción sostenible de bioestimulantes y biopesticidas agrícolas a partir de residuos agroindustriales (GREENFARM)," vol. 1, pp. 1–20, 2021.
- [9] L. T. Arashiro, N. Montero, I. Ferrer, F. G. Acien, C. Gómez, and M. Garfí, "Life cycle assessment of high rate algal ponds for wastewater treatment and resource recovery," *Sci. Total Environ.*, vol. 622–623, pp. 1118–1130, 2018.
- [10] E. Rojas Creso, D. Iglesias Hernandez, and J. Pozo Dengra, "PROCEDIMIENTO DE OBTENCIÓN DE CONCENTRADOS DE BIOFERTILIZANTES Y BIOESTIMULANTES DE USO AGRÍCOLA A PARTIR DE BIOMASA DE MICROALGAS, INCLUYENDO CIANOBACTERIAS," 2018.
- [11] "Inventario de instalaciones - Inventario Completo | PRTR España." [Online]. Available: <https://prtr-es.es/Informes/InventarioInstalacionesIPPC.aspx>. [Accessed: 10-Jul-2022].
- [12] J. Collao, P. García-Encina, S. Blanco, S. Bolado-Rodríguez, and N. Fernández González, "Current concentration of Zn, Cu and As in piggery wastewater compromise nutrient removals in microalgae - bacteria photobioreactors due to altered microbial communities." .
- [13] Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos Aragón, "Planta de tratamiento de purín en Valderrobres (Teruel)," 2009.
- [14] B. Molt Petersen, "Life cycle assessment of slurry management technologies.," no. 1298, 2009.



- [15] E. Navarro-López, M. del C. Cerón-García, M. López-Rodríguez, F. G. Ación-Fernández, and E. Molina-Grima, "Biostimulants obtained after pilot-scale high-pressure homogenization of *Scenedesmus* sp. grown in pig manure," *Algal Res.*, vol. 52, no. October, 2020.
- [16] M. Bolea Garcia, "Análisis de Ciclo de Vida de la captura de CO2 en una central térmica y evaluación de alternativas basadas en energías renovables," 2015.
- [17] H. Hcpf-, "Electrobomba centrífuga monocelular," pp. 5–6.
- [18] MARM, "Caracterización de sistemas de gestión de deyecciones. Sector porcino intensivo," vol. 7, 2010.
- [19] C. De Klein *et al.*, "Chapter 11: N2O emissions from managed soils, and CO2 emissions from lime and urea application," *Agric. For. Other L. Use*, pp. 1–54, 2006.
- [20] ASAE, "Manure production and characteristics," *American Soc. Agricultural Eng.*, p. 4, 2019.
- [21] H. Dong *et al.*, "2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas inventories - Chapter 10: Emissions from livestock and manure management," 2006.
- [22] "Mapas - Portal de Suelos - ITACyL Portal Web." [Online]. Available: <https://suelos.itacyl.es/mapas>. [Accessed: 19-Jul-2022].
- [23] G. Doka, "Part IV: Wastewater Treatment," *Life Cycle Invent. Waste Treat. Serv.ecoinvent Rep. No. 13, Swiss Cent. Life Cycle Invent. Dübendorf, December 2003*, no. 13, p. 54, 2003.
- [24] M. A. Monge Redondo, "De las conducciones y algunos aspectos relacionados con su cálculo," *iagua*, 2019.
- [25] "IFADATA." [Online]. Available: <http://ifadata.fertilizer.org/ucSearch.aspx>. [Accessed: 12-Sep-2022].

## ANEXOS

### Consumo eléctrico (Escenario 1)

#### DATOS TÉCNICOS DE LA SERIE R

Tipo	Volumen de rotación	Presión máxima	Capacidad máxima		Rotación máxima
			l/min	m <sup>3</sup> /h	
	l	bar			RPM <sup>-1</sup>
<b>Serie R116</b>					
60	1,16	5	750	45	650
120	2,32	5	1.500	90	650
180	3,48	5	2.250	135	650
240	4,64	5	3.000	180	650
300	5,80	4	3.800	225	650
360	6,96	3	4.500	270	650
<b>Serie R136</b>					
70	1,27	5	800	45	650
105	1,90	5	1.200	70	650
140	2,53	5	1.650	90	650
210	3,80	5	2.500	140	650
280	5,06	5	3.300	180	650
350	6,33	5	4.100	230	650
420	7,59	5	5.000	280	650
<b>Serie RP</b>					
4.000	5,06	5	4.000	240	800
5.000	6,33	5	5.000	300	800
6.000	7,59	5	6.000	360	800

Tabla 24. Eficiencia de bombeo para diferentes fluidos (Fuente: Life cycle assessment in biorefineries)

**Table A.18: Default pump efficiencies for pumping incompressible fluids**

Pump type	flow m <sup>3</sup> /s	Efficiency
	0.0063	45%
Centrifugal pump	0.0315	70%
	0.63	80%
Axial pump	all	75%
Rotary pump	all	65%
	Power (kW)	
	7.46	70%
Reciprocating pump	37.3	85%
	373	90%

### Pretratamiento

$$CE \left[ \frac{kWh}{m^3 \text{ purín crudo}} \right] = \frac{P[kW] \cdot t_{Pumping}[h]}{V_{Purín}[m^3 \text{ purín crudo}]} \quad \text{Ec. (1)}$$

Aplicando la Ecuación 1:

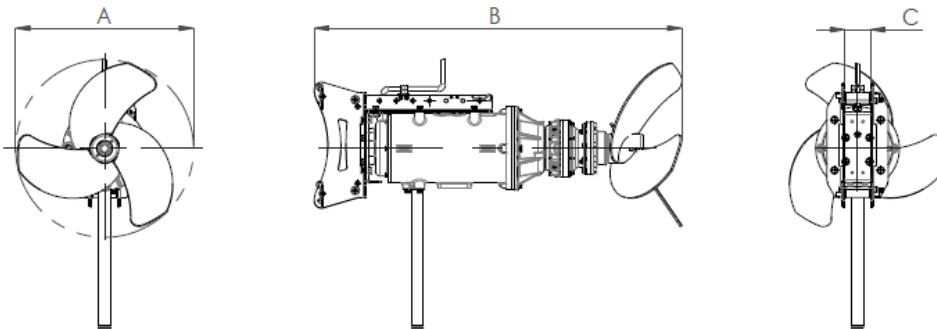
$$CE_{Pretratam} \left[ \frac{kWh}{m^3 \text{ purín crudo}} \right] = \frac{(0.18 + 0.25)[kW] \cdot 24[h]}{206.98[m^3 \text{ purín crudo}]} = 0.05 \frac{kWh}{m^3 \text{ purín crudo}}$$

### Mezclador

Aplicando la Ecuación 1:

$$CE_{Bombeo} \left[ \frac{kWh}{m^3 \text{ purín crudo}} \right] = \frac{2.2[kW] \cdot 24[h]}{206.98[m^3 \text{ purín crudo}]} = 0.26 \frac{kWh}{m^3 \text{ purín crudo}}$$

## Technical Data



MODEL	Drive Power (kW)	RPM	Weight (kg)	Dimensions (mm)		
				A	B	C
SE-022	2.2	250	120	510	1,005	80 - 100
SE-030	3.0	250	140	560	1,025	80 - 100
SE-040	4.0	250	150	570	1,045	80 - 100
SE-055	5.5	250	165	645	1,275	80 - 100
SE-075	7.5	250	170	710	1,295	80 - 100
SE-110-LE	11.0	140	320	1,000	1,685	100 - 120
SE-150-LE	15.0	140	330	1,100	1,765	100 - 120
SE-110-ST	11.0	280	300	650	1,485	100 - 120
SE-150-ST	15.0	280	320	740	1,545	100 - 120
SE-185-ST	18.5	280	330	770	1,555	100 - 120
SE-220-ST	22.0	280	340	800	1,570	100 - 120
SE-110-VE	11.0	355	290	530	1,440	100 - 120
SE-150-VE	15.0	355	305	590	1,465	100 - 120
SE-185-VE	18.5	355	315	610	1,485	100 - 120
SE-220-VE	22.0	355	325	710	1,505	100 - 120

*Dimensions in mm*

Ilustración 22. Ficha técnica agitador de mezcla (Fuente WAMGroup.es)

## Product Range Performance

### SE Range 2.2 - 7.5 kW

MODEL	RPM	Mixing results*:		Suitable for
		Thrust up to (N)	Flow rate up to (m <sup>3</sup> / h)	
SE 022 - SE 040	250	900	2,650	livestock sector
SE 055 - SE 075	250	1,650	4,300	livestock and biogas

### SE Range 11 - 22 kW

MODEL	RPM	Mixing results*:		Suitable for
		Thrust up to (N)	Flow rate up to (m <sup>3</sup> / h)	
SE Lento (LE)	140	6,000	16,000	primary processing of large volumes
SE Standard (ST)	280	5,800	12,000	multiple applications
SE Veloce (VE)	355	5,600	10,000	crushing of surface crust

\* Values measured with clear water at 20° C.

Results may vary by changing the operating conditions depending on density, viscosity and dry matter content. The information and illustrations are not binding.

Ilustración 23. Especificaciones de modelos de agitadores de mezcla (Fuente: WAMGroup.es)



### Bombeo purín

$$CE \left[ \frac{kWh}{m^3 \text{ purín crudo}} \right] = \frac{P[kW] \cdot t_{\text{pumping}}[h]}{V_{\text{purín}}[m^3 \text{ purín crudo}]} \quad \text{Ec. (1)}$$

$$P[\text{Wattios}] = \frac{Q \left[ \frac{m^3}{s} \right] \cdot H[m] \cdot g \left[ \frac{m}{s^2} \right] \cdot \rho \left[ \frac{kg}{m^3} \right]}{\eta} \quad \text{Ec. (2)}$$

Aplicando las ecuaciones 1 y 2:

$$P[\text{Wattios}] = \frac{0.0024 \left[ \frac{m^3}{s} \right] \cdot 12[m] \cdot 9.8 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \cdot 1000 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]}{70\%} = 402 \text{ W}$$

$$CE_{\text{Bombeo}} \left[ \frac{kWh}{m^3 \text{ purín crudo}} \right] = \frac{0.402[kW] \cdot 24[h]}{206.98[m^3 \text{ purín crudo}]} = \mathbf{0.047} \frac{kWh}{m^3 \text{ purín crudo}}$$

### Bombeo agua fresca

Aplicando las ecuaciones 1 y 2:

$$P[\text{Wattios}] = \frac{0.046 \left[ \frac{m^3}{s} \right] \cdot 5[m] \cdot 9.8 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \cdot 1000 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]}{70\%} = 3186 \text{ W}$$

$$CE_{\text{Bombeo}} \left[ \frac{kWh}{m^3 \text{ purín crudo}} \right] = \frac{3.186[kW] \cdot 24[h]}{206.98[m^3 \text{ purín crudo}]} = \mathbf{0.37} \frac{kWh}{m^3 \text{ purín crudo}}$$

### Bombeo recirculación

Aplicando las ecuaciones 1 y 2:

$$P[\text{Wattios}] = \frac{0.0172 \left[ \frac{m^3}{s} \right] \cdot 10[m] \cdot 9.8 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \cdot 1000 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]}{65\%} = 2600.48 \text{ W}$$

$$CE_{\text{Bombeo}} \left[ \frac{kWh}{m^3 \text{ purín crudo}} \right] = \frac{2.6 [kW] \cdot 24[h]}{206.98[m^3 \text{ purín crudo}]} = \mathbf{0.30} \frac{kWh}{m^3 \text{ purín crudo}}$$

### Bombeo a hidrólisis

Aplicando las ecuaciones 1 y 2:

$$P[\text{Wattios}] = \frac{0.002 \left[ \frac{m^3}{s} \right] \cdot 5[m] \cdot 9.8 \left[ \frac{m}{s^2} \right] \cdot 1000 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]}{70\%} = 143.37 \text{ W}$$

$$CE_{\text{Bombeo}} \left[ \frac{kWh}{m^3 \text{ purín crudo}} \right] = \frac{0.14 [kW] \cdot 24[h]}{206.98[m^3 \text{ purín crudo}]} = \mathbf{0.02} \frac{kWh}{m^3 \text{ purín crudo}}$$

### Bombeo 1ª centrifugación

Aplicando la Ecuación 1:



$$CE_{\text{Bombeo}} \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3 \text{ purín crudo}} \right] = \frac{46.75 [\text{kW}] \cdot 24[\text{h}]}{206.98[\text{m}^3 \text{ purín crudo}]} = 5.43 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3 \text{ purín crudo}}$$

### Bombeo 2ª centrifugación

Aplicando la Ecuación 2:

$$CE_{\text{Bombeo}} \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3 \text{ purín crudo}} \right] = \frac{4 [\text{kW}] \cdot 24[\text{h}]}{206.98[\text{m}^3 \text{ purín crudo}]} = 0.46 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3 \text{ purín crudo}}$$

### High Pressure Homogenization

Aplicando las ecuaciones:

$$1.93 \frac{\text{MJ}}{\text{kg purín seco}} * \frac{7078.62 \text{ kg purín seco}}{206.98 \text{ m}^3 \text{ purín crudo}} = 66 \text{ MJ} \cdot \text{m}^3 \text{ purín crudo} \\ = 18.33 \text{ kWh} \cdot \text{m}^3 \text{ purín crudo}$$

### Hidrólisis enzimática

$$\frac{1 \text{ kWh}}{\text{m}^3} \cdot \frac{176.97 \text{ m}^3}{d} \cdot \frac{d}{206.98 \text{ m}^3} = 0.86 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3 \text{ purín crudo}}$$

### Emisiones en el almacenamiento (Escenarios 0 y 1)

#### Metano (CH<sub>4</sub>)

$$CH_{4(T)} \left[ \frac{\text{kg CH}_4}{\text{m}^3 \text{ purín}} \right] = \\ \left( VS_{(T)} \left[ \frac{\text{kg VS}}{\text{animal} \cdot \text{d}} \right] \cdot 365 \left[ \frac{\text{d}}{\text{año}} \right] \right) \cdot \left[ B_{0(T)} \left[ \frac{\text{m}^3 \text{ CH}_4}{\text{kg VS}} \right] \cdot 0.67 \left[ \frac{\text{kg CH}_4}{\text{m}^3 \text{ CH}_4} \right] \cdot \sum_{s,k} MCF_{(sk)} \cdot MS_{(T,s,k)} \right] \cdot \frac{1}{2.15} \left[ \frac{\text{animal} \cdot \text{año}}{\text{m}^3 \text{ purín}} \right] \quad \text{Ec. 3}$$

Aplicando la Ecuación 3:

$$CH_{4(T)} \left[ \frac{\text{kg CH}_4}{\text{m}^3 \text{ purín}} \right] = \\ \left( 0.59 \left[ \frac{\text{kg VS}}{\text{animal} \cdot \text{d}} \right] \cdot 365 \left[ \frac{\text{d}}{\text{año}} \right] \right) \cdot \left[ 0.45 \left[ \frac{\text{m}^3 \text{ CH}_4}{\text{kg VS}} \right] \cdot 0.67 \left[ \frac{\text{kg CH}_4}{\text{m}^3 \text{ CH}_4} \right] \cdot 20\% \cdot 0.698 \right] \cdot \frac{\text{animal} \cdot \text{d}}{2.15 \text{ m}^3 \text{ purín}} = 4.25 \frac{\text{kg CH}_4}{\text{m}^3 \text{ purín}}$$

#### Emisiones directas de N<sub>2</sub>O

$$N_2O_{D(mm)} \left[ \frac{\text{kg N}_2\text{O}}{\text{m}^3 \text{ purín}} \right] = \\ \left[ \sum_s \left[ \sum_T \left( N_{(T)} \cdot Nex_{(T)} \left[ \frac{\text{kg N}}{d} \right] \cdot MS_{(T,s)} \right) \right] \cdot EF_{3(s)} \left[ \frac{\text{kg N}_2\text{O}-N}{\text{kg N}} \right] \right] \cdot \frac{44}{28} \left[ \frac{\text{kg N}_2\text{O}}{\text{kg N}_2\text{O}-N} \right] \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{d}{\text{m}^3 \text{ purín}} \right] \quad \text{Ec. 4}$$

Aplicando la Ecuación 4:

$$N_2O_{D(mm)} \left[ \frac{\text{kg N}_2\text{O}}{\text{m}^3 \text{ purín}} \right] = \\ \left[ \sum_s \left[ \sum_T \left( 1059.72 \left[ \frac{\text{kg N}}{d} \right] \cdot 0.698 \right) \right] \right] \cdot 0.002 \left[ \frac{\text{kg N}_2\text{O}-N}{\text{kg N}} \right] \cdot \frac{44}{28} \left[ \frac{\text{kg N}_2\text{O}}{\text{kg N}_2\text{O}-N} \right] \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{d}{\text{m}^3 \text{ purín}} \right] = 0.01 \frac{\text{kg N}_2\text{O}}{\text{m}^3 \text{ purín}}$$

### Emisiones indirectas de N<sub>2</sub>O

$$N_{volatilization-MMS} \left[ \frac{kg NH_3-N+NO_x-N_{Volatilized}}{d} \right] = \sum_s \left[ \sum_T \left[ \left( N_{(T)} \cdot Nex_{(T)} \left[ \frac{kg N}{d} \right] \cdot MS_{(T,S)} \right) \cdot Frac_{GasMS} (T,S) \left[ \frac{kg NH_3-N+NO_x-N_{Volatilized}}{kg N} \right] \right] \right] \quad Ec. 5$$

$$N_2O_G (mm) \left[ \frac{kg N_2O}{m^3 purín} \right] = \left( N_{volatilization-MMS} \cdot EF_4 \left[ \frac{kg N_2O-N}{kg NH_3-N+NO_x-N_{Volatilized}} \right] \right) \cdot \frac{44}{28} \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{d}{m^3 purín} \right] \quad Ec. 6$$

Aplicando las Ecuaciones 5 y 6:

$$N_{volatilization-MMS} \left[ \frac{kg NH_3-N+NO_x-N_{Volatilized}}{d} \right] = \sum_s \left[ \sum_T \left[ \left( 1059.72 \left[ \frac{kg N}{d} \right] \cdot 0.698 \right) \cdot 0.2 \left[ \frac{kg NH_3-N+NO_x-N_{Volatilized}}{kg N} \right] \right] \right] = 0.41 \frac{kg NH_3-N+NO_x-N_{Volatilized}}{d}$$

$$N_2O_G (mm) \left[ \frac{kg N_2O}{m^3 purín} \right] = \left( 0.41 \cdot 0.01 \left[ \frac{kg N_2O-N}{kg NH_3-N+NO_x-N_{Volatilized}} \right] \right) \cdot \frac{44}{28} \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{d}{m^3 purín} \right]$$

$$= 0.00003 \frac{kg N_2O}{m^3 purín}$$

### Emisiones de NH<sub>3</sub>

$$NH_3 \left[ \frac{kg NH_3}{m^3 purín} \right] = TAN \left[ \frac{kg TAN}{d} \right] \cdot 0.11 \left[ \frac{kg NH_3-N}{TAN} \right] \cdot 70\% \cdot \frac{17}{14} \frac{kg NH_3}{kg NH_3-N} \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{d}{m^3 purín} \right] \quad Ec. 7$$

Aplicando la Ecuación 7:

$$NH_3 \left[ \frac{kg NH_3}{m^3 purín} \right] = 688.82 \left[ \frac{kg TAN}{d} \right] \cdot 0.11 \left[ \frac{kg NH_3-N}{TAN} \right] \cdot 70\% \cdot \frac{17}{14} \frac{kg NH_3}{kg NH_3-N} \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{d}{m^3 purín} \right]$$

$$= 0.31 \frac{kg NH_3}{m^3 purín}$$

### Emisiones de NO<sub>x</sub>

$$NO \left[ \frac{kg NO}{m^3 purín} \right] = TAN \left[ \frac{kg TAN}{d} \right] \cdot 0.0001 \left[ \frac{kg NO}{kg TAN} \right] \cdot 70\% \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{d}{m^3 purín} \right] \quad Ec. 8$$

Aplicando la ecuación 8:

$$688.82 \frac{kg TAN}{d} \cdot 0.0001 \frac{kg NO}{TAN} \cdot 70\% \cdot \frac{d}{206.98 m^3 purín} = 0.0002 \frac{kg NO}{m^3 purín}$$

### Emisiones de transporte (Escenario 1)

Tabla 25. Cálculo tkm para el transporte del purín de cada granja a la planta de tratamiento (Fuente: Elaboración propia)

	Distancia (km)	Cabezas de cerdo (Capacidad)	Purín (m <sup>3</sup> /año)	Nº viajes camión	Ponderación viaje	tkm
Julia Cabrero Martín	5.2	2460	5289	265	0.07	0.73
Inversiones Ganaderas de Páramo	5.3	3952	8496.8	425	0.11	1.19
Diego Tejero Pascual	8.1	3536	7602.4	381	0.10	1.63
Sonleiva XXI S.L.	7.3	3843	8262.45	414	0.11	1.60
Torregutierrez	8.8	2774	5964.1	299	0.08	1.39
Los Albares	8.8	4240	9116	456	0.12	2.12
La Gabina, ESPJ	4.1	2520	5418	271	0.07	0.59
Sociedad Civil Pozuelo	6.9	2344	5039.6	252	0.07	0.92
Pinos Albos	10.9	3500	7525	377	0.10	2.17
Juan Antonio Nieto Montalvillo	12.8	2609	5609.35	281	0.07	1.90
El Cigüeñal	14.3	3360	7224	362	0.10	2.74
				3783		16.98

Tabla 26. Cálculo tkm para el transporte del bioestimulante tratado en la planta a cada granja (Fuente: Elaboración propia)

	m <sup>3</sup> biomasa bioestimulante equivalente/año	distancia (km)	nº viajes	ponderación	tkm
Julia Cabrero Martín	4428.49	5.2	222	0.070	0.61
Inversiones Ganaderas de Páramo	7114.39	5.3	356	0.112	1.00
Diego Tejero Pascual	6365.51	8.1	319	0.101	1.37
Sonlleva XXI S.L.	6918.17	7.3	346	0.109	1.34
Torregutierrez	4993.76	8.8	250	0.079	1.16
Los Albares	7632.85	8.8	382	0.121	1.78
La Gabina, ESPJ	4536.51	4.1	227	0.072	0.49
Sociedad Civil Pozuelo	4219.67	6.9	211	0.067	0.77
Pinos Albos	6300.70	10.9	316	0.100	1.82
Juan Antonio Nieto Montalvillo	4696.72	12.8	235	0.074	1.59
El Cigüeñal	6048.68	14.3	303	0.096	2.29
			3167		14.22

## Emisiones en la aplicación en el suelo (Escenario 1)

### Emisiones directas de N<sub>2</sub>O

$$N_2O_{Direct} - N \left[ \frac{kg N_2O}{m^3 \text{ purín}} \right] = (F_{SN} + F_{ON}) \left[ \frac{kg N_{input}}{d} \right] \cdot EF_1 \left[ \frac{kg N_2O-N}{kg N_{input}} \right] \cdot \frac{44}{28} \left[ \frac{kg N_2O}{kg N_2O-N} \right] \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{d}{m^3 \text{ purín}} \right] \text{ Ec. 9}$$

Aplicando la ecuación 9:

$$N_2O_{Direct} - N \left[ \frac{kg N_2O}{m^3 \text{ purín}} \right] = 39.33 \left[ \frac{kg N_{input}}{d} \right] \cdot 0.01 \left[ \frac{kg N_2O - N}{kg N_{efect}} \right] \cdot \frac{44}{28} \left[ \frac{kg N_2O}{kg N_2O - N} \right] \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{d}{m^3 \text{ purín}} \right] = 0.003 \frac{kg N_2O}{m^3 \text{ purín}}$$

### Emisiones indirectas de N<sub>2</sub>O

$$N_2O_{Indirect} \left[ \frac{kg N_2O}{m^3 \text{ purín}} \right] = F_{ON} \left[ \frac{kg N_{input}}{d} \right] \cdot Frac_{GasM} \left[ \frac{kg NH_3-N+NO_x-N_{volatilized}}{kg N_{input}} \right] \cdot EF_4 \left[ \frac{kg N_2O-N}{kg NH_3-N+NO_x-N_{volatilized}} \right] \cdot \frac{44}{28} \left[ \frac{kg N_2O}{kg N_2O-N} \right] \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{d}{m^3 \text{ purín}} \right] \text{ Ec. 10}$$

Aplicando la Ecuación 10:

$$N_2O_{Indirect} \left[ \frac{kg N_2O}{m^3 \text{ purín}} \right] = 39.33 \left[ \frac{kg N_{input}}{d} \right] \cdot 0.2 \left[ \frac{kg NH_3 - N + NO_x - N_{volatilized}}{kg N_{input}} \right] \cdot 0.01 \left[ \frac{kg N_2O - N}{kg NH_3 - N + NO_x - N_{volatilized}} \right] \cdot \frac{44}{28} \left[ \frac{kg N_2O}{kg N_2O - N} \right] \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{d}{m^3 \text{ purín}} \right] = 0.0006 \frac{kg N_2O}{m^3 \text{ purín}}$$

### Emisiones de NH<sub>3</sub>

$$NH_3 \left[ \frac{kg NH_3}{m^3 \text{ purín}} \right] = NT \left[ \frac{kg NT}{d} \right] \cdot 65\% \left[ \frac{kg TAN}{kg NT} \right] \cdot FE \left[ \frac{kg NH_3-N}{kg TAN} \right] \cdot \frac{17}{14} \left[ \frac{kg NH_3}{kg NH_3-N} \right] \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{d}{m^3 \text{ purín}} \right] \text{ Ec. 11}$$

Aplicando la Ecuación 11:

$$NH_3 \left[ \frac{kg NH_3}{m^3 \text{ purín}} \right] = 39.33 \left[ \frac{kg NT}{d} \right] \cdot 65\% \left[ \frac{kg TAN}{kg NT} \right] \cdot 0.4 \left[ \frac{kg NH_3 - N}{kg TAN} \right] \cdot \frac{17}{14} \left[ \frac{kg NH_3}{kg NH_3 - N} \right] \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{d}{m^3 \text{ purín}} \right]$$

$$= 0.06 \frac{kg NH_3}{m^3 \text{ purín}}$$

### Emisiones de NO<sub>x</sub>

$$(0.003 + 0.0006) \frac{kg N_2O}{m^3 \text{ purín crudo}} * 0.21 = 0.0008 \frac{kg NO}{m^3 \text{ purín crudo}}$$

### Lixiviación de nitratos

$$NO_3 - N_{leach} \left[ \frac{kg NO_3 - N}{m^3 \text{ purín crudo}} \right] = \frac{N_{applied} \left[ \frac{kg N}{d} \right] \cdot (0.021 \cdot P_{prec+irr} \left[ \frac{mm}{año} \right] - 3.90) \cdot \frac{1}{100}}{V_{Purín \text{ crudo}} \left[ \frac{m^3}{d} \right]} \quad \text{Ec. 12}$$

Aplicando la Ecuación 12:

$$NO_3 - N_{leach} \left[ \frac{kg NO_3 - N}{m^3 \text{ purín crudo}} \right] = \frac{39.33 \left[ \frac{kg N}{d} \right] \cdot (0.021 \cdot 511 \left[ \frac{mm}{año} \right] - 3.90) \cdot \frac{1}{100}}{206.98 \left[ \frac{m^3}{d} \right]} = 0.013 \frac{kg NO_3 - N}{m^3 \text{ raw manure}}$$

### Lixiviación de fósforos

$$P_{leach} \left[ \frac{kg P}{m^3 \text{ purín crudo}} \right] = \frac{P_{applied} \left[ \frac{kg P_2O_5}{d} \right] \cdot P_{lost} \left[ \frac{kg P}{kg P_2O_5} \right]}{V_{Purín \text{ crudo}} \left[ \frac{m^3}{d} \right]} \quad \text{Ec. 13}$$

Aplicando la Ecuación 13:

$$P_{leach} \left[ \frac{kg P}{m^3 \text{ purín crudo}} \right] = \frac{4.97 \left[ \frac{kg P_2O_5}{d} \right] \cdot 0.00184 \left[ \frac{kg P}{kg P_2O_5} \right]}{206.98 \left[ \frac{m^3}{d} \right]}$$

$$= 0.00004 \frac{kg P}{m^3 \text{ raw manure}}$$

### Metales pesados

Tabla 27. Coeficientes de reparto de metales en la biomasa (Fuente: Elaboración propia)

	Coef. reparto metales al fango (%)	Coef. reparto metales al efluente (%)
	En materia particulada	Disuelto en el agua
<b>Cu</b>	75%	25%
<b>Mn</b>	50%	50%
<b>Zn</b>	70%	30%
<b>Fe</b>	50%	50%
<b>K</b>	0%	100%
<b>Na</b>	0%	100%
<b>Pb</b>	90%	10%
<b>Cd</b>	50%	50%

Tabla 28. Concentración de metales (kg/m<sup>3</sup>) en el bioestimulante (Fuente: Elaboración propia)

Concentración en el efluente final	
	kg/m <sup>3</sup>
<b>Cu</b>	0.0027
<b>Mn</b>	0.006
<b>Zn</b>	0.013
<b>Fe</b>	0.048
<b>K</b>	0
<b>Na</b>	0
<b>Pb</b>	0
<b>Cd</b>	0.0001

## Cargas evitadas (Escenario 1)

### Emisiones en la aplicación en el suelo

#### Emisiones directas de N<sub>2</sub>O

$$N_2O_{Direct} - N \left[ \frac{kg N_2O}{m^3 \text{ purín}} \right] = (F_{SN} + F_{ON}) \left[ \frac{kg N_{input}}{d} \right] \cdot EF_1 \left[ \frac{kg N_2O-N}{kg N_{input}} \right] \cdot \frac{44}{28} \left[ \frac{kg N_2O}{kg N_2O-N} \right] \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{d}{m^3 \text{ purín}} \right] \quad \text{Ec. 9}$$

Aplicando la ecuación 9:

$$N_2O_{Direct} - N \left[ \frac{kg N_2O}{m^3 \text{ purín}} \right] = 559.06 \left[ \frac{kg N_{input}}{d} \right] \cdot 0.01 \left[ \frac{kg N_2O - N}{kg N_{efect}} \right] \cdot \frac{44}{28} \left[ \frac{kg N_2O}{kg N_2O - N} \right] \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{d}{m^3 \text{ purín}} \right] = 0.003 \frac{kg N_2O}{m^3}$$

#### Emisiones indirectas de N<sub>2</sub>O

$$N_2O_{Indirect} \left[ \frac{kg N_2O}{m^3 \text{ purín}} \right] = F_{ON} \left[ \frac{kg N_{input}}{d} \right] \cdot \text{Frac}_{GASM} \left[ \frac{kg NH_3-N+NO_x-N_{Volatilized}}{kg N_{input}} \right] \cdot EF_4 \left[ \frac{kg N_2O-N}{kg NH_3-N+NO_x-N_{Volatilized}} \right] \cdot \frac{44}{28} \left[ \frac{kg N_2O}{kg N_2O-N} \right] \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{d}{m^3 \text{ purín}} \right] \quad \text{Ec. 10}$$

Aplicando la Ecuación 10:

$$N_2O_{Indirect} \left[ \frac{kg N_2O}{m^3 \text{ purín}} \right] = 39.33 \left[ \frac{kg N_{input}}{d} \right] \cdot 0.2 \left[ \frac{kg NH_3 - N + NO_x - N_{Volatilized}}{kg N_{input}} \right] \cdot 0.01 \left[ \frac{kg N_2O - N}{kg NH_3 - N + NO_x - N_{Volatilized}} \right] \cdot \frac{44}{28} \left[ \frac{kg N_2O}{kg N_2O - N} \right] \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{d}{m^3 \text{ purín}} \right] = 0.006 \frac{kg N_2O}{m^3}$$

#### Emisiones de NH<sub>3</sub>

$$NH_3 \left[ \frac{kg NH_3}{m^3 \text{ purín}} \right] = NT \left[ \frac{kg NT}{d} \right] \cdot FE \left[ \frac{kg NH_3-N}{kg NT} \right] \cdot \frac{17}{14} \left[ \frac{kg NH_3}{kg NH_3-N} \right] \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{d}{m^3 \text{ purín}} \right] \quad \text{Ec. 14}$$

Aplicando la Ecuación 11:

$$NH_3 \left[ \frac{kg NH_3}{m^3 \text{ purín}} \right] = 39.33 \left[ \frac{kg NT}{d} \right] \cdot 0.02 \left[ \frac{kg NH_3 - N}{kg NT} \right] \cdot \frac{17}{14} \left[ \frac{kg NH_3}{kg NH_3 - N} \right] \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{d}{m^3 \text{ purín}} \right] = 0.005 \frac{kg NH_3}{d}$$

### Emisiones de NO<sub>x</sub>

$$(0.003 + 0.006) \frac{kg N_2O}{m^3 \text{ purín crudo}} * 0.21 = 0.0008 \frac{kg NO}{m^3 \text{ purín crudo}}$$

### Lixiviación de nitratos

$$NO_3 - N_{leach} \left[ \frac{kg NO_3 - N}{m^3 \text{ purín crudo}} \right] = \frac{N_{applied} \left[ \frac{kg N}{d} \right] \cdot \left( 0.021 \cdot P_{prec+irr} \left[ \frac{mm}{año} \right] - 3.90 \right) \cdot \frac{1}{100}}{V_{purín \text{ crudo}} \left[ \frac{m^3}{d} \right]} \quad \text{Ec. 12}$$

Aplicando la Ecuación 12:

$$NO_3 - N_{leach} \left[ \frac{kg NO_3 - N}{m^3 \text{ purín crudo}} \right] = \frac{39.33 \left[ \frac{kg N}{d} \right] \cdot \left( 0.021 * 511 \left[ \frac{mm}{year} \right] - 3.90 \right) \cdot \frac{1}{100}}{206.98 \left[ \frac{m^3}{d} \right]} = 0.013 \frac{kg NO_3 - N}{m^3 \text{ purín crudo}}$$

### Lixiviación de fósforos

$$P_{leach} \left[ \frac{kg P}{m^3 \text{ purín crudo}} \right] = \frac{P_{applied} \left[ \frac{kg P_2O_5}{d} \right] \cdot P_{lost} \left[ \frac{kg P}{kg P_2O_5} \right]}{V_{purín \text{ crudo}} \left[ \frac{m^3}{d} \right]} \quad \text{Ec. 13}$$

Aplicando la Ecuación 13:

$$P_{leach} \left[ \frac{kg P}{m^3 \text{ purín crudo}} \right] = \frac{4.97 \left[ \frac{kg P_2O_5}{d} \right] \cdot 0.00048 \left[ \frac{kg P}{kg P_2O_5} \right]}{206.98 \left[ \frac{m^3}{d} \right]} \\ = 1.15 \cdot 10^{-15} \frac{kg P}{m^3 \text{ purín crudo}}$$

### Metales Pesados

$$Amount \ of \ Syn \ Fertilizer \ \left[ \frac{kg \ Product}{m^3 \ Raw \ manure} \right] \cdot Heavy \ metal \ \left[ \frac{mg \ Heavy \ metal}{kg \ Product} \right] \cdot \frac{1}{10^3} \left[ \frac{kg \ Heavy \ metal}{mg \ Heavy \ metal} \right] = Heavy \ metal_{Syn \ Fertilizer} \ \left[ \frac{kg \ Heavy \ metal}{m^3 \ raw \ manure} \right] \quad \text{Ec. 17}$$

Tabla 29. Concentraciones de metales pesados en los fertilizantes químicos (Fuente: Corbala et al (2018) [1])

Metales	mg/kg de producto	
	Mix fertilizante	Superfosfato triple
Cu	0.05	6.31
Mn	0.004	28.57
Zn	0.18	15.47
Fe	2.89	357.89
K	1.35	14.86
Na	0.03	21.13
Pb	0.12	231.52
Cd	0.002	0.02

Aplicando la Ecuación 17 para las concentraciones de la Tabla 13. Así, para el N:





$$K \left[ \frac{kg K}{m^3 \text{ raw manure}} \right] = 0.029 \left[ \frac{kg \text{ Product}}{m^3 \text{ Raw manure}} \right] \cdot 14.86 \left[ \frac{mg_{\text{Heavy metal}}}{kg \text{ Product}} \right] \cdot \frac{1}{10^6} \left[ \frac{kg \text{ Heavy metal}}{mg \text{ Heavy metal}} \right]$$

$$= 4.26 \cdot 10^{-7} \frac{kg K}{m^3 \text{ raw manure}}$$

$$Na \left[ \frac{kg Na}{m^3 \text{ raw manure}} \right] = 0.029 \left[ \frac{kg \text{ Product}}{m^3 \text{ Raw manure}} \right] \cdot 21.13 \left[ \frac{mg_{\text{Heavy metal}}}{kg \text{ Product}} \right] \cdot \frac{1}{10^6} \left[ \frac{kg \text{ Heavy metal}}{mg \text{ Heavy metal}} \right]$$

$$= 6.06 \cdot 10^{-7} \frac{kg Na}{m^3 \text{ raw manure}}$$

$$Pb \left[ \frac{kg Pb}{m^3 \text{ raw manure}} \right] = 0.029 \left[ \frac{kg \text{ Product}}{m^3 \text{ Raw manure}} \right] \cdot 231.52 \left[ \frac{mg_{\text{Heavy metal}}}{kg \text{ Product}} \right] \cdot \frac{1}{10^6} \left[ \frac{kg \text{ Heavy metal}}{mg \text{ Heavy metal}} \right]$$

$$= 6.64 \cdot 10^{-6} \frac{kg Pb}{m^3 \text{ raw manure}}$$

$$Cd \left[ \frac{kg Cd}{m^3 \text{ raw manure}} \right] = 0.029 \left[ \frac{kg \text{ Product}}{m^3 \text{ Raw manure}} \right] \cdot 0.02 \left[ \frac{mg_{\text{Heavy metal}}}{kg \text{ Product}} \right] \cdot \frac{1}{10^6} \left[ \frac{kg \text{ Heavy metal}}{mg \text{ Heavy metal}} \right]$$

$$= 5.74 \cdot 10^{-10} \frac{kg Cd}{m^3 \text{ raw manure}}$$

## Emisiones escenario 0

### Emisiones directas de N<sub>2</sub>O

$$N_2O_{\text{Direct}} - N \left[ \frac{kg N_2O}{m^3 \text{ purín}} \right] =$$

$$(F_{SN} + F_{ON}) \left[ \frac{kg N_{\text{input}}}{d} \right] \cdot EF_1 \left[ \frac{kg N_2O-N}{kg N_{\text{input}}} \right] \cdot \frac{44}{28} \left[ \frac{kg N_2O}{kg N_2O-N} \right] \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{d}{m^3 \text{ purín}} \right] \quad \text{Ec. 9}$$

Aplicando la Ecuación 9:

$$N_2O_{\text{Direct}} - N \left[ \frac{kg N_2O}{m^3} \right] =$$

$$1059.72 \left[ \frac{kg N_{\text{input}}}{d} \right] \cdot 0.01 \left[ \frac{kg N_2O-N}{kg N_{\text{input}}} \right] \cdot \frac{44}{28} \left[ \frac{kg N_2O}{kg N_2O-N} \right] \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{d}{m^3 \text{ purín}} \right] = 0.08 \frac{kg N_2O}{m^3 \text{ purín crudo}}$$

### Emisiones indirectas de N<sub>2</sub>O

$$N_2O_{\text{Indirect}} \left[ \frac{kg N_2O}{m^3 \text{ purín}} \right] =$$

$$F_{ON} \left[ \frac{kg N_{\text{input}}}{d} \right] \cdot \text{Frac}_{\text{GASM}} \left[ \frac{kg NH_3-N+NO_x-N_{\text{Volatilized}}}{kg N_{\text{input}}} \right] \cdot EF_4 \left[ \frac{kg N_2O-N}{kg NH_3-N+NO_x-N_{\text{Volatilized}}} \right] \cdot \frac{44}{28} \left[ \frac{kg N_2O}{kg N_2O-N} \right] \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{d}{m^3 \text{ purín}} \right] \quad \text{Ec. 10}$$

Aplicando la Ecuación 10:

$$N_2O_{\text{Indirect}} \left[ \frac{kg N_2O}{m^3 \text{ purín}} \right] =$$

$$1059.72 \left[ \frac{kg N_{\text{input}}}{d} \right] \cdot 0.2 \left[ \frac{kg NH_3-N+NO_x-N_{\text{Volatilized}}}{kg N_{\text{input}}} \right] \cdot 0.01 \left[ \frac{kg N_2O-N}{kg NH_3-N+NO_x-N_{\text{Volatilized}}} \right] \cdot \frac{44}{28} \left[ \frac{kg N_2O}{kg N_2O-N} \right] \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{d}{m^3 \text{ purín}} \right]$$

$$= 0.016 \frac{kg N_2O}{m^3 \text{ purín crudo}}$$

### Emisiones de NH<sub>3</sub>

$$NH_3 \left[ \frac{kg NH_3}{m^3 \text{ purín}} \right] = NT \left[ \frac{kg NT}{d} \right] \cdot 65\% \left[ \frac{kg TAN}{kg NT} \right] \cdot FE \left[ \frac{kg NH_3-N}{kg TAN} \right] \cdot \frac{17}{14} \left[ \frac{kg NH_3}{kg NH_3-N} \right] \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{d}{m^3 \text{ purín}} \right] \quad \text{Ec. 11}$$

Aplicando la Ecuación 11:

$$\frac{kg NH_3}{m^3 \text{ purín}} = 1059.72 \left[ \frac{kg NT}{d} \right] \cdot 65\% \left[ \frac{kg TAN}{kg NT} \right] \cdot 0.4 \left[ \frac{kg NH_3 - N}{kg TAN} \right] \cdot \frac{17}{14} \left[ \frac{kg NH_3}{kg NH_3 - N} \right] \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{d}{m^3 \text{ purín}} \right]$$

$$= 1.62 \frac{kg NH_3}{m^3 \text{ purín crudo}}$$

### Emisiones de NO<sub>x</sub>

$$(0.08 + 0.016) \frac{kg N_2O}{m^3 \text{ purín crudo}} * 0.21 = 0.02 \frac{kg NO}{m^3 \text{ purín crudo}}$$

### Lixiviación de nitratos

$$NO_3 - N_{leach} \left[ \frac{kg NO_3 - N}{m^3 \text{ purín crudo}} \right] = \frac{N_{applied} \left[ \frac{kg N}{d} \right] \cdot \left( 0.021 \cdot P_{prec+irr} \left[ \frac{mm}{año} \right] - 3.90 \right) \cdot \frac{1}{100}}{V_{Purín \text{ crudo}} \left[ \frac{m^3}{d} \right]} \quad \text{Ec. 12}$$

Aplicando la Ecuación 12:

$$NO_3 - N_{leach} \left[ \frac{kg NO_3 - N}{m^3 \text{ purín crudo}} \right] = \frac{1059.72 \left[ \frac{kg N}{d} \right] \cdot \left( 0.021 * 511 \left[ \frac{mm}{year} \right] - 3.90 \right) \cdot \frac{1}{100}}{206.98 \left[ \frac{m^3}{d} \right]}$$

$$= 0.35 \frac{kg NO_3 - N}{m^3 \text{ raw manure}}$$

### Lixiviación de fósforos

$$P_{leach} \left[ \frac{kg P}{m^3 \text{ purín crudo}} \right] = \frac{P_{applied} \left[ \frac{kg P_2O_5}{d} \right] \cdot P_{lost} \left[ \frac{kg P}{kg P_2O_5} \right]}{V_{Purín \text{ crudo}} \left[ \frac{m^3}{d} \right]} \quad \text{Ec. 13}$$

Aplicando la Ecuación 13:

$$P_{leach} \left[ \frac{kg P}{m^3 \text{ purín crudo}} \right] = \frac{3.6 \left[ \frac{kg P_2O_5}{d} \right] \cdot 0.00184 \left[ \frac{kg P}{kg P_2O_5} \right]}{206.98 \left[ \frac{m^3}{d} \right]}$$

$$= 0.00032 \frac{kg P}{m^3 \text{ purín crudo}}$$

### Metales pesados

Tabla 30. Concentración de metales pesados en masa de purín seco (Fuente: Elaboración propia)

Metal Pesado	mg metal / kg DM
Cu	1428.57
Mn	2261.90
Zn	5952.38
Fe	19047.62
K	345238.10
Na	79761.90
Pb	0
Cd	32.14

$$\rho_{\text{Purin crudo}} \left[ \frac{\text{kg Purin crudo}}{\text{m}^3 \text{ Purin crudo}} \right] \cdot DM \left[ \frac{\text{kg DM}}{\text{kg purin crudo}} \right] \cdot \text{Metal pesado} \left[ \frac{\text{mg metal pesado}}{\text{kg DM}} \right] \cdot \frac{1}{10^6} \left[ \frac{\text{kg Metal pesado}}{\text{mg Metal pesado}} \right] =$$

Ec. 16

Tabla 31. Concentración metales pesados en el purín crudo (Fuente: Elaboración propia)

Metal Pesado	kg/m <sup>3</sup>
Cu	0.0144
Mn	0.0227
Zn	0.0598
Fe	0.1915
K	3.4709
Na	0.8019
Pb	0
Cd	0.0003

## Cargas evitadas (Escenario 0)

### Emisiones en la aplicación en el suelo

#### Emisiones directas de N<sub>2</sub>O

$$N_2O_{\text{Direct}} - N \left[ \frac{\text{kg } N_2O}{\text{m}^3 \text{ purín}} \right] =$$

$$(F_{SN} + F_{ON}) \left[ \frac{\text{kg } N_{\text{input}}}{d} \right] \cdot EF_1 \left[ \frac{\text{kg } N_2O-N}{\text{kg } N_{\text{input}}} \right] \cdot \frac{44}{28} \left[ \frac{\text{kg } N_2O}{\text{kg } N_2O-N} \right] \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{d}{\text{m}^3 \text{ purín}} \right]$$

Ec. 9

Aplicando la ecuación 9:

$$N_2O_{\text{Direct}} - N \left[ \frac{\text{kg } N_2O}{\text{m}^3 \text{ purín}} \right] =$$

$$1059.72 \left[ \frac{\text{kg } N_{\text{input}}}{d} \right] \cdot 0.01 \left[ \frac{\text{kg } N_2O - N}{\text{kg } N_{\text{efect}}} \right] \cdot \frac{44}{28} \left[ \frac{\text{kg } N_2O}{\text{kg } N_2O - N} \right] \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{d}{\text{m}^3 \text{ purín}} \right] = 0.08 \frac{\text{kg } N_2O}{\text{m}^3}$$

#### Emisiones indirectas de N<sub>2</sub>O

$$N_2O_{\text{Indirect}} \left[ \frac{\text{kg } N_2O}{\text{m}^3 \text{ purín}} \right] =$$

$$F_{ON} \left[ \frac{\text{kg } N_{\text{input}}}{d} \right] \cdot \text{Frac}_{\text{GasM}} \left[ \frac{\text{kg } NH_3-N+NO_x-N_{\text{Volatilized}}}{\text{kg } N_{\text{input}}} \right] \cdot EF_4 \left[ \frac{\text{kg } N_2O-N}{\text{kg } NH_3-N+NO_x-N_{\text{Volatilized}}} \right] \cdot \frac{44}{28} \left[ \frac{\text{kg } N_2O}{\text{kg } N_2O-N} \right] \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{d}{\text{m}^3 \text{ purín}} \right]$$

Ec. 10

Aplicando la Ecuación 10:

$$N_2O_{\text{Indirect}} \left[ \frac{\text{kg } N_2O}{\text{m}^3 \text{ purín}} \right] =$$

$$1059.72 \left[ \frac{\text{kg } N_{\text{input}}}{d} \right] \cdot 0.2 \left[ \frac{\text{kg } NH_3 - N + NO_x - N_{\text{Volatilized}}}{\text{kg } N_{\text{input}}} \right] \cdot 0.01 \left[ \frac{\text{kg } N_2O - N}{\text{kg } NH_3 - N + NO_x - N_{\text{Volatilized}}} \right] \cdot \frac{44}{28} \left[ \frac{\text{kg } N_2O}{\text{kg } N_2O - N} \right] \cdot \frac{d}{206.98 \text{ m}^3 \text{ purín}}$$

$$= 0.016 \frac{\text{kg } N_2O}{\text{m}^3 \text{ purin crudo}}$$

### Emisiones de NH<sub>3</sub>

$$NH_3 \left[ \frac{kg NH_3}{m^3 \text{ purín}} \right] = NT \left[ \frac{kg NT}{d} \right] \cdot FE \left[ \frac{kg NH_3 - N}{kg NT} \right] \cdot \frac{17}{14} \left[ \frac{kg NH_3}{kg NH_3 - N} \right] \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{d}{m^3 \text{ purín}} \right] \quad \text{Ec. 14}$$

Aplicando la Ecuación 14:

$$\begin{aligned} NH_3 \left[ \frac{kg NH_3}{m^3 \text{ purín}} \right] &= 1059.72 \left[ \frac{kg NT}{d} \right] \cdot 0.02 \left[ \frac{kg NH_3 - N}{kg NT} \right] \cdot \frac{17}{14} \left[ \frac{kg NH_3}{kg NH_3 - N} \right] \cdot \frac{1}{206.98} \left[ \frac{d}{m^3 \text{ purín}} \right] = \\ &= \mathbf{0.12} \frac{kg NH_3}{d} \end{aligned}$$

### Emisiones de NO<sub>x</sub>

$$(0.08 + 0.016) \frac{kg N_2O}{m^3 \text{ purín crudo}} * 0.21 = \mathbf{0.02} \frac{kg NO}{m^3 \text{ purín crudo}}$$

### Lixiviación de nitratos

$$NO_3 - N_{leach} \left[ \frac{kg NO_3 - N}{m^3 \text{ purín crudo}} \right] = \frac{N_{applied} \left[ \frac{kg N}{d} \right] \cdot \left( 0.021 \cdot P_{prec+irr} \left[ \frac{mm}{año} \right] - 3.90 \right) \cdot \frac{1}{100}}{V_{purín \text{ crudo}} \left[ \frac{m^3}{d} \right]} \quad \text{Ec. 12}$$

Aplicando la Ecuación 12:

$$NO_3 - N_{leach} \left[ \frac{kg NO_3 - N}{m^3 \text{ purín crudo}} \right] = \frac{1059.72 \left[ \frac{kg N}{d} \right] \cdot \left( 0.021 * 511 \left[ \frac{mm}{year} \right] - 3.90 \right) \cdot \frac{1}{100}}{206.98 \left[ \frac{m^3}{d} \right]} = \mathbf{0.35} \frac{kg NO_3 - N}{m^3 \text{ purín crudo}}$$

### Lixiviación de fósforos

$$P_{leach} \left[ \frac{kg P}{m^3 \text{ purín crudo}} \right] = \frac{P_{applied} \left[ \frac{kg P_2O_5}{d} \right] \cdot P_{lost} \left[ \frac{kg P}{kg P_2O_5} \right]}{V_{purín \text{ crudo}} \left[ \frac{m^3}{d} \right]} \quad \text{Ec. 13}$$

Aplicando la Ecuación 13:

$$\begin{aligned} P_{leach} \left[ \frac{kg P}{m^3 \text{ purín crudo}} \right] &= \frac{36 \left[ \frac{kg P_2O_5}{d} \right] \cdot 0.00048 \left[ \frac{kg P}{kg P_2O_5} \right]}{206.98 \left[ \frac{m^3}{d} \right]} \\ &= \mathbf{0.00008} \frac{kg P}{m^3 \text{ purín crudo}} \end{aligned}$$

### Metales Pesados

$$\text{cantidad de fertilizante} \left[ \frac{kg \text{ Producto}}{m^3 \text{ purín crud}} \right] \cdot \text{metal pesado} \left[ \frac{mg \text{ metal pesado}}{kg \text{ producto}} \right] \cdot \frac{1}{10^6} \left[ \frac{kg \text{ metal pesado}}{mg \text{ metal pesado}} \right] = \text{Metal pesado}_{fertilizante} \left[ \frac{kg \text{ metal pesado}}{m^3 \text{ purín}} \right] \quad \text{Ec.15}$$

Tabla 32. Concentraciones de metales pesados en los fertilizantes químicos (Fuente: Corbala et al (2018) [1])

Metales	mg/kg de producto	
	Mix fertilizante	Superfosfato triple
<b>Cu</b>	0.05	6.31
<b>Mn</b>	0.004	28.57
<b>Zn</b>	0.18	15.47
<b>Fe</b>	2.89	357.89
<b>K</b>	1.35	14.86
<b>Na</b>	0.03	21.13
<b>Pb</b>	0.12	231.52
<b>Cd</b>	0.002	0.02

Se aplica la Ecuación 15 para las concentraciones de la Tabla 13. Así, para el N:

$$Cu \left[ \frac{kg\ Cu}{m^3\ raw\ manure} \right] = 9.34 \left[ \frac{kg\ Product}{m^3\ Raw\ manure} \right] \cdot 0.05 \left[ \frac{mg_{Heavy\ metal}}{kg\ Product} \right] \cdot \frac{1}{10^6} \left[ \frac{kg\ Heavy\ metal}{mg\ Heavy\ metal} \right]$$

$$= 5.1 \cdot 10^{-7} \frac{kg\ Cu}{m^3\ raw\ manure}$$

$$Mn \left[ \frac{kg\ Mn}{m^3\ raw\ manure} \right] = 9.34 \left[ \frac{kg\ Product}{m^3\ Raw\ manure} \right] \cdot 0.004 \left[ \frac{mg_{Heavy\ metal}}{kg\ Product} \right] \cdot \frac{1}{10^3} \left[ \frac{kg\ Heavy\ metal}{mg\ Heavy\ metal} \right]$$

$$= 4.16 \cdot 10^{-8} \frac{kg\ Mn}{m^3\ raw\ manure}$$

$$Zn \left[ \frac{kg\ Zn}{m^3\ raw\ manure} \right] = 9.34 \left[ \frac{kg\ Product}{m^3\ Raw\ manure} \right] \cdot 0.18 \left[ \frac{mg_{Heavy\ metal}}{kg\ Product} \right] \cdot \frac{1}{10^6} \left[ \frac{kg\ Heavy\ metal}{mg\ Heavy\ metal} \right]$$

$$= 1.64 \cdot 10^{-6} \frac{kg\ Zn}{m^3\ raw\ manure}$$

$$Fe \left[ \frac{kg\ Fe}{m^3\ raw\ manure} \right] = 9.34 \left[ \frac{kg\ Product}{m^3\ Raw\ manure} \right] \cdot 2.89 \left[ \frac{mg_{Heavy\ metal}}{kg\ Product} \right] \cdot \frac{1}{10^6} \left[ \frac{kg\ Heavy\ metal}{mg\ Heavy\ metal} \right]$$

$$= 2.7 \cdot 10^{-5} \frac{kg\ Fe}{m^3\ raw\ manure}$$

$$K \left[ \frac{kg\ K}{m^3\ raw\ manure} \right] = 9.34 \left[ \frac{kg\ Product}{m^3\ Raw\ manure} \right] \cdot 1.35 \left[ \frac{mg_{Heavy\ metal}}{kg\ Product} \right] \cdot \frac{1}{10^6} \left[ \frac{kg\ Heavy\ metal}{mg\ Heavy\ metal} \right]$$

$$= 1.26 \cdot 10^{-5} \frac{kg\ K}{m^3\ raw\ manure}$$

$$Na \left[ \frac{kg\ Na}{m^3\ raw\ manure} \right] = 9.34 \left[ \frac{kg\ Product}{m^3\ Raw\ manure} \right] \cdot 0.03 \left[ \frac{mg_{Heavy\ metal}}{kg\ Product} \right] \cdot \frac{1}{10^6} \left[ \frac{kg\ Heavy\ metal}{mg\ Heavy\ metal} \right]$$

$$= 2.74 \cdot 10^{-7} \frac{kg\ Na}{m^3\ raw\ manure}$$

$$Pb \left[ \frac{kg\ Pb}{m^3\ raw\ manure} \right] = 9.34 \left[ \frac{kg\ Product}{m^3\ Raw\ manure} \right] \cdot 0.12 \left[ \frac{mg_{Heavy\ metal}}{kg\ Product} \right] \cdot \frac{1}{10^6} \left[ \frac{kg\ Heavy\ metal}{mg\ Heavy\ metal} \right]$$

$$= 1.11 \cdot 10^{-6} \frac{kg\ Pb}{m^3\ raw\ manure}$$

$$Cd \left[ \frac{kg\ Cd}{m^3\ raw\ manure} \right] = 9.34 \left[ \frac{kg\ Product}{m^3\ Raw\ manure} \right] \cdot 0.002 \left[ \frac{mg_{Heavy\ metal}}{kg\ Product} \right] \cdot \frac{1}{10^6} \left[ \frac{kg\ Heavy\ metal}{mg\ Heavy\ metal} \right]$$

$$= 1.59 \cdot 10^{-8} \frac{kg\ Cd}{m^3\ raw\ manure}$$

Para el Superfosfato triple:



$$\begin{aligned} \text{Cu} \left[ \frac{\text{kg Cu}}{\text{m}^3 \text{ raw manure}} \right] &= 0.17 \left[ \frac{\text{kg Product}}{\text{m}^3 \text{ Raw manure}} \right] \cdot 6.31 \left[ \frac{\text{mg}_{\text{Heavy metal}}}{\text{kg Product}} \right] \cdot \frac{1}{10^6} \left[ \frac{\text{kg Heavy metal}}{\text{mg Heavy metal}} \right] \\ &= 1.1 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg Cu}}{\text{m}^3 \text{ raw manure}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Mn} \left[ \frac{\text{kg Mn}}{\text{m}^3 \text{ raw manure}} \right] &= 0.17 \left[ \frac{\text{kg Product}}{\text{m}^3 \text{ Raw manure}} \right] \cdot 28.57 \left[ \frac{\text{mg}_{\text{Heavy metal}}}{\text{kg Product}} \right] \cdot \frac{1}{10^6} \left[ \frac{\text{kg Heavy metal}}{\text{mg Heavy metal}} \right] \\ &= 4.97 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg Mn}}{\text{m}^3 \text{ raw manure}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Zn} \left[ \frac{\text{kg Zn}}{\text{m}^3 \text{ raw manure}} \right] &= 0.17 \left[ \frac{\text{kg Product}}{\text{m}^3 \text{ Raw manure}} \right] \cdot 15.47 \left[ \frac{\text{mg}_{\text{Heavy metal}}}{\text{kg Product}} \right] \cdot \frac{1}{10^6} \left[ \frac{\text{kg Heavy metal}}{\text{mg Heavy metal}} \right] \\ &= 2.69 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg Zn}}{\text{m}^3 \text{ raw manure}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Fe} \left[ \frac{\text{kg Fe}}{\text{m}^3 \text{ raw manure}} \right] &= 0.17 \left[ \frac{\text{kg Product}}{\text{m}^3 \text{ Raw manure}} \right] \cdot 357.89 \left[ \frac{\text{mg}_{\text{Heavy metal}}}{\text{kg Product}} \right] \cdot \frac{1}{10^6} \left[ \frac{\text{kg Heavy metal}}{\text{mg Heavy metal}} \right] \\ &= 6.23 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kg Fe}}{\text{m}^3 \text{ raw manure}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{K} \left[ \frac{\text{kg K}}{\text{m}^3 \text{ raw manure}} \right] &= 0.17 \left[ \frac{\text{kg Product}}{\text{m}^3 \text{ Raw manure}} \right] \cdot 14.86 \left[ \frac{\text{mg}_{\text{Heavy metal}}}{\text{kg Product}} \right] \cdot \frac{1}{10^6} \left[ \frac{\text{kg Heavy metal}}{\text{mg Heavy metal}} \right] \\ &= 2.59 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg K}}{\text{m}^3 \text{ raw manure}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Na} \left[ \frac{\text{kg Na}}{\text{m}^3 \text{ raw manure}} \right] &= 0.17 \left[ \frac{\text{kg Product}}{\text{m}^3 \text{ Raw manure}} \right] \cdot 21.13 \left[ \frac{\text{mg}_{\text{Heavy metal}}}{\text{kg Product}} \right] \cdot \frac{1}{10^6} \left[ \frac{\text{kg Heavy metal}}{\text{mg Heavy metal}} \right] \\ &= 3.68 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg Na}}{\text{m}^3 \text{ raw manure}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Pb} \left[ \frac{\text{kg Pb}}{\text{m}^3 \text{ raw manure}} \right] &= 0.17 \left[ \frac{\text{kg Product}}{\text{m}^3 \text{ Raw manure}} \right] \cdot 231.52 \left[ \frac{\text{mg}_{\text{Heavy metal}}}{\text{kg Product}} \right] \cdot \frac{1}{10^6} \left[ \frac{\text{kg Heavy metal}}{\text{mg Heavy metal}} \right] \\ &= 4.03 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kg Pb}}{\text{m}^3 \text{ raw manure}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Cd} \left[ \frac{\text{kg Cd}}{\text{m}^3 \text{ raw manure}} \right] &= 0.17 \left[ \frac{\text{kg Product}}{\text{m}^3 \text{ Raw manure}} \right] \cdot 0.02 \left[ \frac{\text{mg}_{\text{Heavy metal}}}{\text{kg Product}} \right] \cdot \frac{1}{10^6} \left[ \frac{\text{kg Heavy metal}}{\text{mg Heavy metal}} \right] \\ &= 3.48 \cdot 10^{-9} \frac{\text{kg Cd}}{\text{m}^3 \text{ raw manure}} \end{aligned}$$



Tabla 33. Factores de emisión de metano procedentes de gestión de purín de cerdo (Fuente: IPCC 2006)

Table 10A-7 Manure Management Methane Emission Factor Derivation for Market Swine												
Annual Average Temperature (°C)		Manure Management System MCFs										
		Lagoon <sup>1</sup>	Liquid/Slurry <sup>1</sup>	Solid Storage	Drylot	Pit <1 month	Pit >1 month	Daily Spread	Digester	Other		
Cool	10	66%	17%	2.0%	1.0%	3.0%	17%	0.1%	10.0%	1.0%		
	11	68%	19%	2.0%	1.0%	3.0%	19%	0.1%	10.0%	1.0%		
	12	70%	20%	2.0%	1.0%	3.0%	20%	0.1%	10.0%	1.0%		
	13	71%	22%	2.0%	1.0%	3.0%	22%	0.1%	10.0%	1.0%		
	14	73%	25%	2.0%	1.0%	3.0%	25%	0.1%	10.0%	1.0%		
Temp	15	74%	27%	4.0%	1.5%	3.0%	27%	0.5%	10.0%	1.0%		
	16	75%	29%	4.0%	1.5%	3.0%	29%	0.5%	10.0%	1.0%		
	17	76%	32%	4.0%	1.5%	3.0%	32%	0.5%	10.0%	1.0%		
	18	77%	35%	4.0%	1.5%	3.0%	35%	0.5%	10.0%	1.0%		
	19	77%	39%	4.0%	1.5%	3.0%	39%	0.5%	10.0%	1.0%		
	20	78%	42%	4.0%	1.5%	3.0%	42%	0.5%	10.0%	1.0%		
	21	78%	46%	4.0%	1.5%	3.0%	46%	0.5%	10.0%	1.0%		
	22	78%	50%	4.0%	1.5%	3.0%	50%	0.5%	10.0%	1.0%		
	23	79%	55%	4.0%	1.5%	3.0%	55%	0.5%	10.0%	1.0%		
	24	79%	60%	4.0%	1.5%	3.0%	60%	0.5%	10.0%	1.0%		
	25	79%	65%	4.0%	1.5%	3.0%	65%	0.5%	10.0%	1.0%		
Warm	26	79%	71%	5.0%	2.0%	30.0%	71%	1.0%	10.0%	1.0%		
	27	80%	78%	5.0%	2.0%	30.0%	78%	1.0%	10.0%	1.0%		
	28	80%	80%	5.0%	2.0%	30.0%	80%	1.0%	10.0%	1.0%		
Region	Market Swine Characteristics			Manure Management System Usage (MS%)								
	Mass <sup>a</sup> kg	B <sub>0</sub> <sup>b</sup> m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg VS	VS <sup>c</sup> kg/hd/day	Lagoon	Liquid/Slurry	Solid Storage	Drylot	Pit <1 month	Pit >1 month	Daily Spread	Digester	Other
North America	46	0.48	0.27	32.8%	18.5%	4.2%	4.0%	0.0%	40.6%	0.0%	0.0%	0.0%
Western Europe	50	0.45	0.3	8.7%	0.0%	13.7%	0.0%	2.8%	69.8%	2.0%	0.0%	3.0%
Eastern Europe	50	0.45	0.3	3.0%	0.0%	42.0%	0.0%	24.7%	24.7%	0.0%	0.0%	5.7%
Oceania	45	0.45	0.28	54.0%	0.0%	3.0%	15.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	28.0%
Latin America	28	0.29	0.3	0.0%	8.0%	10.0%	41.0%	0.0%	0.0%	2.0%	0.0%	40.0%
Africa	28	0.29	0.3	0.0%	6.0%	6.0%	87.0%	1.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Middle East	28	0.29	0.3	0.0%	14.0%	0.0%	69.0%	0.0%	17.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Asia	28	0.29	0.3	0.0%	40.0%	0.0%	54.0%	0.0%	0.0%	0.0%	7.0%	0.0%
Indian Subcontinent	28	0.29	0.3	9.0%	22.0%	16.0%	30.0%	3.0%	0.0%	9.0%	8.0%	3.0%

<sup>a</sup> Average market swine mass for each region (default estimates are ≈20%)  
<sup>b</sup> B<sub>0</sub> estimates are ≈15%  
<sup>c</sup> Average VS production per head per day for the average market swine (default estimates are ≈25%)

Emission Factors (EF) for each region are calculated based on eq.10.23.

<sup>1</sup> Lagoon and Liquid/Slurry MCFs are calculated based on the van't Hoff-Arrhenius equation relating temperature to biological activity. Lagoon MCFs are also calculated based on longer (up to a year) retention times. [Mangino, et al (2001)]

Sources: For North America, mass, VS, and B<sub>0</sub> values are from Safley (2000), USDA's Agricultural Waste Management Field Handbook, and Hashimoto (1984), respectively. North American manure management system usage data are estimated using data from the 1992 and 1997 USDA's Census of Agriculture and National Animal Health Monitoring System Reports. For Western and Eastern Europe manure management system usage, mass of animals, B<sub>0</sub> and VS values based on the analysis of national GHG inventories of Annex I countries submitted to the secretariat UNFCCC in 2004. For the rest of the world, swine feed intake data are from Crutzen et. al (1986), and manure management system usage and B<sub>0</sub> estimates are from Safley et. al (1992). Methane conversion factor data are from Woodbury and Hashimoto (1993). MCFs for lagoons and liquid/slurry systems are based on data obtained from an analysis of these systems in the United States.

Tabla 34. Factores de emisión para emisiones directas de N<sub>2</sub>O para tratamiento de purín (Fuente: IPCC 2006)

TABLE 10.21 DEFAULT EMISSION FACTORS FOR DIRECT N <sub>2</sub> O EMISSIONS FROM MANURE MANAGEMENT				
System	Definition	EF <sub>3</sub> [kg N <sub>2</sub> O-N (kg Nitrogen excreted) <sup>-1</sup> ]	Uncertainty ranges of EF <sub>3</sub>	Source <sup>a</sup>
Pasture/Range/ Paddock	The manure from pasture and range grazing animals is allowed to lie as is, and is not managed.	Direct and indirect N <sub>2</sub> O emissions associated with the manure deposited on agricultural soils and pasture, range, paddock systems are treated in Chapter 11, Section 11.2, N <sub>2</sub> O emissions from managed soils.		
Pit storage below animal confinements	Collection and storage of manure usually with little or no added water typically below a slatted floor in an enclosed animal confinement facility.	0.002	Factor of 2	Judgement of IPCC Expert Group in combination with the following studies: Amon <i>et al.</i> (2001), Kulling (2003), and Sneath <i>et al.</i> (1997).

Tabla 35. Factores de emisión para emisiones indirectas de N<sub>2</sub>O (Fuente IPCC 2006)

Factor	Default value	Uncertainty range
EF <sub>4</sub> [N volatilisation and re-deposition], kg N <sub>2</sub> O-N (kg NH <sub>3</sub> -N + NO <sub>x</sub> -N volatilised) <sup>-1,22</sup>	0.010	0.002 - 0.05
EF <sub>5</sub> [leaching/runoff], kg N <sub>2</sub> O-N (kg N leaching/runoff) <sup>-1,23</sup>	0.0075	0.0005 - 0.025
Frac <sub>GASF</sub> [Volatilisation from synthetic fertiliser], (kg NH <sub>3</sub> -N + NO <sub>x</sub> -N) (kg N applied) <sup>-1</sup>	0.10	0.03 - 0.3
Frac <sub>GASM</sub> [Volatilisation from all organic N fertilisers applied, and dung and urine deposited by grazing animals], (kg NH <sub>3</sub> -N + NO <sub>x</sub> -N) (kg N applied or deposited) <sup>-1</sup>	0.20	0.05 - 0.5
Frac <sub>LEACH-(H)</sub> [N losses by leaching/runoff for regions where Σ(rain in rainy season) - Σ(PE in same period) > soil water holding capacity, OR where irrigation (except drip irrigation) is employed], kg N (kg N additions or deposition by grazing animals) <sup>-1</sup>	0.30	0.1 - 0.8
<p>Note: The term Frac<sub>LEACH</sub> previously used has been modified so that it now only applies to regions where soil water-holding capacity is exceeded, as a result of rainfall and/or irrigation (excluding drip irrigation), and leaching/runoff occurs, and redesignated as Frac<sub>LEACH-(H)</sub>. In the definition of Frac<sub>LEACH-(H)</sub> above, PE is potential evaporation, and the rainy season(s) can be taken as the period(s) when rainfall &gt; 0.5 * Pan Evaporation. (Explanations of potential and pan evaporation are available in standard meteorological and agricultural texts). For other regions the default Frac<sub>LEACH</sub> is taken as zero.</p>		

Tabla 36. Factores de emisión para emisiones de Amonio, metodología Tier 2 (Fuente: EMEP-EEA, cap 3B)

Table 3.9 Default Tier 2 NH<sub>3</sub>-N EFs and associated parameters for the Tier 2 methodology for the calculation of the NH<sub>3</sub>-N emissions from manure management

Code	Livestock	Housing period (a), d a <sup>-1</sup>	N <sub>ex</sub> (b)	Proportion of TAN	Manure type	EF <sub>housing</sub>	EF <sub>yard</sub>	EF <sub>storage</sub>	EF <sub>application</sub>	EF <sub>grazing/outdoor</sub>
3B1a	Dairy cattle	180	105	0.6	Slurry	0.24	0.30 (*)	0.25	0.55	0.14
					Solid	0.08	0.30 (*)	<b>0.32</b>	0.68	0.14
3B1a	Dairy cattle, tied housing	180	105	0.6	Slurry	0.09	0.30 (*)	0.25	0.55	0.14
					Solid	0.09	0.30 (*)	0.32	0.68	0.14
3B1b	Non-dairy cattle (all other cattle)	180	41	0.6	Slurry	0.24	0.53 (*)	0.25	0.55	0.14
					Solid	0.08	0.53 (*)	0.32	0.68	0.14
3B2	Sheep	30	15.5	0.5	Solid	0.22	0.75 (*)	0.32	0.90	0.09
3B33	'Swine' (finishing pigs, 8-110 kg)	365	12.1	0.7	Slurry	0.27	0.53 (*)	0.11	0.40	
					Solid	0.23	0.53 (*)	0.29	0.45	
3B3	'Swine' (sows and piglets to 8 kg)	365	34.5	0.7	Slurry	0.35	NA	0.11	0.29	
					Solid	0.24	NA	0.29	0.45	
		0			Outdoor	NA	NA	NA	NA	0.31 (*)