



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

Implementación y explotación de una era de secado piloto
para la separación de las fracciones líquida y sólida del
purín de granjas porcinas.

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

AUTOR/A: Casañ Liberos, Estefanía

Tutor/a: Hernández Crespo, Carmen

Cotutor/a: Asensi Dasí, Enrique Javier

CURSO ACADÉMICO: 2024/2025

Trabajo Fin de Máster

IMPLEMENTACIÓN Y EXPLOTACIÓN DE UNA ERA DE SECADO PILOTO PARA LA SEPARACIÓN DE LAS FRACCIONES LÍQUIDA Y SÓLIDA DEL PURÍN DE GRANJAS PORCINAS

Intensificación: *TRATAMIENTO DE AGUAS*

Autor:

ESTEFANÍA CASAÑ LIBEROS

Tutor:

DRA. CARMEN HERNÁNDEZ CRESPO

Cotutor/es:

DR. ENRIQUE ASENSI DASÍ

SEPTIEMBRE, 2025



**UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA**

mihma
máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente

Resumen del Trabajo de Fin de Máster

Datos del proyecto

Título del TFM en español: Implementación y explotación de una era de secado piloto para la separación de las fracciones líquida y sólida del purín de granjas porcinas.

Título del TFM en inglés: Implementation and operation of a pilot drying area for the separation of the liquid and solid fractions of the pig slurry from pig farms.

Título del TFM en Valenciano: Implementació i explotació d'una era d'assecat pilot per a la separació de les fraccions líquida i sòlida del purín de granges porcines.

Alumno: Estefanía Casañ Liberos

Tutor: Dra. Carmen Hernández Crespo

Cotutor/es: Dr. Enrique Asensi Dasí

Fecha de Lectura: Septiembre, 2025.

Resumen

En español

La producción porcina representa un pilar fundamental en la industria alimentaria global, siendo la carne de cerdo la más consumida a nivel mundial. Sin embargo, esta actividad genera un subproducto, el purín, cuya gestión inadecuada acarrea importantes desafíos ambientales. El purín de cerdo, si bien es rico en materia orgánica, macro y micronutrientes que lo harían un excelente fertilizante, presenta limitaciones significativas debido a su alta conductividad eléctrica y elevados niveles de amonio. Estas características no solo restringen su uso como fertilizante, sino que también lo convierten en un factor clave de la eutrofización y la contaminación por nitratos de las aguas subterráneas, un problema amplificado por la aplicación conjunta de otros fertilizantes agrícolas.

Además, el almacenamiento de purín libera gases de efecto invernadero como el amoníaco, el dióxido de nitrógeno y el metano, contribuyendo directamente al cambio climático. Esta problemática subraya la imperiosa necesidad de desarrollar e implementar tratamientos eficaces para el purín que mitiguen estos impactos negativos en el medio ambiente.

Ante esta situación, el presente Trabajo de Fin de Máster (TFM) se centró en la implementación y evaluación de una era de secado a escala piloto para el tratamiento de los purines generados en la explotación agrícola La Penta, ubicada en Bétera. La era de secado piloto fue constituida con grava como soporte y arena como medio filtrante. Esta infraestructura permitió analizar la eficiencia del sistema en el tratamiento del purín y monitorear diversos parámetros clave.

Los parámetros que se analizaron fueron los siguientes:

- Parámetros fisicoquímicos del purín (pH, conductividad y turbidez): Para comprender su composición inicial y la composición del drenaje de salida.
- Concentración de sólidos suspendidos: Para evaluar la efectividad de la separación de las fases sólida y líquida.
- Porcentaje de sólidos volátiles del purín de entrada, de la fracción líquida y de la capa de sólidos que se irá generando en la superficie para determinar si se produce mineralización,

un proceso que transforma la materia orgánica en compuestos inorgánicos.

La caracterización de la fracción líquida fue crucial, ya que con los resultados obtenidos fue posible proponer soluciones sostenibles y eficientes para su tratamiento tales como los humedales artificiales.

Los resultados obtenidos en cuanto a eficiencia de eliminación fueron los siguientes:

- Conductividad: 9,28%
- Turbidez: 51,45%
- Sólidos totales: 35,13%
- Sólidos suspendidos: 65,88%
- Sólidos suspendidos volátiles: 65,16%

Se trata de resultados positivos, que dieron pie, como se ha comentado anteriormente, a buscar posibles tratamientos para la fracción líquida obtenida. Al tener una menor concentración de sólidos en suspensión, es idónea para ser tratada mediante soluciones basadas en la naturaleza, como los humedales artificiales. La implementación de este tipo de sistemas ofrece ventajas considerables para los propietarios y gestores de las explotaciones agropecuarias. Se trata de infraestructuras de manejo sencillo que pueden ser gestionadas por el propio personal de la explotación, lo que reduce la dependencia de servicios externos. Estas soluciones contribuyen a una reducción significativa de los gastos asociados a la gestión del purín, ofreciendo un enfoque sostenible y económicamente viable.

En valenciano

La producció porcina representa un pilar fonamental en la indústria alimentària global, sent la carn de porc la més consumida a nivell mundial. No obstant això, aquesta activitat genera un subproducte, el purí, la gestió inadequada del qual comporta importants desafiaments ambientals. El purí de porc, si bé és ric en matèria orgànica, macro i micronutrients que el farien un excel·lent fertilitzant, presenta limitacions significatives a causa de la seua alta conductivitat elèctrica i elevats nivells d'amoni. Aquestes característiques no sols en restringeixen l'ús com a fertilitzant, sinó que també el converteixen en un factor clau de l'eutrofització i la contaminació per nitrats de les aigües subterrànies, un problema amplificat per l'aplicació conjunta d'altres fertilitzants agrícoles.

A més, l'emmagatzematge de purí allibera gasos d'efecte d'hivernacle com l'amoníac, el diòxid de nitrogen i el metà, que contribueixen directament al canvi climàtic. Aquesta problemàtica subratlla la imperiosa necessitat de desenvolupar i implementar tractaments eficaços per al purí que mitiguen aquests impactes negatius en el medi ambient.

Davant d'aquesta situació, el present Treball de Fi de Màster (TFM) es va centrar en la implementació i avaluació d'una era d'assecament a escala pilot per al tractament del purí generat en l'explotació agrícola La Penta, ubicada a Bétera. L'era d'assecament pilot es va constituir amb grava com a suport i arena com a medi filtrant. Aquesta infraestructura va permetre analitzar l'eficiència del sistema en el tractament del fem i monitorar diversos paràmetres clau.

Els paràmetres que es van analitzar van ser els següents:

- Paràmetres fisicoquímics del purí (pH, conductivitat i terbolesa): Per a comprendre la seua

composició inicial i la composició del drenatge d'eixida.

- Concentració de sòlids suspesos: Per a avaluar l'efectivitat de la separació de les fases sòlida i líquida.
- Percentatge de sòlids volàtils del purí d'entrada, de la fracció líquida i de la capa de sòlids que s'anirà generant en la superfície per a determinar si es produeix mineralització, un procés que transforma la matèria orgànica en compostos inorgànics.

La caracterització de la fracció líquida va ser crucial, ja que amb els resultats obtinguts va ser possible proposar solucions sostenibles i eficients per al seu tractament, com ara els aigüamolls artificials.

Els resultats obtinguts quant a eficiència d'eliminació van ser els següents:

- Conductivitat: 9,28%
- Terbolesa: 51,45%
- Sòlids totals: 35,13%
- Sòlids suspesos: 65,88%
- Sòlids suspesos volàtils: 65,16%

Es tracta de resultats positius, que van donar lloc, com s'ha comentat anteriorment, a buscar possibles tractaments per a la fracció líquida obtinguda. Com que té una menor concentració de sòlids en suspensió, és idònia per a ser tractada mitjançant solucions basades en la naturalesa, com els aigüamolls artificials. La implementació d'aquesta mena de sistemes ofereix avantatges considerables per als propietaris i gestors de les explotacions agropecuàries. Es tracta d'infraestructures de maneig senzill que poden ser gestionades pel personal mateix de l'explotació, la qual cosa redueix la dependència de serveis externs. Aquestes solucions contribueixen a una reducció significativa de les despeses associades a la gestió del purí, i ofereixen un enfocament sostenible i econòmicament viable.

En inglés

Pork production represents a fundamental pillar in the global food industry, with pork being the most widely consumed meat worldwide. However, this activity generates a byproduct, slurry, whose inadequate management poses significant environmental challenges. Although pig slurry is rich in organic matter, macro and micronutrients that would make it an excellent fertilizer, it has significant limitations due to its high electrical conductivity and elevated levels of ammonium. These characteristics not only restrict its use as a fertilizer but also make it a key factor in the eutrophication and nitrate contamination of groundwater, a problem amplified by the combined application of other agricultural fertilizers.

Additionally, the storage of slurry releases greenhouse gases such as ammonia, nitrogen dioxide, and methane, directly contributing to climate change. This issue underscores the imperative need to develop and implement effective slurry treatments to mitigate these negative environmental impacts.

In response to this situation, this Master's Thesis focused on the implementation and evaluation of a pilot-scale drying bed for the treatment of slurry generated at the La Penta agricultural farm, located in Bétera. The pilot drying bed was constructed with gravel as the support and sand as the filtering medium. This infrastructure allowed for the analysis of the system's efficiency in treating the slurry and monitoring various key parameters.

The parameters analyzed were as follows:

- Physicochemical parameters of the slurry (pH, conductivity, and turbidity): To understand its initial composition and the composition of the outlet drainage.

- Concentration of suspended solids: To evaluate the effectiveness of the separation of the solid and liquid phases.
- Percentage of volatile solids in the influent slurry, the liquid fraction, and the solid layer that would accumulate on the surface to determine if mineralization, a process that transforms organic matter into inorganic compounds occurs.

The characterization of the liquid fraction was crucial, as the results obtained made it possible to propose sustainable and efficient solutions for its treatment, such as artificial wetlands.

The results obtained for removal efficiency were as follows:

- Conductivity: 9,28%
- Turbidity: 51,45%
- Total Solids: 35,13%
- Suspended Solids: 65,88%
- Volatile Suspended Solids: 65,16%

These are positive results, which, as previously mentioned, led to the search for possible treatments for the liquid fraction obtained. With a lower concentration of suspended solids, it is ideal for treatment using nature-based solutions, such as artificial wetlands. The implementation of these types of systems offers considerable advantages for farm owners and managers. They are easy-to-manage infrastructures that can be handled by the farm's own personnel, reducing dependence on external services. These solutions contribute to a significant reduction in the costs associated with slurry management, offering a sustainable and economically viable approach.

Palabras clave español: Era de secado, purín, deshidratación de purín

Palabras clave valenciano: Era d'assecat, purí, deshidratació de purí

Palabras clave inglés: Drying bed, slurry, dehydration of slurry

ÍNDICE

1. Introducción	1
1.1 Producción de carne de cerdo a nivel mundial	1
1.2 Producción de carne de cerdo en la Unión Europea	2
2. Problemática ambiental	2
3. Antecedentes	3
4. Técnicas para la gestión de purines	4
4.1 Aplicación directa	4
4.2 Almacenamiento de purines	5
4.3 Técnicas de separación de fases sólido-líquido	6
4.4 Tratamientos de la fracción sólida. Compostaje.	9
4.5 Tratamientos de la fracción líquida	10
5. Justificación y objetivos del estudio	14
6. Relación con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS)	14
7. Materiales y métodos	15
7.1 Purín bruto	15
7.1.1 Caracterización del purín bruto y de la fracción líquida	16
7.1.2 Tasa de carga	17
7.1.3 Frecuencia de alimentación	18
7.2 Era de secado piloto	19
7.3 Equipos y materiales de laboratorio	21
7.4 Análisis estadístico ANOVA – comparación eficiencias	24
8. Resultados y discusión	24
8.1 Alimentación del purín	24
8.2 Evolución de la era de secado	25
8.3 Capacidad de drenaje	27
8.4 Curva granulométrica	28
8.5 Mineralización capa de sólidos	29
8.6 Evolución del pH y la CE	30
8.7 Evolución de los sólidos	34
8.7.1 Sólidos totales	34
8.7.2 Sólidos suspendidos	38
8.7.3 Sólidos suspendidos volátiles	43
8.8 Evolución de la turbidez	47

9. Posibles tratamientos para la fracción líquida	50
10. Aplicación de la era de secado piloto a escala real.....	51
11. Resumen y conclusiones.....	52
12. Bibliografía.....	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Producción mundial de carne. Fuente: FAO, 2023.....	1
Figura 2. Principales productores mundiales de carne de cerdo. Fuente: Ministerio de Agricultura, pesca y alimentación, 2023.	1
Figura 3. Principales productores de la Unión Europea. Fuente: Ministerio de Agricultura, pesca y alimentación, 2023.....	2
Figura 4. Sistema de separación sólido-líquido. Fuente: Pantelopoulos et al., 2021.	3
Figura 5. Sistema de aplicación del purín. Fuente: Revista El Adelantado, 2025.....	5
Figura 6. Tanque para el almacenamiento de purines. Fuente: Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente, 2015.	5
Figura 7. Balsa para el almacenamiento de purines. Fuente: Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente, 2015.	5
Figura 8. Diagrama de la separación por rejilla. Fuente: Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente, 2015.	6
Figura 9. Filtro prensa. Fuente: Hidrometalúrgica.....	7
Figura 10. Centrífuga. Fuente: Campo galego (2021).....	7
Figura 11. Filtro de tambor. Fuente: Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente, 2015.	8
Figura 12. Decantador cónico. Fuente: Youtube, 2022.	8
Figura 13. Decantador horizontal. Fuente: Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente, 2015.....	8
Figura 14. Diagrama del compostaje. Fuente: Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente, 2015.....	9
Figura 15. Compost. Fuente: Ritornamedioambiente (2016)	10
Figura 16. Degradación aerobia de la materia orgánica. Fuente: Elaboración propia.....	10
Figura 17. Proceso de nitrificación-desnitrificación. Fuente: Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente, 2015.	10
Figura 18. Clasificación de los humedales. Fuente: Adaptado de Vymazal y Kröpfelová (2008)	11
Figura 19. Humedal de flujo superficial. Fuente: Rabat (2016).....	12
Figura 20. Humedal de flujo horizontal. Fuente: Rabat (2016)	13
Figura 21. Humedal de flujo vertical. Fuente: Rabat (2016).....	13
Figura 22. Cepillo de separación sólido-líquido. Fuente: Elaboración propia.....	15
Figura 23. Balsas de decantación. Fuente: Elaboración propia.....	15
Figura 24. Aireación con ozono. Fuente: Elaboración propia.....	16
Figura 25. Agujeros de drenaje. Fuente: Elaboración propia.....	20
Figura 26. Esquema de la era de secado. Fuente: Elaboración propia.....	20
Figura 27. Tamices utilizados para la realización de la curva granulométrica. Fuente: Elaboración propia.	20
Figura 28. Era de secado piloto. Fuente: Elaboración propia.	21
Figura 29. Cápsulas de porcelana y pinzas. Fuente: Elaboración propia.....	21
Figura 30. Desecador. Fuente: Elaboración propia.	22
Figura 31. Estufa y mufla. Fuente: Elaboración propia.	22
Figura 32. Probetas de diferentes volúmenes. Fuente: Elaboración propia.....	22
Figura 33. Equipo de filtración. Fuente: Elaboración propia.....	23
Figura 34. Balanza de precisión. Fuente: Elaboración propia.....	23
Figura 35. Turbidímetro. Fuente: Elaboración propia.	23
Figura 36. Sondas de pH y CE. Fuente: Elaboración propia.	24
Figura 37. Distribución del purín sobre las gravas. Fuente: Elaboración propia.	25
Figura 38. Semana 1 de dosificación. Fuente: Elaboración propia.....	25
Figura 39. Semana 2 de dosificación. Fuente: Elaboración propia.....	25
Figura 40. Semana 28 de dosificación. Fuente: Elaboración propia.	26

Figura 41. Semana 36 de dosificación. Fuente: Elaboración propia.	26
Figura 42. Semana 37 de dosificación. Fuente: Elaboración propia.	26
Figura 43. Semana 38 de dosificación. Fuente: Elaboración propia.	26
Figura 44. Semana 39 de dosificación. Fuente: Elaboración propia.	27
Figura 45. Aumento de la capa de sólidos. Fuente: Elaboración propia.	27
Figura 46. Evolución de la capacidad de drenaje. Fuente: Elaboración propia.	28
Figura 47. Curva granulométrica de las dos arenas. Fuente: Elaboración propia.	29
Figura 48. Evolución del pH. Fuente: Elaboración propia.	31
Figura 49. Diagrama de cajas y bigotes del pH de entrada frente al pH de salida. Fuente: Elaboración propia.	32
Figura 50. Evolución de la conductividad. Fuente: Elaboración propia.	33
Figura 51. Diagrama de cajas y bigotes de la conductividad. Fuente: Elaboración propia.	33
Figura 52. Evolución de los sólidos totales. Fuente: Elaboración propia.	35
Figura 53. Evolución de la eficiencia en la eliminación de ST. Fuente: Elaboración propia.	36
Figura 54. Diagrama de cajas y bigotes de los ST. Fuente: Elaboración propia.	36
Figura 55. Diagrama de cajas y bigotes de las eficiencias de ST. Fuente: Statgraphics.	38
Figura 56. Evolución de los SS. Fuente: Elaboración propia.	39
Figura 57. Comparación entre los ST, SD y SS. Fuente: Elaboración propia.	40
Figura 58. Evolución de la eficiencia en la eliminación de SS. Fuente: Elaboración propia.	40
Figura 59. Diagrama de cajas y bigotes de los SS. Fuente: Elaboración propia.	42
Figura 60. Diagrama de cajas y bigotes de las eficiencias de SS. Fuente: Statgraphics.	43
Figura 61. Evolución de los SSV. Fuente: Elaboración propia.	44
Figura 62. Evolución de la eficiencia de eliminación de SSV. Fuente: Elaboración propia.	45
Figura 63. Diagrama de cajas y bigotes de los SSV. Fuente: Elaboración propia.	45
Figura 64. Diagrama de cajas y bigotes de las eficiencias de SSV. Fuente: Statgraphics.	46
Figura 65. Evolución de la turbidez. Fuente: Elaboración propia.	47
Figura 66. Evolución de la eficiencia en la eliminación de turbidez. Fuente: Elaboración propia.	48
Figura 67. Diagrama de cajas y bigotes de la turbidez. Fuente: Elaboración propia.	49
Figura 68. Diagrama de cajas y bigotes de las eficiencias de turbidez. Fuente: Statgraphics. ...	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Eficiencia en la eliminación de sólidos totales con diferentes técnicas. Fuente: Elaboración propia.	4
Tabla 2. Costes aproximados de implementación y funcionamiento de diferentes tratamientos de separación. Fuente: Elaboración propia adaptado de Campo galego (2021).	9
Tabla 3. Periodos de alimentación para humedales artificiales. Fuente: Nielsen (2003).	19
Tabla 4. Frecuencia de alimentación de la era de secado. Fuente: Elaboración propia.	19
Tabla 5. Resultados del tamizado de la arena virgen. Fuente: Elaboración propia.	28
Tabla 6. Resultados del tamizado de la arena una vez finalizado el proyecto. Fuente: Elaboración propia.	29
Tabla 7. Resultados de las mediciones realizadas en la capa de sólidos. Fuente: Elaboración propia.	30
Tabla 8. Datos de las eficiencias de ST (%) introducidos en Statgraphics.	37
Tabla 9. Tabla ANOVA de las eficiencias de ST. Fuente: Statgraphics.	37
Tabla 10. Prueba de Kruskal-Wallis para las eficiencias de ST. Fuente: Statgraphics.	38
Tabla 11. Valores típicos de una ARU. Fuente: Adaptado de Henze (2008).	41
Tabla 12. Datos de las eficiencias de SS (%) introducidos en Statgraphics.	42
Tabla 13. Tabla ANOVA de las eficiencias de SS. Fuente: Statgraphics.	43
Tabla 14. Prueba de Kruskal-Wallis para las eficiencias de SS. Fuente: Statgraphics.	43
Tabla 15. Datos de las eficiencias de SSV (%) introducidos en Statgraphics. Fuente: Statgraphics.	46
Tabla 16. Tabla ANOVA de las eficiencias de SSV. Fuente: Statgraphics.	46
Tabla 17. Prueba de Kruskal-Wallis para las eficiencias de SSV. Fuente: Statgraphics.	47
Tabla 18. Datos de las eficiencias de turbidez (%) introducidos en Statgraphics. Fuente: Statgraphics.	49
Tabla 19. Tabla ANOVA de las eficiencias de turbidez. Fuente: Statgraphics.	49
Tabla 20. Prueba de Kruskal-Wallis para las eficiencias de turbidez. Fuente: Statgraphics.	50
Tabla 21. Medias de los resultados obtenidos del drenaje. Fuente: Elaboración propia.	51
Tabla 22. Eficiencias de eliminación. Fuente: Elaboración propia.	53

1. Introducción

1.1 Producción de carne de cerdo a nivel mundial

La carne de cerdo representa el 34% del total de la producción de carne, siendo junto con la carne de pollo, la más producida a nivel mundial como se observa en la Figura 1.

Se observa una ligera bajada de la producción de carne de cerdo respecto al año 2000, esto fue producido por la peste porcina africana entre los años 2019 y 2020, aun así, la producción de carne de cerdo sigue encabezando la producción de carne a nivel mundial.

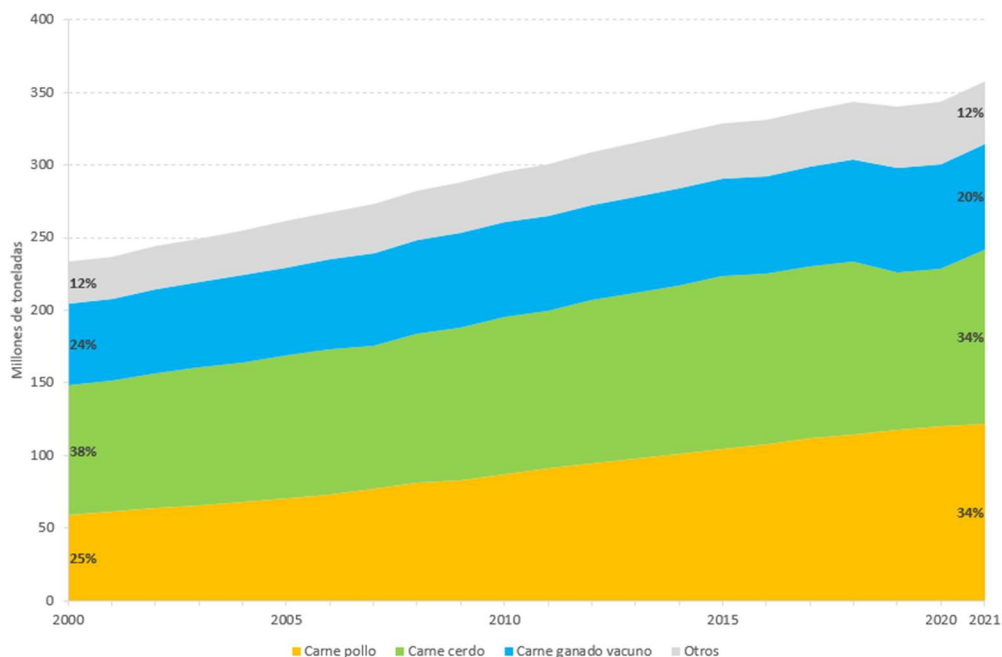


Figura 1. Producción mundial de carne. Fuente: FAO, 2023.

Globalmente, la Unión Europea, con un 17,7% de las miles de toneladas producidas, es el segundo productor mundial después de China, que encabeza la producción mundial con un 49,8% de las miles de toneladas producidas como se observa en la Figura 2.

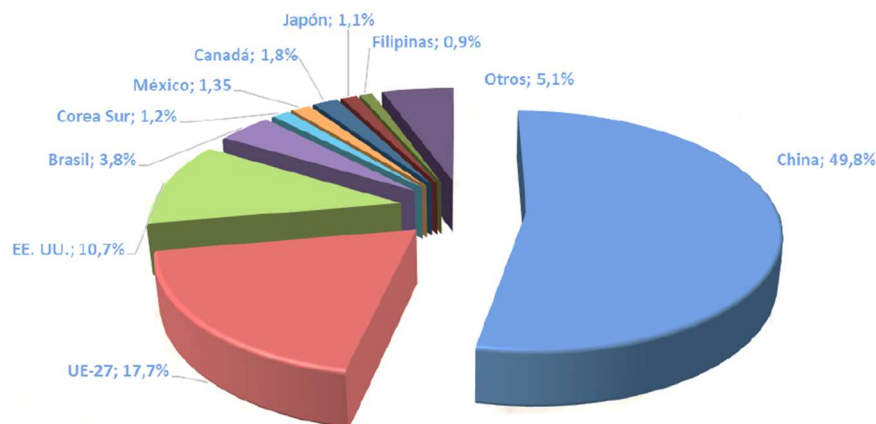


Figura 2. Principales productores mundiales de carne de cerdo. Fuente: Ministerio de Agricultura, pesca y alimentación, 2023.

1.2 Producción de carne de cerdo en la Unión Europea

Particularmente, por lo que respecta a España, se trata del mayor productor de carne de cerdo de la Unión Europea, como se observa en la Figura 3.

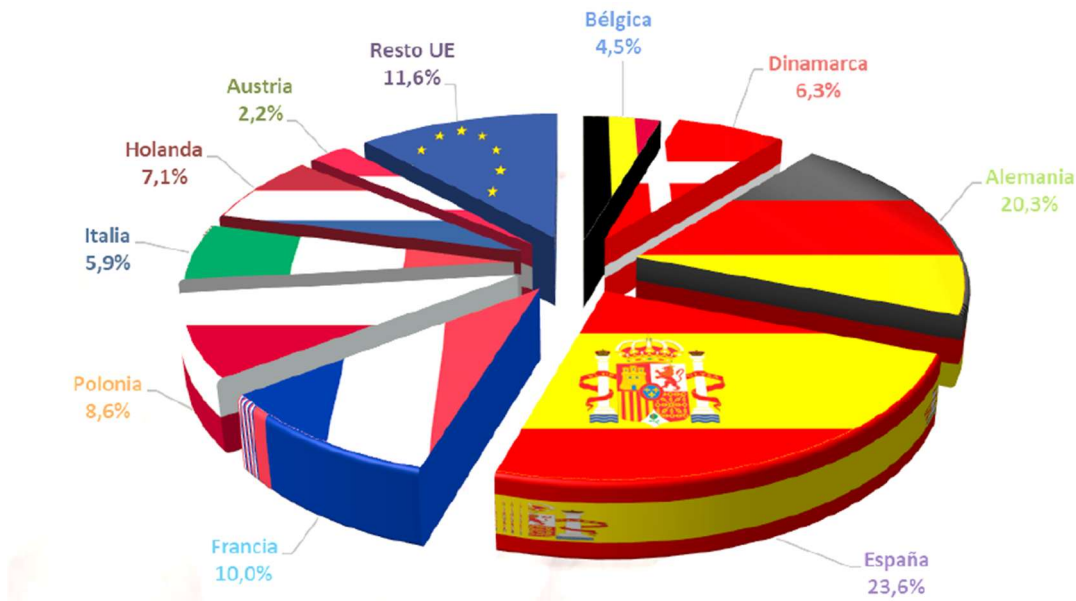


Figura 3. Principales productores de la Unión Europea. Fuente: Ministerio de Agricultura, pesca y alimentación, 2023.

El sector porcino español tiene una importancia clave en la economía del país ya que supone en torno al 14% de la producción final agraria y, dentro de las producciones ganaderas, ocupa el primer lugar en cuanto a importancia económica alcanzando cerca del 39% de la producción final ganadera (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 2024).

2. Problemática ambiental

El purín de cerdo es un subproducto resultante de la mezcla de heces, orines, restos de comida, paja, agua de lavado, etc., que generan las granjas porcinas.

Se trata de un residuo líquido que contiene entre un 4% y un 5% de materia sólida y aproximadamente 4000 ppm de nitrógeno del cual la mitad aproximadamente es amoniacal.

Estos purines generan potenciales impactos negativos sobre el medioambiente, los más importantes son los que se presentan a continuación.

1. La contaminación por nitratos de aguas subterráneas cuando el purín se aplica al terreno. Esto ocurre debido a la transformación del nitrógeno amoniacal en nitrato. Cuando se aplica en una zona equilibrada donde los nitratos pueden ser absorbidos por el suelo se trata de un buen fertilizante, el problema surge cuando las grandes explotaciones no están en zonas agrícolas con suficiente capacidad y además suelen estar concentradas en áreas geográficas concretas.
Para las tomas de agua potable el límite máximo admisible es de 50 ppm de nitratos, el problema surge cuando hay zonas con contaminación de nitratos provenientes de los purines que superan entre 6-10 veces ese límite máximo

admitido.

El principal riesgo de los nitratos en el consumo de agua es su paso a nitritos y estos a nitrosaminas que es un agente cancerígeno.

2. La contaminación de aguas superficiales por materia orgánica y amoníaco cuando se realizan vertidos incontrolados.

3. Las emisiones de metano, amoníaco y gases nitrosos durante la explotación, el almacenamiento y la aplicación al terreno.

Durante años no se han considerado las emisiones de metano como un aspecto a tener en cuenta desde el punto de vista de impacto ambiental pero debido al cambio climático se le ha empezado a dar importancia a las emisiones de este gas, debido a que es un gas que produce un efecto invernadero entre 21-23 veces mayor que el CO₂. Este gas se genera debido a la descomposición anaeróbica de la materia orgánica producida en los almacenamientos de purín de largo periodo.

En cuanto al amoníaco, es el principal responsable de la lluvia ácida, de la acidificación del medioambiente y de la eutrofización. España incumple los niveles de emisión establecidos desde Europa en función de la directiva 2010/75/UE. Algunas de las medidas que fueron aplicadas para evitar las emisiones de amoníaco aumentaron la contaminación por nitratos o las emisiones de metano, por lo que es necesario contemplar todos los contaminantes de los purines en conjunto y no de manera aislada.

3. Antecedentes

Para contextualizar adecuadamente la investigación de este TFM, se presentan a continuación los antecedentes sobre la separación de las fracciones sólida y líquida del purín. En este apartado se exponen los principales hallazgos y avances sobre el tema, con el objetivo de identificar las contribuciones previas a la realización de este estudio.

Para la separación en dos fases del purín bruto existen diferentes tratamientos como por ejemplo la coagulación-floculación, separación por filtro prensa, separación por centrifugación, decantación, etc., que se explicaran más detalladamente en próximos apartados. En el presente apartado se muestran algunos ejemplos de estudios previos donde se han aplicado algunas de estas técnicas de separación con el objetivo de poder comparar finalmente con el presente estudio.

En el estudio realizado por Pantelopoulos et al. (2021) se propuso el sistema de separación sólido-líquido mostrado en la Figura 4, donde se realiza una separación por prensa de tornillo seguido de una centrifuga.

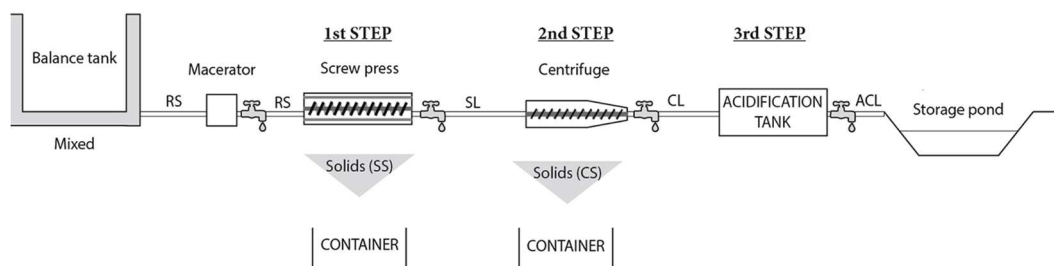


Figura 4. Sistema de separación sólido-líquido. Fuente: Pantelopoulos et al., 2021.

En este estudio se realizaron análisis de varios parámetros, entre ellos los sólidos totales, y se encontró que la eficiencia de eliminación en la fracción líquida obtenida fue de un 55,6%. Se trata de una alta eficiencia de eliminación, sin embargo, en la aplicación de este tratamiento es crucial considerar los costes de implementación de los equipos en la granja, así como los costes energéticos derivados de la operación de este sistema.

Por otro lado, en un estudio realizado por Pedersen et al. (2024) la separación sólido-líquido se llevó a cabo mediante la utilización de una centrífuga, obteniendo eficiencias del 54% en la eliminación de sólidos de la fracción líquida, de nuevo, resulta importante considerar aspectos económicos tanto en la implementación como en la operación.

En el estudio realizado por Marti et al. (2020) la separación sólido-líquido se realiza mediante la prensa tornillo solamente, donde se obtienen eficiencias de eliminación alrededor de un 26% en sólidos totales.

En la Tabla 1 se muestra un resumen de las eficiencias en la remoción de sólidos totales obtenidas en los estudios mencionados anteriormente.

Tabla 1. Eficiencia en la eliminación de sólidos totales con diferentes técnicas. Fuente: Elaboración propia.

Técnica de separación	Eficiencia de eliminación de ST (%)
Prensa de tornillo + Centrífuga	55,6
Centrífuga	54
Prensa de tornillo	26

4. Técnicas para la gestión de purines

La gestión de las deyecciones en explotaciones ganaderas ha sido durante mucho tiempo una actividad con una gran importancia debido a que siempre han sido consideradas como una fuente de nutrientes y una forma de aumentar el rendimiento productivo de los cultivos. No obstante, debido al cambio generado al pasar de una agricultura y ganadería de subsistencia a una agricultura y ganadería intensiva se hace necesario una mejora en los sistemas de gestión de purines que no se ha realizado para, por un lado, valorizar estos residuos al máximo y por otro lado evitar los impactos ambientales negativos si no se gestionan de manera correcta.

En los siguientes apartados se describen algunas tecnologías de tratamiento de purines.

4.1 Aplicación directa

La utilización directa del purín para fertilizar las tierras próximas a las explotaciones es una práctica que se ha utilizado durante mucho tiempo debido a su facilidad de operación y al bajo coste.

Previo a su utilización es necesaria una analítica del purín para saber su riqueza en N, P y K permitiendo así aplicar la cantidad adecuada al terreno.

La mala utilización de esta técnica puede producir una serie de riesgos ambientales tales como la emisión de amoníaco y gases de efecto invernadero (CO_2 , CH_4 y N_2O), eutrofización, contaminación del agua por nitratos, contaminación de suelos por metales pesados y riesgos sanitarios.

El uso de las Mejores Técnicas Disponibles (MTD) como el sistema multi-tubos, la inyección superficial o el enterrado reduce las emisiones de amoníaco, aumentan la tasa de mineralización del nitrógeno y los cultivos lo absorben de manera más eficaz. En la Figura 5 se puede observar un sistema de aplicación del purín.



Figura 5. Sistema de aplicación del purín. Fuente: Revista El Adelantado, 2025

4.2 Almacenamiento de purines

Se realiza el almacenamiento para adecuar la disponibilidad a las necesidades agronómicas o para su posterior tratamiento. Se puede almacenar en tanques exteriores (Figura 6) y en balsas y lagunaje (Figura 7).

La capacidad debe garantizar que se almacene hasta que sea posible valorizarlo o aplicarle el tratamiento adecuado.

Es muy importante la impermeabilización tanto de los tanques exteriores como de las balsas para evitar el riesgo de la filtración al terreno.



Figura 6. Tanque para el almacenamiento de purines. Fuente: Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente, 2015.



Figura 7. Balsa para el almacenamiento de purines. Fuente: Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente, 2015.

4.3 Técnicas de separación de fases sólido-líquido

Una de las técnicas más empleadas para el tratamiento del purín es la separación sólido-líquido, donde el líquido puede ser utilizado directamente como fertilizante y con el sólido se puede producir un fertilizante orgánico.

A continuación, se van a describir las técnicas para realizar este proceso de separación.

- **Coagulación-floculación**

Las partículas suspendidas en los purines se caracterizan por su tamaño pequeño y por su carga superficial negativa, por lo que se repelen entre ellas. Para conseguir que sedimenten se adicionan reactivos químicos como coagulantes (sales de hierro y aluminio) que neutralizan las cargas y favorecen que las partículas se aglomeren y floculantes (poliacrilamidas) que forman flóculos más grandes y favorecen la sedimentación por gravedad.

Esta técnica solo se recomienda cuando es necesaria una reducción del contenido en nitrógeno y fósforo y cuando el purín no se puede transportar por su elevado coste.

- **Separación por rejilla**

Esta técnica se utiliza cuando se detectan sólidos de gran tamaño en el purín que pueden dificultar el buen funcionamiento de elementos como bombas y tuberías. Se trata de una rejilla seguida por una etapa de separación más fina en caso de ser necesaria. En la Figura 8 puede observarse el diagrama en el que se describe esta técnica.

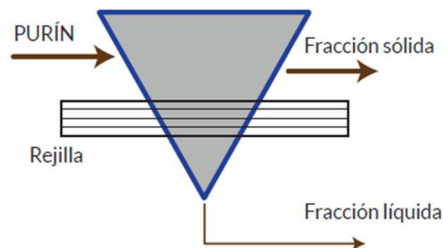


Figura 8. Diagrama de la separación por rejilla. Fuente: Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente, 2015.

- **Separación por filtro prensa**

Se trata de una separación mecánica por un dispositivo constituido por una placa o tela filtrante como se puede observar en la Figura 9. Permiten una amplia superficie de filtrado utilizando muy poco espacio.

La eficiencia de este tratamiento varía en función de la presión aplicada desde el 67% hasta el 79% en cuanto a eliminación de sólidos.



Figura 9. Filtro prensa. Fuente: Hidrometálica.

- **Separación por centrifugación**

Es la separación debido a la aplicación de una fuerza centrífuga. Se trata de la técnica que más compacta la fracción sólida. Se utiliza en explotaciones a gran escala debido a su elevado coste. En la Figura 10 puede observarse una imagen de una centrífuga utilizada para la separación sólido-líquido.

Esta técnica no es recomendable cuando el contenido de sólidos totales en la entrada es $>10\%$.

En cuanto a eficiencia de eliminación de sólidos totales, según Martínez (2008), se encuentra entre un 35-45%. Es un dato a tener en cuenta para poder valorar junto con los costes económicos y de operación, si la técnica aplicada en el presente TFM sería más viable que la centrifugación.

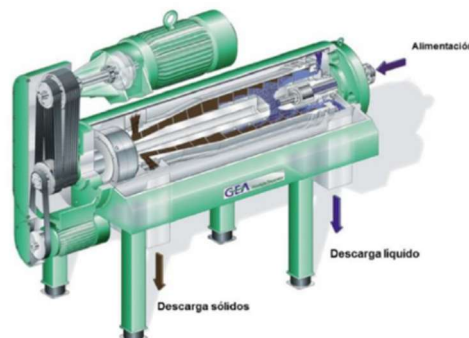


Figura 10. Centrífuga. Fuente: Campo galego (2021)

- **Separación por filtro de tambor**

Se trata de un tambor rotatorio en cuya superficie se incorpora una tela filtrante. El giro del tambor hace que la fracción líquida pase a través de la tela y la fracción sólida se quede adherida a esta. La torta se debe ir descargando mediante una rasqueta o rodillo. En la Figura 11 se puede observar un filtro de tambor.

Según el estudio realizado por Álvarez (2008), se obtienen eficiencias de eliminación de sólidos suspendidos totales de entre el 3-18,8 %.



Figura 11. Filtro de tambor. Fuente: Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente, 2015.

- **Decantación**

Se trata de la separación por la acción de la gravedad donde los sólidos se van depositando en la parte inferior. Se obtienen buenos índices de separación. Existen decantadores cónicos y decantadores rectangulares como se observa en la Figura 12 y 13, respectivamente.

Este es el tratamiento que se utiliza actualmente en la granja de Bétera. Según Campo Galego (2021), este tratamiento tiene una eficiencia en cuanto a eliminación de sólidos suspendidos (con una dimensión superior a las 400 μm) de entre el 45-57%. El sedimento obtenido cuenta con un alto contenido en humedad y un bajo contenido en materia seca (8-12%).



Figura 12. Decantador cónico. Fuente: Youtube, 2022.



Figura 13. Decantador horizontal. Fuente: Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente, 2015.

- **Era de secado**

La era de secado consiste en superficies al aire libre acondicionadas para recibir el purín sólido (previamente deshidratado) y secarlo naturalmente mediante evaporación y drenaje.

En el presente TFM se implementa una era de secado piloto, pero en ella se depositará directamente el purín bruto y se evaluará su eficiencia en la separación sólido-líquido con el objetivo de optimizar este sistema y, además, con el análisis de la fracción líquida drenada se podrán evaluar alternativas para su posterior tratamiento.

A continuación, en la Tabla 2, se muestra una tabla con los costes aproximados de implementación y de funcionamiento de cada tratamiento.

Tabla 2. Costes aproximados de implementación y funcionamiento de diferentes tratamientos de separación. Fuente: Elaboración propia adaptado de Campo galego (2021)

Tratamiento	Coste de implementación	Volumen / caudal de purín generado	Coste de funcionamiento
Coagulación-floculación	50.000 €	-	0,8 €/tonelada
Separación por rejilla	28.000 €	10.000 m ³	0,5-0,9 €/m ³
Separación por filtro prensa	25.000 €-125.000 €	-	1,5 €/tonelada
Separación por centrifugación	40.000 €-60.000 €	1,5-2 m ³ /h	0,6-2,3 €/m ³
Separación por filtro tambor	25.000 €	2-3 m ³ /h	0,35 €/m ³
Decantación	17.000 €	350 m ³	-

4.4 Tratamientos de la fracción sólida. Compostaje.

Se trata de un proceso de descomposición biológica aerobia y de estabilización de sustratos orgánicos. El objetivo es obtener un producto final estable sin patógenos, que conserve al máximo los nutrientes y con un bajo % de humedad, lo que disminuirá los costes de transporte al haberse evaporado el agua durante el proceso.

Se trata de un proceso relativamente sencillo donde se utiliza maquinaria habitual, el único requerimiento es que haya espacio suficiente en la granja y que el terreno no sea muy permeable. Debido a su sencillez es típico encontrarlo en granjas habitualmente. En la Figura 14 se observa un diagrama del proceso, mientras que en la Figura 15 se observa una imagen del compost.

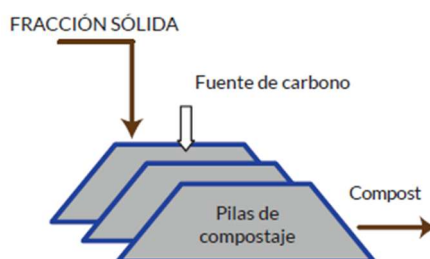


Figura 14. Diagrama del compostaje. Fuente: Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente, 2015.



Figura 15. Compost. Fuente: Ritornamedioambiente (2016)

4.5 Tratamientos de la fracción líquida

A continuación, se explican las técnicas para tratar la fracción líquida del purín.

- **Digestión aerobia**

Consiste en la degradación, en presencia de oxígeno, de la materia orgánica del purín. Se aporta oxígeno mediante agitación o por burbujeo en las balsas de purines. En la Figura 16 puede observarse una imagen de la degradación aerobia de la fracción líquida.



Figura 16. Degradación aerobia de la materia orgánica. Fuente: Elaboración propia.

- **Nitrificación-desnitrificación**

Se trata de un proceso de eliminación de nitrógeno mediante la combinación de procesos aerobios con procesos anóxicos. En primer lugar, se produce la nitrificación autótrofa donde el amonio se transforma en nitrato debido a las bacterias autótrofas. En segundo lugar, se produce la desnitrificación, que se trata de un proceso anóxico donde el nitrato se reduce a nitrógeno gas debido a las bacterias heterótrofas. En la Figura 17 se puede observar este proceso, donde se ve una zona aireada (en el lado derecho) y una zona sin airear (lado izquierdo).



Figura 17. Proceso de nitrificación-desnitrificación. Fuente: Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente, 2015.

- **Construcción de humedales artificiales**

Los humedales artificiales son sistemas diseñados para aprovechar los procesos naturales de los humedales, que combinan la hidrología, los suelos, los microorganismos y las plantas, para tratar aguas residuales. Numerosos estudios han demostrado que los humedales artificiales son altamente eficaces en la reducción de contaminantes y la mejora de la calidad del agua (El Bied, 2021). Tienen numerosas ventajas como la sencillez constructiva, los bajos costes de operación y mantenimiento y una buena integración paisajística y ambiental. El principal inconveniente es la nula flexibilidad operativa, es decir, tiene pocas opciones de actuación frente a cambios en las condiciones de entrada. En el presente caso de estudio, este inconveniente no tiene apenas relevancia debido a la escasa variabilidad de la fracción líquida de salida de la era de secado, como se ha visto en apartados anteriores.

Existen diferentes tipos de humedales artificiales. En la Figura 18, se muestra un esquema donde se observa a simple vista una clasificación simple de los humedales.

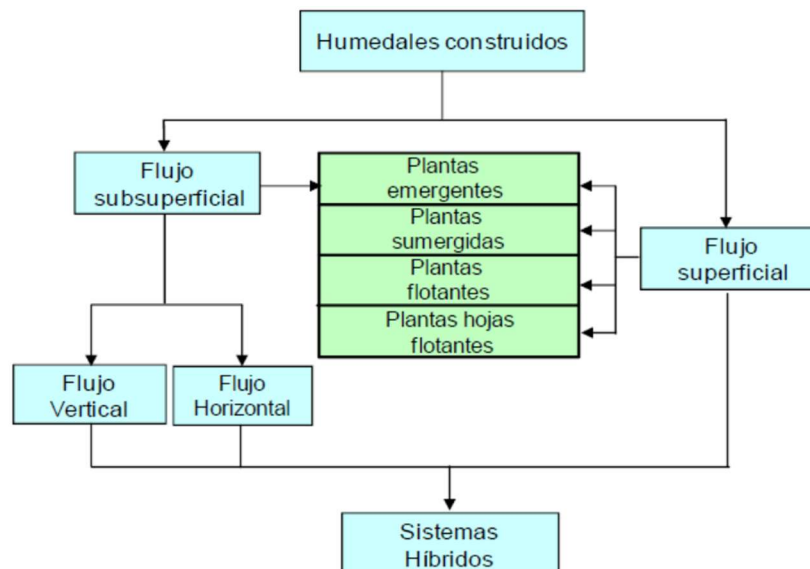


Figura 18. Clasificación de los humedales. Fuente: Adaptado de Vymazal y Kröpfelová (2008)

1. Humedal de flujo superficial

Este tipo de humedal está constituido por unidades densamente vegetadas, en las que el agua a tratar está expuesta a la atmósfera y circula entre las plantas por encima del suelo. Requieren más área que los de tipo subsuperficial.

El agua fluye sobre la superficie del sustrato desde la entrada hasta la salida, por lo que la vegetación se desarrolla en condiciones de inundación total o parcial como se observa en la Figura 68, formando así la densa población mencionada anteriormente. El flujo superficial permite un mayor intercambio con la atmósfera y el desarrollo de procesos aeróbicos en la superficie, mientras que en la zona más profunda se dan procesos anaeróbicos.

La alimentación se realiza de forma continua y la depuración se realiza por el tránsito del agua a través de los tallos y raíces de la vegetación emergente implantada. Estos sirven

de soporte para la fijación de una película bacteriana que realiza los procesos de biodegradación, mientras que las hojas que están por encima de la superficie del agua dan sombra a la masa de agua limitando de esta forma el crecimiento de microalgas (Rabat, 2016).

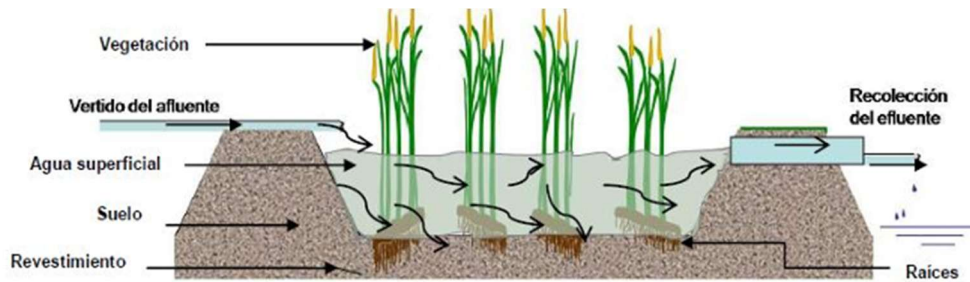


Figura 19. Humedal de flujo superficial. Fuente: Rabat (2016)

Además, estos humedales se pueden clasificar a su vez en función del tipo de especie de vegetación macrófita dominante.

Sistema de macrófitas flotantes

El jacinto de agua es la macrófita que mejor representa este tipo de humedales. La principal ventaja es la escasa sensibilidad a las bajas temperaturas (que en ningún caso deben de ser extremas)

Sistema de macrófitas emergentes

Las más comunes son el carrizo, la enea y los juncos. Deben poseer una extensa superficie para la fijación de los microorganismos y ser capaces de transportar el oxígeno de las hojas hasta las raíces. La principal ventaja es que sus costes de construcción y de mantenimiento son reducidos.

La principal desventaja es que requieren de más espacio para lograr la misma eficacia que otros sistemas.

Sistema de macrófitas sumergidas

Las plantas se encuentran suspendidas en la columna de agua o enraizadas a los sedimentos. La principal ventaja es el elevado aporte del oxígeno al agua debido a su actividad fotosintética.

La principal desventaja es que su utilidad se ve limitada debido a su escasa resistencia en aguas donde se produce el crecimiento simultáneo de algas que dan lugar a situaciones anaeróbicas lo que produce que sufran severos daños.

2. Humedal de flujo subsuperficial

Dentro de los humedales de flujo subsuperficial se dividen en humedales de flujo horizontal y humedales de flujo vertical. En este tipo de humedal la circulación del agua se realiza en un medio granular cuya profundidad depende de la profundidad que puedan alcanzar las raíces de las plantas.

En este tipo de humedal el agua tiene un mayor contacto con el sustrato y las raíces de la vegetación, por lo que tiene un mayor contacto con la superficie bacteriana que se encuentra en estos elementos. Así pues, por el contrario que para los humedales de flujo superficial, se requiere de una menor área para alcanzar un mismo nivel de depuración. Por otro lado, al pasar el agua a través del medio poroso existe un mayor riesgo de colmatación.

Según la dirección predominante del flujo a través del medio poroso estos humedales se pueden dividir en humedales de flujo horizontal y humedales de flujo vertical.

- Humedal de flujo horizontal.

En este humedal el sustrato está constituido por varias capas donde la de menor diámetro se encuentra en la parte superior y la de mayor diámetro (normalmente grava) se encuentra en la parte inferior. Este sustrato, además, sirve de material filtrante.

La alimentación se realiza de forma continua y la depuración tiene lugar mientras el agua pasa a través de los tallos y las raíces de la vegetación emergente implantada, donde sirven de soporte para la fijación de microorganismos responsables de procesos de biodegradación

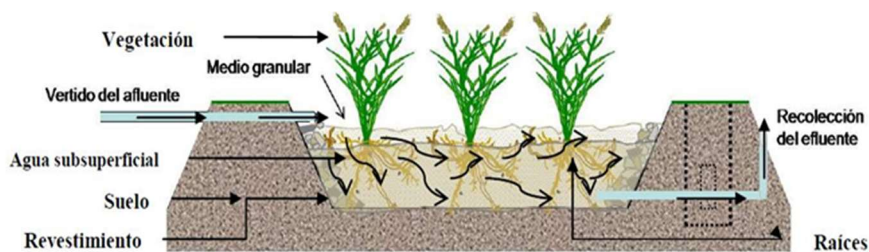


Figura 20. Humedal de flujo horizontal. Fuente: Rabat (2016)

- Humedal de flujo vertical

En este tipo de humedal el agua fluye hacia abajo por la acción de la gravedad, el agua percola y los contaminantes son eliminados por procesos físicos, químicos y biológicos.

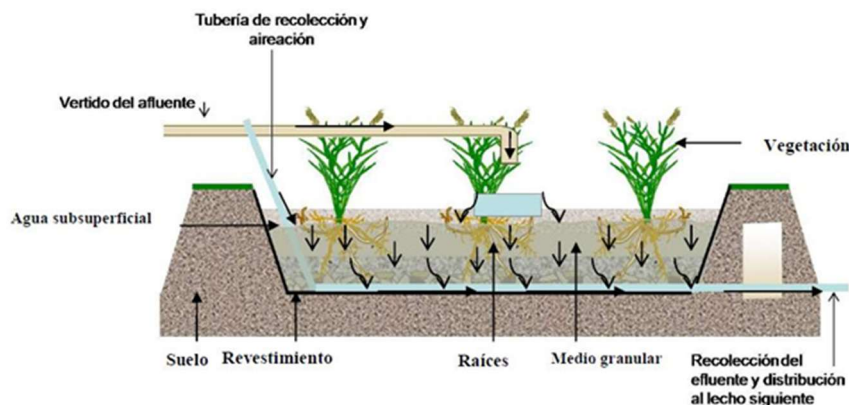


Figura 21. Humedal de flujo vertical. Fuente: Rabat (2016)

Debido a la gran variabilidad en la composición del purín, es necesaria una analítica

previa al tratamiento con humedales artificiales. En este TFM se realizará esa analítica y se valorará su aplicabilidad en los humedales artificiales analizando los resultados obtenidos.

5. Justificación y objetivos del estudio

El objetivo general de este TFM es demostrar la eficiencia en la separación sólido-líquido del purín bruto mediante el uso de la era de secado. Además, gracias a las analíticas que se realizan, también se pretende buscar alternativas basadas en la naturaleza para el posterior tratamiento del drenaje o fracción líquida que se obtiene de esta separación, que puede ayudar a reducir de manera significativa los gastos de gestión del purín, aparte de ser infraestructuras con un manejo sencillo que pueden ser gestionadas por el propio personal de la granja.

Para ello, se ha implantado una era de secado piloto de dimensiones 53 cm de largo por 35 cm de ancho con arena como medio poroso con un soporte de grava de diferentes tamaños.

Para alcanzar este objetivo, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar tanto el purín bruto de entrada como el drenaje o la fracción líquida de salida para evaluar la eficiencia en la era de secado.
- Analizar la eficiencia en la eliminación de sólidos totales, sólidos suspendidos y sólidos volátiles. Además, también se analizarán los sólidos volátiles de la fracción sólida que se va formando sobre la era de secado con el objetivo de observar si se está produciendo la mineralización de la materia orgánica.
- Analizar la turbidez de entrada de purín bruto como de salida para obtener la eficiencia de eliminación y poder contrastarlo con los parámetros mencionados anteriormente.
- Demostrar las ventajas del tratamiento en cuanto a ahorro de energía, productos químicos y simplicidad de operación.

6. Relación con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS)

El presente Trabajo de Fin de Máster (TFM) se alinea con varios de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas, demostrando su contribución a la Agenda 2030 a través de la implementación de soluciones ambientales y económicamente viables para la gestión de purines. La investigación aborda de manera directa los desafíos ambientales asociados a la producción porcina.

1. ODS 6: Agua limpia y saneamiento

El proyecto se centra en el tratamiento del purín para mitigar la contaminación del agua. Aborda la problemática de la eutrofización y la contaminación de las aguas subterráneas por nitratos, así como la contaminación de aguas superficiales por vertidos incontrolados de materia orgánica y amoníaco. La investigación evalúa la eficiencia de una era de secado piloto para separar las fracciones líquida y sólida del purín. La caracterización de la fracción líquida obtenida permite proponer soluciones sostenibles para su tratamiento, como los humedales artificiales, que buscan mejorar la calidad del agua.

2. ODS 13: Acción por el clima

El almacenamiento inadecuado del purín de cerdo contribuye directamente al cambio climático, ya que libera gases de efecto invernadero como el amoníaco, el dióxido de nitrógeno y el metano. La investigación resalta que el metano tiene un efecto invernadero 21-23 veces mayor que el CO₂. Al desarrollar e implementar un tratamiento eficaz para el purín, el proyecto contribuye a mitigar las emisiones de estos gases y, por ende, a la lucha contra el cambio climático.

3. ODS 12: Producción y consumo responsables

La producción porcina es un pilar fundamental en la industria alimentaria global, generando un subproducto (el purín) cuya gestión inadecuada plantea importantes desafíos. El proyecto promueve un enfoque sostenible para gestionar este residuo. Además, las soluciones propuestas, como la era de secado y los humedales artificiales, son infraestructuras de manejo sencillo que pueden ser gestionadas por el propio personal de la granja, lo que reduce la dependencia de servicios externos y ofrece un enfoque económicamente viable.

7. Materiales y métodos

7.1 Purín bruto

El purín que se utilizará en este proyecto proviene de la explotación agropecuaria Penta, ubicada en Bétera. En esta planta tratan el purín realizando, en primer lugar, una separación sólido-líquido mediante un cepillo automático mostrado en la Figura 22, que elimina los sólidos más gruesos.



Figura 22. Cepillo de separación sólido-líquido. Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, el purín pasa por varias balsas de decantación, donde se sigue separando la fracción líquida de la sólida por decantación como se muestra en la Figura 23.



Figura 23. Balsas de decantación. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, la fracción líquida, después de atravesar tres balsas de decantación pasa a una balsa donde para airearlo y, eliminar gas metano, se airea con ozono generado in situ como se observa en la Figura 24.



Figura 24. Aireación con ozono. Fuente: Elaboración propia.

El purín que se utiliza en este TFM es el bruto, es decir, al que no se le ha aplicado ninguno de los procesos mencionados anteriormente.

7.1.1 Caracterización del purín bruto y de la fracción líquida

Para la caracterización del purín de entrada como de la fracción líquida obtenida se han realizado ensayos para la determinación de pH, conductividad eléctrica, turbidez, sólidos totales, sólidos suspendidos y sólidos suspendidos volátiles.

Debido a la alta variabilidad del purín bruto, no se puede realizar una media de los valores que se han ido obteniendo desde que se implementó la planta piloto, por lo que se mostrará la evolución temporal de cada uno de estos parámetros para evaluar la eficacia de la planta piloto.

Con la obtención de los sólidos suspendidos volátiles (SSV) y los no volátiles (SSNV) se puede identificar si el purín bruto y la fracción líquida son mayormente orgánicos o inorgánicos, debido a que los SSV indican los sólidos orgánicos y los SSNV indican el contenido en sólidos inorgánicos.

A continuación, se indica cómo se realiza el cálculo de los sólidos totales, los sólidos suspendidos y los sólidos volátiles.

- **Sólidos totales (ST)**

Se obtienen por la diferencia de pesos entre la cápsula vacía y la cápsula con la muestra después de estar en la estufa durante un día a 105°C. La cantidad de sólidos se determina mediante la siguiente ecuación.

$$ST \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{B (mg) - A (mg)}{V (L)}$$

Siendo:

- B: Peso de la cápsula con la muestra después de la estufa a 105°C
- A: Peso de la cápsula vacía
- V: Volumen de muestra introducido en la cápsula

- **Sólidos suspendidos (SS)**

Se obtienen por la diferencia de pesos entre la cápsula vacía y la cápsula con la muestra después de ser filtrada por un filtro a vacío y de estar en la estufa durante un día a 105°C. La cantidad de sólidos suspendidos se determina mediante la siguiente ecuación.

$$SS \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{C (mg) - A (mg)}{V (L)}$$

Siendo:

- C: Peso de la cápsula con el filtro y con los sólidos suspendidos retenidos
- A: Peso de la cápsula con el filtro
- V: Volumen de muestra filtrada

- **Sólidos suspendidos volátiles (SSV) y no volátiles (SSNV)**

Con la obtención de estos dos parámetros se puede identificar el porcentaje de materia orgánica que contiene la muestra y, por ende, se puede observar si debido a la era de secado se obtiene una fracción líquida más estabilizada.

La determinación de los sólidos suspendidos volátiles se obtiene introduciendo la cápsula con la muestra ya filtrada y secada en la mufla a 550°C, que es la temperatura a la cual la materia orgánica se volatiliza.

La cantidad de SSV se obtiene mediante la siguiente ecuación.

$$SSV \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{C (mg) - D (mg)}{V (L)}$$

Siendo:

- C: Peso de la cápsula con la muestra filtrada después de la estufa a 105°C
- D: Peso de la cápsula con la muestra filtrada después de la mufla a 550°C
- V: Volumen de muestra filtrada

Y, la obtención de los SSNV se obtiene por diferencia, es decir:

$$SSNV \left(\frac{mg}{L} \right) = SS \left(\frac{mg}{L} \right) - SSV \left(\frac{mg}{L} \right)$$

7.1.2 Tasa de carga

La tasa de carga de lodos se expresa en kgST/ m²·año y representa la masa de sólidos que se secan sobre un metro cuadrado del lecho en un año (Strande et al., 2014). Cabe recalcar que este valor se trata de una estimación debido a las variaciones climáticas y ambientales que pueden darse durante el tiempo de estudio.

Se realiza una revisión bibliográfica entre diferentes estudios con ciertas similitudes con el presente TFM para decidir la tasa de carga a aplicar.

Generalmente, el rango en el que varía esta tasa de carga es de 100-200 kgST/ m²·año en climas tropicales, mientras que, en climas templados de Europa, se suelen aplicar unos 50 kgST/ m²·año. Por otro lado, según Nielsen (2010) la tasa de carga cuando se trata de lodos activados se establece en un rango de entre 30-60 kgST/ m²·año y cuando se trata

de lodos procedentes de digestores se establece una carga menor de entre 30-50 kgST/m²·año. En este TFM se decide escoger una tasa de carga inferior a la recomendada para observar los resultados que se van obteniendo, ya que el objetivo de este tratamiento es obtener un lixiviado con baja concentración de sólidos para tratarlo posteriormente en un humedal artificial. Según los resultados obtenidos se decidirá si posteriormente se aumenta la carga o se mantiene, por tanto, se escoge una tasa de carga inicial de 18 kgST/m²·año.

Además, para el cálculo del volumen a aplicar por día, se deben obtener los gramos de sólidos totales por muestra de purín. El purín de cerdo tiene mucha variabilidad, esto es debido a las variaciones en el contenido de agua que pueda haber tanto en la alimentación como en la bebida que ingieren los cerdos, así como también en la limpieza de las instalaciones, periodos de lluvia, etc. También puede haber variaciones debido a la dieta de los cerdos. Según Viñas et al. (2016) los sólidos totales en el purín de cerdo pueden variar dentro de un rango de 11-20 g/L. Se decide realizar la media entre estos dos valores y se obtiene un valor de 16 g/l de ST.

Por último, también es necesario conocer el área de la era de secado piloto, A = 0,186 m². Conociendo estos valores se pueden obtener los sólidos totales por día en la era de secado.

$$\frac{18 \text{ kg ST}}{\text{m}^2 \cdot \text{año}} \cdot \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ días}} = \frac{0,05 \text{ kg ST}}{\text{m}^2 \cdot \text{día}} \cdot 0,186 \text{ m}^2 = \frac{0,009 \text{ kg ST}}{\text{día}} = \frac{9 \text{ gST}}{\text{día}}$$

Se sabe que en 1000 mL de purín hay 16 g ST, por lo que es posible calcular el volumen de purín a suministrar diariamente para obtener la cantidad de sólidos calculada anteriormente (g ST/día)

$$\text{Volumen purín (mL)} = \frac{9 \text{ gST} \cdot 1000 \text{ mL}}{16 \text{ gST}} = 562,5 \text{ mL}$$

Como se ha comentado anteriormente, durante el proyecto se decide aumentar la tasa de carga. Posteriormente, en el apartado de resultados se analizará si este hecho ha tenido resultados positivos. Se decide aumentar la tasa de carga a 23 kgST/m²·año. Con esta tasa de carga el volumen a aplicar diariamente se calcula de la siguiente manera.

$$\frac{23 \text{ kg ST}}{\text{m}^2 \cdot \text{año}} \cdot \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ días}} = \frac{0,063 \text{ kg ST}}{\text{m}^2 \cdot \text{día}} \cdot 0,186 \text{ m}^2 = \frac{0,012 \text{ kg ST}}{\text{día}} = \frac{12 \text{ gST}}{\text{día}}$$

$$\text{Volumen purín (mL)} = \frac{12 \text{ gST} \cdot 1000 \text{ mL}}{16 \text{ gST}} = 732,53 \text{ mL}$$

7.1.3 Frecuencia de alimentación

La frecuencia de alimentación de lodo en una era de secado piloto según las fuentes bibliográficas consultadas es muy variable y evoluciona a lo largo del tiempo. Depende de las condiciones climáticas, de la capacidad de drenaje, del espesor que se va acumulando en la superficie, de la tasa de lodo a tratar, etc.

Según Neubauer et al (1986), quien realizó experiencias con eras de secado piloto en un

medio con temperatura ambiente entre 20 y 27 °C y una humedad relativa entre 72 y 93%, el drenado del agua disminuía hasta cesar completamente en 24 h, y el secado por evaporación duraba entre 24 y 72 horas.

En otro estudio, según Nielsen (2003) se recomiendan los periodos de alimentación mostrados en la Tabla 3 para humedales artificiales, que no es el caso de estudio, pero las similitudes son muy grandes.

Tabla 3. Periodos de alimentación para humedales artificiales. Fuente: Nielsen (2003).

Year of functioning	Feeding period (day)	Rest period (day)
1	2 – 3	10-20
2	4 – 5	25 – 40
3	5 – 6	30 – 55
4	6 – 7	35 – 65
8	7 – 14	70 – 120

Finalmente, teniendo en consideración los estudios mencionados y las limitaciones logísticas ya que se trata de una alimentación manual, en el presente TFM se decide realizar la alimentación de purín durante dos días con periodos de descanso de entre dos y tres días.

Así pues, la era de secado se alimenta martes y viernes dejando periodos de descanso entre dos y tres días. En la Tabla 4 se muestra de manera más visual.

Tabla 4. Frecuencia de alimentación de la era de secado. Fuente: Elaboración propia.

Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
	X			X		

X: Día de alimentación

Teniendo en cuenta que el volumen a aplicar diariamente (obtenido en el apartado anterior) es de 562,5 mL, se obtiene un volumen semanal a aplicar de 3.937,5 mL. Por tanto, si se divide este volumen semanal entre los dos días de aplicación se obtiene un volumen de 1.968,75 mL. Se decide aproximar a un volumen de dosificación a 2L para facilitar la tarea.

Cuando se sube la tasa de carga, el volumen a aplicar diariamente es de 732,53 mL, se obtiene un volumen semanal a aplicar de 5.127,71 mL. Por tanto, si se divide este volumen semanal entre los dos días de aplicación se obtiene un volumen de 2.563,86 mL. Se decide aproximar a un volumen de dosificación a 2,5L para facilitar la tarea.

La duración del experimento fue desde el mes de octubre de 2024 hasta junio de 2025. En el mes de octubre se realizó el montaje de la planta piloto. Cabe destacar que durante el mes de octubre debido a la DANA se retrasó la puesta en marcha del proyecto, iniciándose finalmente en noviembre. Se realizaron 20 viajes a la granja y se analizó un total de 34 muestras.

7.2 Era de secado piloto

Para la construcción de la era de secado piloto se utilizó una maceta impermeabilizada como medio de soporte con varios agujeros en la parte inferior para poder recoger el

drenaje del purín como se observa en la Figura 25.



Figura 25. Agujeros de drenaje. Fuente: Elaboración propia.

El medio poroso que se utilizó fue arena con un soporte compuesto de grava gruesa y grava fina en la parte inferior de la maceta. El espesor de cada capa es el siguiente: 6,9 cm de grava gruesa, 4,6 cm de grava fina y 10 cm de arena. En la Figura 26 se muestra de manera esquemática la composición de la era de secado.

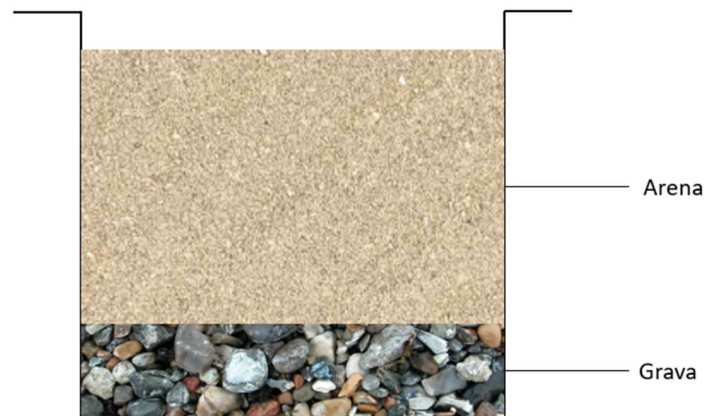


Figura 26. Esquema de la era de secado. Fuente: Elaboración propia.

Para obtener el diámetro de las partículas de arena introducidas en la maceta, se realiza una curva granulométrica. Con el objetivo de obtener una comparación del tamaño de la arena antes y después de la realización del proyecto, se realizará también la curva granulométrica de la arena de la planta piloto una vez finalizado el proyecto.

Para realizar la curva granulométrica el material necesario son los tamices que se muestran en la Figura 27, por los que se hará pasar la arena al ir moviéndolos. La cantidad de arena que se tamiza son 200 gramos para ambos casos.



Figura 27. Tamices utilizados para la realización de la curva granulométrica. Fuente: Elaboración propia.

Antes de la preparación del medio poroso en la maceta, se llevó a cabo un proceso de lavado de la arena para eliminar la mayor cantidad de finos posible, como se ha comentado anteriormente.

Las dimensiones de la era de secado piloto son de 53 cm de largo por 35 cm de ancho por 25 cm de alto. Por lo que cuenta con un resguardo de 4 cm. El área de la era de secado piloto es:

$$A = 0,53 \text{ m} \cdot 0,35 \text{ m} = 0,186 \text{ m}^2$$

Finalmente, después del montaje en la misma granja, la planta piloto quedó como se observa en la Figura 28.



Figura 28. Era de secado piloto. Fuente: Elaboración propia.

Una vez realizado el montaje de la planta piloto se intentó automatizar el proceso mediante la colocación de una bomba peristáltica para que dosificara automáticamente según los requerimientos especificados en apartados anteriores, pero no funcionó debido a la gran cantidad de sólidos que contiene el purín y, sobre todo, debido a las semillas del pienso que quedaban como residuo, esto hacía que se atascara la succión de la bomba y que no dosificara. Debido a este motivo, se tuvo que dosificar manualmente el purín.

7.3 Equipos y materiales de laboratorio

Los equipos de laboratorio empleados según los ensayos fueron los siguientes.

- ST, SS, SSV, SSNV: Cápsulas de porcelana, pinzas, desecador de sílice, estufa, mufla, probetas de diferentes volúmenes, equipo de filtración y balanza de precisión.



Figura 29. Cápsulas de porcelana y pinzas. Fuente: Elaboración propia.



Figura 30. Desecador. Fuente: Elaboración propia.



Figura 31. Estufa y mufla. Fuente: Elaboración propia.

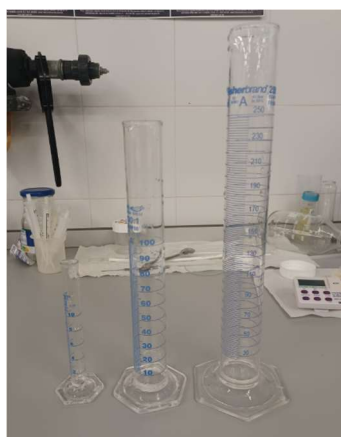


Figura 32. Probetas de diferentes volúmenes. Fuente: Elaboración propia.



Figura 33. Equipo de filtración. Fuente: Elaboración propia.

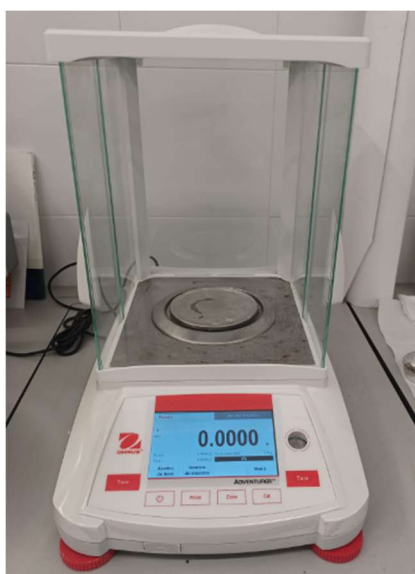


Figura 34. Balanza de precisión. Fuente: Elaboración propia.

- Turbidez: Turbidímetro



Figura 35. Turbidímetro. Fuente: Elaboración propia.

- pH y Conductividad: pH metro y conductímetro.



Figura 36. Sondas de pH y CE. Fuente: Elaboración propia.

- Porcentaje de volátiles de la parte sólida: Cápsulas de porcelana, desecador de sílice, pinzas, estufa y balanza de precisión.

7.4 Análisis estadístico ANOVA – comparación eficiencias

El Análisis de Varianza (ANOVA) es una técnica estadística utilizada para comparar las medias de dos o más grupos. Su principal objetivo es determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de estos grupos.

Se realizará un ANOVA para obtener si existen diferencias significativas entre las eficiencias obtenidas en función de si se han dosificado 2L o 2,5L para cada parámetro analizado en laboratorio (sólidos totales, sólidos suspendidos, sólidos suspendidos volátiles y turbidez). Las comparativas se muestran en apartados posteriores para cada parámetro individualmente.

Para este análisis se utiliza el programa Statgraphics. La variable dependiente es la eficiencia de cada parámetro y el factor son los diferentes volúmenes dosificados. Para cada parámetro analizado se muestran diferentes tablas con el objetivo de demostrar que en todas ellas se llega a la misma conclusión.

En todos los parámetros se realiza el análisis de la misma manera. En primer lugar, se muestran los datos introducidos, a continuación, se muestra la tabla ANOVA y el diagrama de cajas y bigotes y por último se realiza la prueba de Kruskal-Wallis.

8. Resultados y discusión

8.1 Alimentación del purín

Durante la alimentación del purín, para no ocasionar erosión en la superficie del lecho y no mezclar la arena, se distribuyeron gravas gruesas en la superficie de la era de secado sobre las que depositar el purín como se observa en la Figura 37. Estas gravas permitieron disipar la fuerza de caída del purín y no ocasionar erosión, además de distribuir homogéneamente el purín en la era de secado.

La alimentación del purín se realizó midiendo el volumen a dosificar en una probeta de 1L. Cuando se llegaba prácticamente al final de la dosificación de 1L se agitaba bien la probeta para que no quedaran sólidos decantados en la parte inferior de esta.



Figura 37. Distribución del purín sobre las gravas. Fuente: Elaboración propia.

8.2 Evolución de la era de secado

A continuación, se muestran imágenes donde se puede observar la evolución de la era de secado piloto a lo largo del tiempo. En ellas se observa un aumento de la capa de sólidos en la superficie durante el paso del tiempo llegando a formar una torta en la superficie de la era de secado.



Figura 38. Semana 1 de dosificación. Fuente: Elaboración propia.



Figura 39. Semana 2 de dosificación. Fuente: Elaboración propia



Figura 40. Semana 28 de dosificación. Fuente: Elaboración propia.



Figura 41. Semana 36 de dosificación. Fuente: Elaboración propia.



Figura 42. Semana 37 de dosificación. Fuente: Elaboración propia.



Figura 43. Semana 38 de dosificación. Fuente: Elaboración propia.



Figura 44. Semana 39 de dosificación. Fuente: Elaboración propia.

El aumento de la capa de sólidos mencionado anteriormente, no se pudo ir midiendo debido a que creció tan lentamente que no se pudo distinguir durante el paso de las semanas. Por este motivo, la última semana se mide el espesor de la capa superficial de sólidos siendo este de 9mm y se realiza una estimación del aumento a lo largo de las semanas. En la Figura 45 se puede observar un gráfico con la evolución lineal estimada del crecimiento de la capa de sólidos durante las fechas en las que se dosificó. La estimación de esta velocidad de crecimiento es de utilidad para poder estimar el tiempo de llenado del resguardo, momento en el cual se debe proceder a realizar un descanso final para secado total y posterior extracción de la fase sólida desde la superficie.

Para obtener la velocidad estimada de crecimiento de la capa de sólidos, se divide el espesor final (9mm) entre los días de dosificación (34 días). Se obtiene una velocidad de crecimiento de 0,26 mm/día de dosificación.

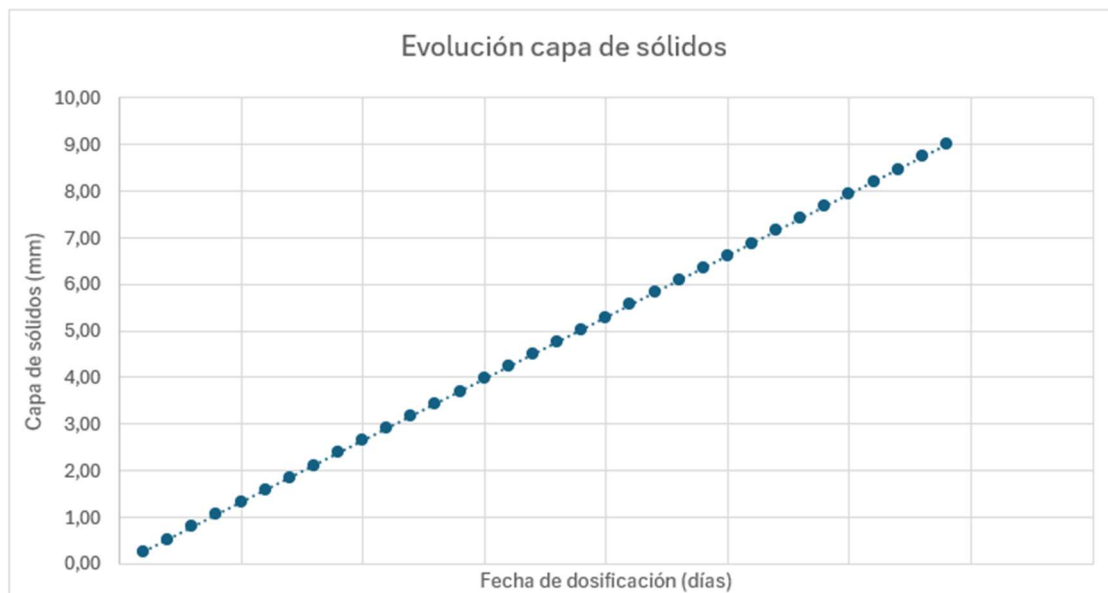


Figura 45. Aumento de la capa de sólidos. Fuente: Elaboración propia.

8.3 Capacidad de drenaje

Respecto a la capacidad de drenaje de la era de secado, es necesario recalcar que por motivos logísticos no se esperó a que drenara el volumen completo, sino que se midió el caudal de purín drenado en un tiempo determinado.

En la Figura 46 se representa el caudal medido frente a las fechas en las que se tomó el

dato. En la leyenda se muestran por orden ascendente las fechas, por lo que se empezó a medir en diciembre y finalizaron las medidas en junio.

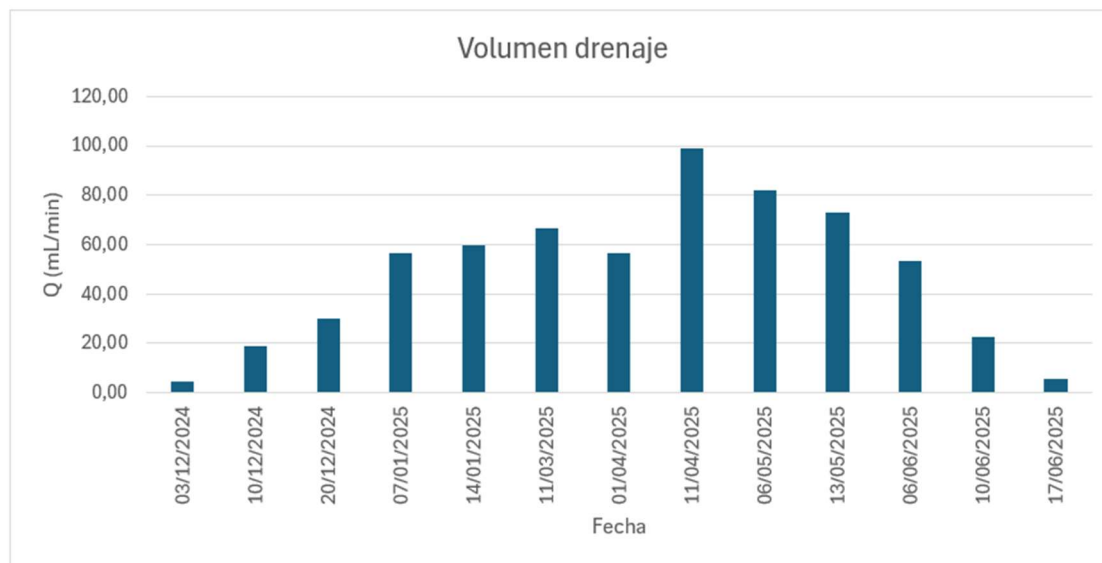


Figura 46. Evolución de la capacidad de drenaje. Fuente: Elaboración propia.

Se observa que en las seis primeras medidas de caudal, este va aumentando progresivamente. Como hipótesis se plantea que al ser los meses más fríos y al haber más humedad, tanto el purín que queda en la superficie como la misma arena de la planta piloto se secan menos, lo que provoca un aumento progresivo en el drenaje. A partir del 01/04/25 se observa una bajada en el caudal, lo que coincide también con un aumento de temperatura en esas fechas. A partir de este momento, se decide aumentar la tasa de carga aplicada, lo que se ve reflejado el 11/04/25 ya que, drena más caudal al haber pasado de aplicar 2L a 2,5L. A partir de este momento se observa cómo va bajando el caudal progresivamente, la hipótesis planteada es que la torta que se ha ido creando a lo largo del proyecto absorbe humedad y hace que salga menos volumen, aparte de que coincide con los meses más cálidos en los que se ha trabajado.

8.4 Curva granulométrica

Los resultados obtenidos al tamizar la arena virgen son los que se muestran en la Tabla 5, mientras que los resultados obtenidos al tamizar la arena de la era de secado piloto son los que se muestran en la Tabla 6. Además, en estas tablas se calcula el porcentaje retenido en cada tamiz, el porcentaje que se acumula en los tamices y el porcentaje fino, que es el material que pasa por el tamiz.

Tabla 5. Resultados del tamizado de la arena virgen. Fuente: Elaboración propia.

Tamaño de paso tamiz (µm)	Peso (g)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje retenido acumulado (%)	Porcentaje que pasa (%)
833	2,82	1,41%	1,41%	98,59%
150	191,1	95,54%	96,95%	3,05%
63	6,1	3,05%	100,00%	0,00%

Tabla 6. Resultados del tamizado de la arena una vez finalizado el proyecto. Fuente: Elaboración propia.

Tamaño de paso tamiz (μm)	Peso (g)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje retenido acumulado (%)	Porcentaje que pasa (%)
833	70,77	35,31%	35,31%	64,69%
150	128,57	64,14%	99,45%	0,55%
63	1,1	0,55%	100,00%	0,00%

Una vez obtenidos los resultados, se grafican y se obtiene la curva granulométrica de ambos tipos de arena. En la Figura 47 se representa la granulometría de la arena virgen y de la arena obtenida una vez finaliza el proyecto.

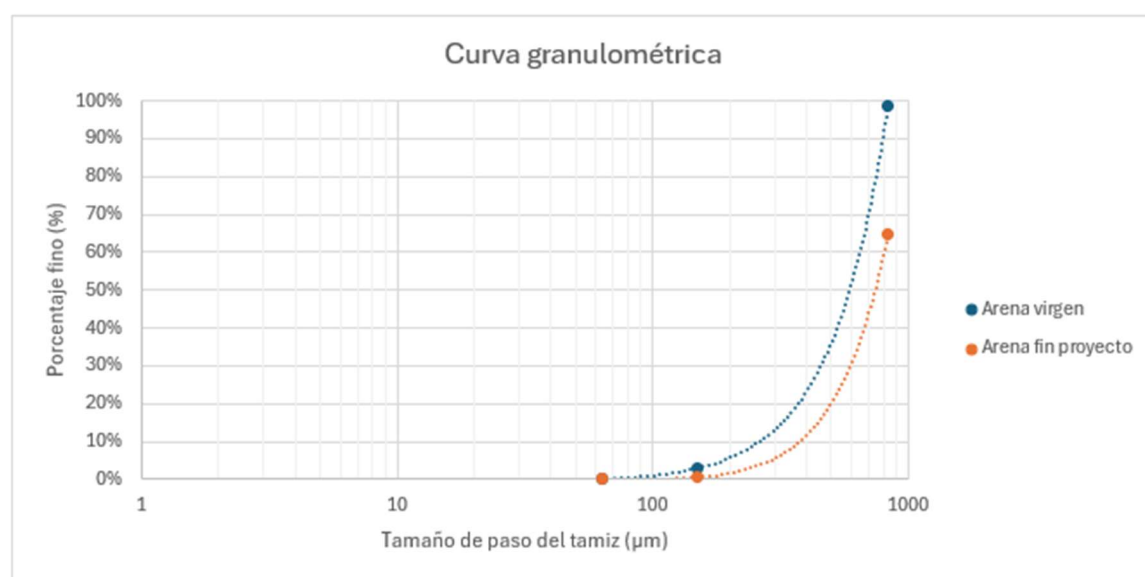


Figura 47. Curva granulométrica de las dos arenas. Fuente: Elaboración propia.

Por lo que respecta a la arena virgen, la curva muestra una arena que es predominantemente gruesa, con una distribución de tamaño bastante uniforme dentro de un rango específico (principalmente entre 150 μm y 833 μm), y carece por completo de partículas muy finas (por debajo de 63 μm). Esto es debido a que se lavó el material antes de introducirlo en la maceta para eliminar la mayor cantidad de finos posible.

Mientras que la arena al final del proyecto representa una muestra de arena que es predominantemente gruesa, careciendo por completo de partículas finas (menores a 63 μm). Una parte significativa de la muestra se encuentra en el rango de tamaño entre 150 μm y 833 μm . Sin embargo, a diferencia de la curva anterior, esta muestra tiene una proporción considerable de partículas muy grandes (más del 30% es mayor de 833 μm), lo que la hace, en promedio, más gruesa que la muestra de la curva anterior. Esto es debido a que la arena utilizada en esta curva fue reteniendo sólidos durante la duración del proyecto.

8.5 Mineralización capa de sólidos

Es importante realizar mediciones de la capa de sólidos que se va formando en la superficie de la era de secado para observar si esta capa mineraliza y va perdiendo materia orgánica convirtiéndola en materia inorgánica.

Para observar si este hecho se produce, se realiza la medición de los sólidos volátiles de la parte sólida de la superficie. En este caso, solamente se cuenta con seis mediciones, debido a que se pudo tomar muestra sólida a partir del día 6/5/25, antes de esta fecha la capa no estaba suficientemente formada.

En la Tabla 7 se muestran los resultados obtenidos. Por una parte, se muestra el porcentaje de sólidos volátiles de la capa además del porcentaje en sequedad. A parte, en la última columna se muestra la eficiencia en la reducción de sólidos volátiles respecto a la entrada de purín bruto. Cabe destacar que falta un dato de eficiencia el día 19/06/25 debido a que no se midieron sólidos suspendidos volátiles ese día.

Tabla 7. Resultados de las mediciones realizadas en la capa de sólidos. Fuente: Elaboración propia.

Fecha	SV (%)	Sequedad (%)	Eficiencia (%)
06/05/25	35,7	98,21	56,60
13/05/25	31,25	97,68	58,45
06/06/25	16,75	98,98	74,39
10/06/25	44,86	98,17	36,88
17/06/25	33,15	98,88	48,53
20/06/25	41,6	97,04	

En base a los resultados obtenidos en la Tabla 7, se confirma que la capa formada en la superficie de la era de secado fue mineralizando con el paso del tiempo, debido a que se observa una media de eficiencia de eliminación de sólidos volátiles alrededor del 55%. Se aprecia cierta disminución de la eficiencia de reducción de sólidos volátiles con respecto al purín bruto a partir de la subida de carga másica superficial aplicada. Aunque se dispone de pocos datos posterior a la subida, este descenso de la eficiencia es un tema a analizar en futuros trabajos.

Por otro lado, por lo que respecta a la sequedad obtenida, cabe destacar que las muestras se tomaban 3 días después de haber dosificado, por lo que se obtienen muy buenos resultados pudiendo considerar el purín prácticamente seco.

8.6 Evolución del pH y la CE

En el presente apartado se van a mostrar gráficos que representan la evolución del pH y la conductividad a lo largo del periodo de estudio y se plantearán posibles hipótesis acerca de la explicación de la obtención de estos resultados. Además, también se muestran gráficos estadísticos donde se puede observar la variabilidad de los datos, la media, la mediana, etc. de los cuales se pueden extraer conclusiones significativas.

En la Figura 48 se puede observar cómo durante prácticamente todo el periodo de estudio el pH de salida es más alto que el pH de entrada. Algunas posibles hipótesis sobre la explicación de estos resultados son las siguientes:

1) Volatilización de amoníaco (NH_3) en el purín de entrada.

Después de la aplicación del purín de entrada sobre la era de secado, éste comienza a interactuar con el aire y a calentarse por la radiación solar. A pesar de la rapidez con la que drena el agua, durante el tiempo que el purín permanece en contacto con el aire y antes de infiltrarse completamente, puede ocurrir una volatilización significativa de

amoníaco desde la superficie. La pérdida de NH_3 consume iones H^+ y eleva el pH del drenaje.

2) Pérdida de dióxido de carbono (CO_2) por aireación y evaporación.

El purín de entrada contiene CO_2 disuelto, al extenderse en una capa en la era de secado piloto, aumenta su superficie de contacto con la atmósfera. Esto, junto con el movimiento del agua al infiltrarse y la elevación de la temperatura por la radiación solar, facilita el desprendimiento de CO_2 disuelto, lo que reduce la acidez e implica un aumento del pH en la fracción líquida que drena.

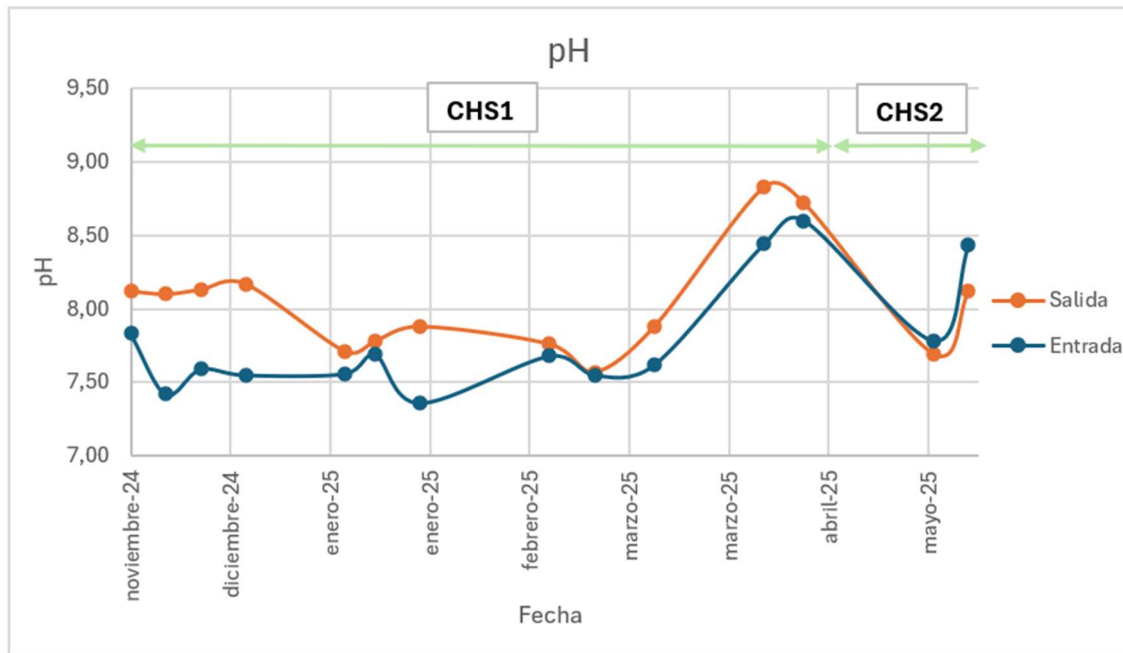


Figura 48. Evolución del pH. Fuente: Elaboración propia.

Además, en la Figura 49 se puede observar la variabilidad en los resultados obtenidos.

Existe una mayor variabilidad en el pH de entrada que en el pH de salida al ser la caja más amplia, lo que implica una estabilidad en los resultados de la salida.

Se observa que la mediana en la entrada queda sesgada hacia valores más bajos, lo que indica que son menos frecuentes los valores más altos, por el contrario, la mediana en la salida queda sesgada hacia valores más elevados, lo que implica que estos son más frecuentes.

En cuanto a la media se confirma que el pH de salida aumenta respecto al pH de entrada, siendo de 7,83 y 8,03 respectivamente.

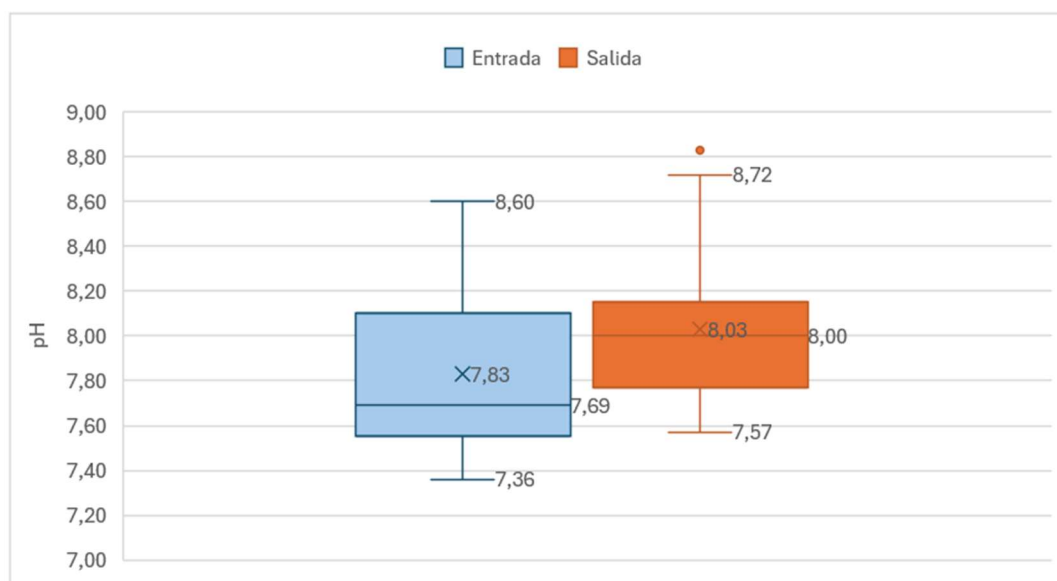


Figura 49. Diagrama de cajas y bigotes del pH de entrada frente al pH de salida. Fuente: Elaboración propia.

Por lo que respecta a la conductividad en la Figura 50 se puede observar que prácticamente durante todo el periodo de estudio la conductividad de salida está por debajo de la conductividad de entrada excepto a partir de mayo, donde esta situación se invierte y pasa a ser la conductividad de salida más alta que la conductividad de entrada.

A continuación, se exponen diferentes hipótesis acerca de la explicación de este comportamiento. Que la conductividad de salida sea más baja que la de entrada puede ser debido a dos factores. El primero, a la retención de sólidos y sales en la era, por lo que en el drenaje obtenido es menor la conductividad. El segundo, en el periodo de noviembre a abril, como se observa en los anexos, son periodos más lluviosos de lo habitual, entonces, que la conductividad del lixiviado sea menor que la de la entrada puede ser debido al factor de dilución por efecto de la lluvia.

Por otro lado, las hipótesis que se plantean sobre lo que podría haber sucedido en el momento en el que la conductividad de salida supera la de entrada son las siguientes. En primer lugar, a partir de finales de abril y principios de mayo se observa un aumento de las temperaturas, lo que puede llevar a que el lixiviado se concentre por evaporación. En segundo lugar, puede ser debido a la lixiviación o disolución de las sales acumuladas en la era de secado. Debido a la acumulación de sales a lo largo del tiempo de estudio (se recuerda que este suceso ocurre en la etapa final) esta agua puede lixiviar o arrastrar las sales acumuladas, lo que provocaría que el drenaje tuviera una concentración de sales mayor que la de entrada, es decir, mayor conductividad.

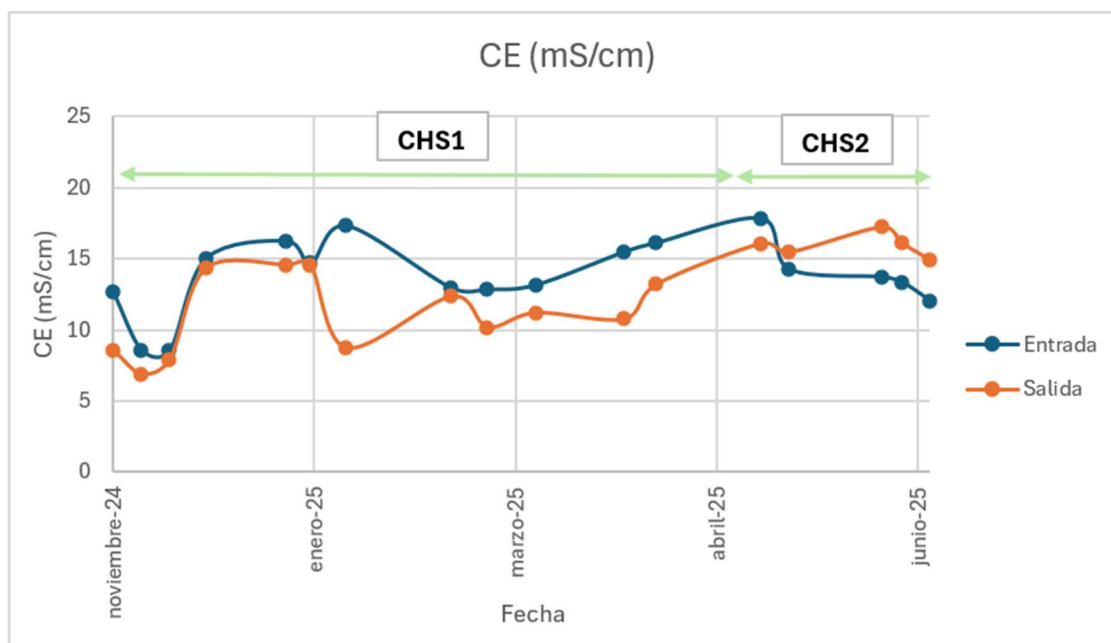


Figura 50. Evolución de la conductividad. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, en el diagrama de cajas y bigotes de la Figura 51 se resume la distribución de la conductividad tanto para el purín de entrada como del drenaje de salida de la era de secado. Se observa, confirmado lo visto en la Figura 50, que tanto la media como la mediana de la conductividad del drenaje de salida son ligeramente inferiores a la de la entrada. En promedio, la era de secado contribuye a la reducción de la conductividad del efluente drenado. Ambos muestran una variabilidad significativa, pero la conductividad de salida muestra más dispersión.

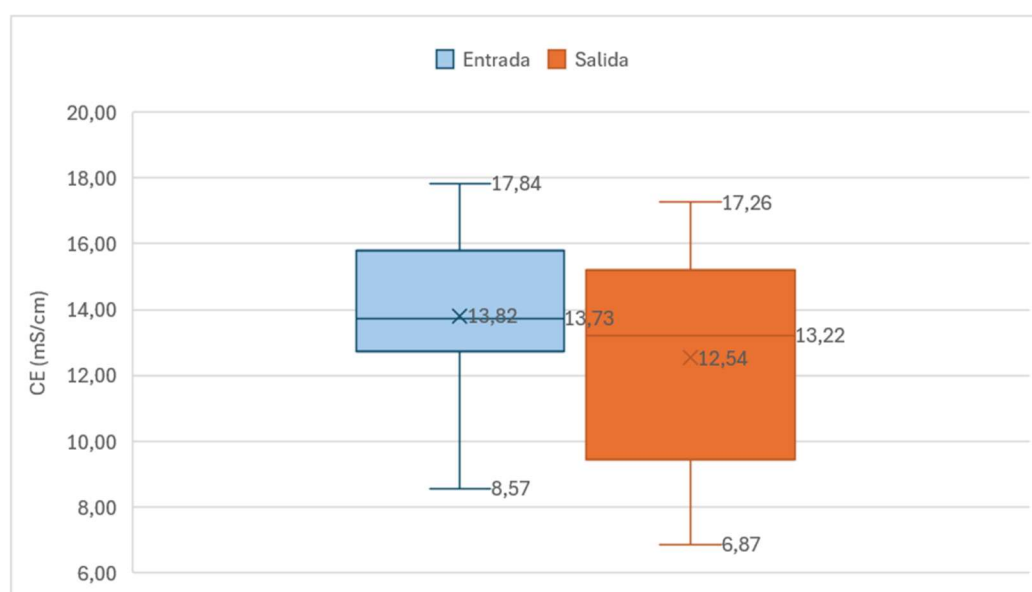


Figura 51. Diagrama de cajas y bigotes de la conductividad. Fuente: Elaboración propia.

Según el estudio realizado por El Bied (2021) en el que construye un humedal artificial para tratar purín de cerdo con diferentes capas de material filtrante, obtiene una eficiencia de eliminación de conductividad del 14% siendo esta muy similar a la obtenida en el presente estudio, de un 9,28%. Cabe destacar que en el presente TFM solamente se utiliza arena y grava de material filtrante. No existe una diferencia significativa en la eliminación

de conductividad comparando ambos estudios, lo que sugiere que la eliminación de conductividad en este tipo de sistema es difícil de conseguir.

Por otro lado, cabe destacar la dificultad de hacer crecer las plantas de un humedal artificial en el medio tan salino que se produce cuando el humedal se alimenta de purín. Esta dificultad recae en el hecho de que, en ambientes salinos, la concentración en el suelo y en el purín de alimentación es más alta que la de las raíces de las plantas, lo que genera que tengan dificultad para absorber agua.

8.7 Evolución de los sólidos

La cuantificación de los sólidos retenidos es un parámetro crucial para evaluar la eficiencia de operación de una era de secado piloto. Además, la evaluación de los sólidos obtenidos en el drenaje de la era de secado piloto, permitirá proponer tratamientos para la fracción líquida de salida en apartados posteriores.

Este apartado presenta los resultados detallados sobre la remoción de sólidos, desglosándolos en tres categorías fundamentales: sólidos totales (ST), sólidos suspendidos (SS) y sólidos suspendidos volátiles (SSV). El análisis de estos parámetros permite comprender la capacidad del sistema para retener los sólidos que contiene el purín.

8.7.1 Sólidos totales

En la Figura 52 se muestra la evolución de los sólidos totales del purín de entrada como del drenaje de salida, cabe destacar que se trata de puntos discretos, se han introducido las líneas para una mejor visualización. De ella se puede extraer que la era de secado es efectiva en cuanto a remoción de sólidos totales del purín, ya que, la concentración de ST en la salida es consistentemente menor que en la entrada a lo largo del tiempo de estudio.

Por otro lado, se observa que existe una alta variabilidad en la concentración de ST en la entrada, como ya se había comentado en apartados anteriores, el purín presenta una alta variabilidad debido a la dependencia que tiene de diferentes factores. Aunque la entrada tenga una alta variabilidad el sistema es capaz de reducir la concentración de ST incluso en los momentos de mayor carga de sólidos.

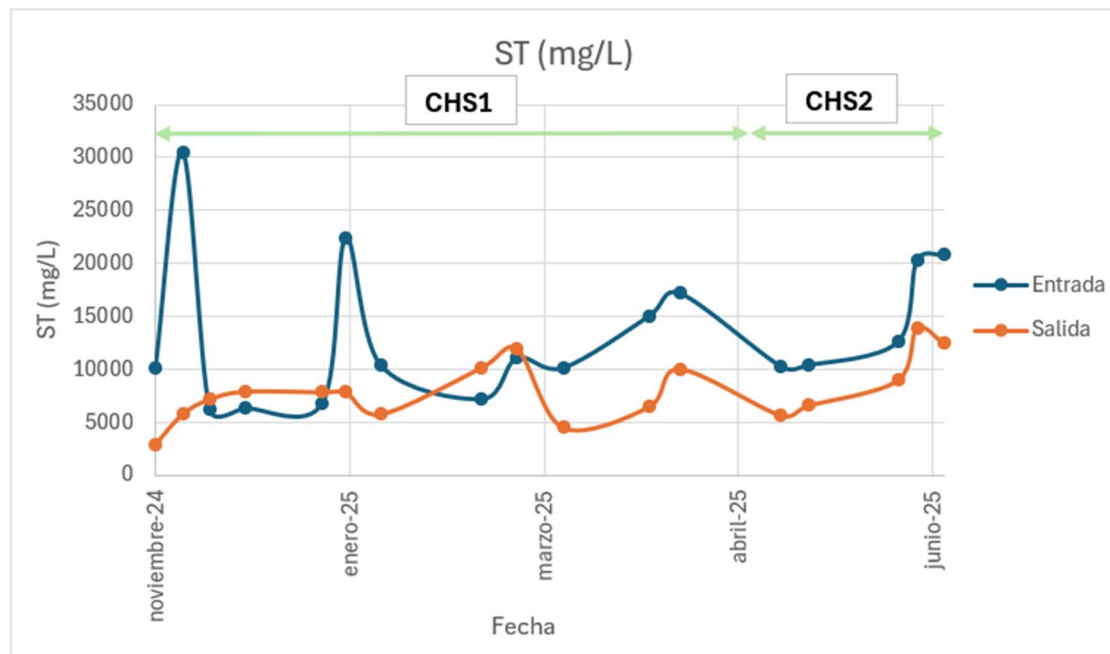


Figura 52. Evolución de los sólidos totales. Fuente: Elaboración propia.

Un parámetro importante de obtener es la eficiencia en la remoción de ST. En la Figura 53 se observa el gráfico donde se muestra la eficiencia (%) a lo largo de los meses de estudio. En promedio la eficiencia es de un 35,13%. No es un valor demasiado elevado, esto puede ser debido a las características fisicoquímicas del purín en cuanto a la gran cantidad de sales y de materia orgánica disuelta que contiene, como se verá en el apartado posterior donde se hablará de los sólidos disueltos.

Además, como se vio en el apartado anterior que trataba sobre la conductividad, en ella tampoco se observa una gran diferencia entre la entrada y el drenaje líquido, por lo que se concluye que tanto las sales como la materia orgánica disuelta no sufren grandes cambios.

Por otro lado, se observa que hay momentos donde la eficiencia es nula, es decir, la concentración de ST a la salida es mayor que la de ST a la entrada. Si se observa la Figura 52, estos momentos coinciden con concentraciones de ST bajas a la entrada. Por el contrario, los momentos de mayor eficiencia, si se comparan ambos gráficos, coinciden con los momentos de mayor carga de ST en la entrada. Esto podría indicar que el sistema se desempeña mejor cuando hay una mayor cantidad de sólidos para procesar.

Comparando con la eficiencia de eliminación en cuanto a sólidos totales obtenida en otros estudios, concretamente en el realizado por Fiorella (2024) donde trata fango de una ETAP cuya concentración es de 17.468 mg/L con dos humedales artificiales distintos, esta obtiene una eficiencia del 5,43% para el H-1 y del 26,16% para el H-2. En el presente TFM se obtiene una eficiencia de eliminación del 35,13% en promedio, mayor que en el estudio realizado por Fiorella para ambos humedales.

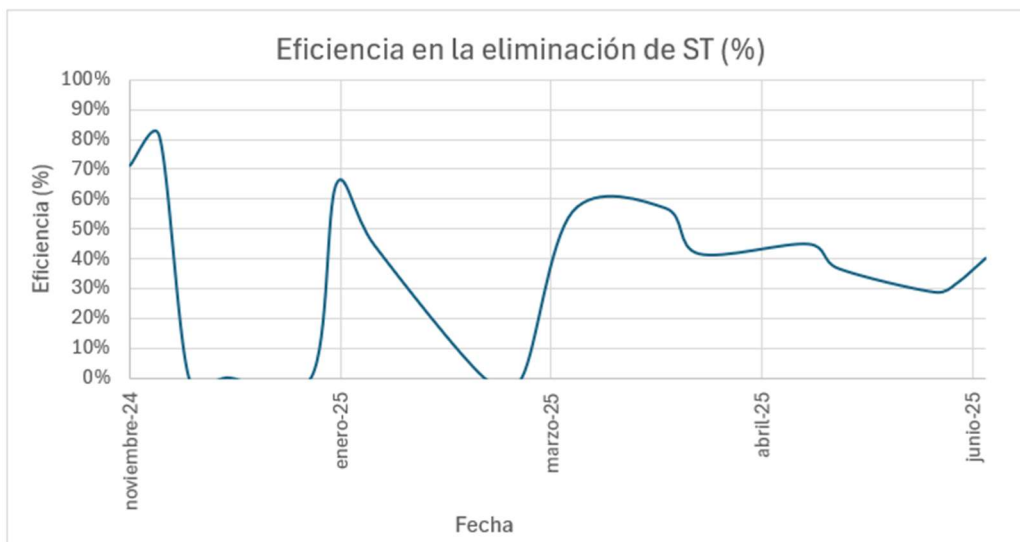


Figura 53. Evolución de la eficiencia en la eliminación de ST. Fuente: Elaboración propia.

Por último, en la Figura 54 se observa el gráfico de cajas y bigotes donde a simple vista se identifican los parámetros estadísticos más importantes. De este gráfico se extrae que existe una reducción significativa de los ST en el drenaje. En promedio, el drenaje obtiene una media de 8.005 mg/L mientras que la entrada tiene 13.392,06 mg/L, por lo que la era de secado piloto está reteniendo una parte importante de los sólidos del purín.

Por otro lado, se observa una alta variabilidad en la entrada de purín bruto (desde 6.204 mg/L hasta 30.516 mg/L), a pesar de estas fluctuaciones, la salida no presenta la misma tendencia, su variabilidad es mucho menor, lo que implica que el sistema es robusto frente a variaciones en la calidad del influente.

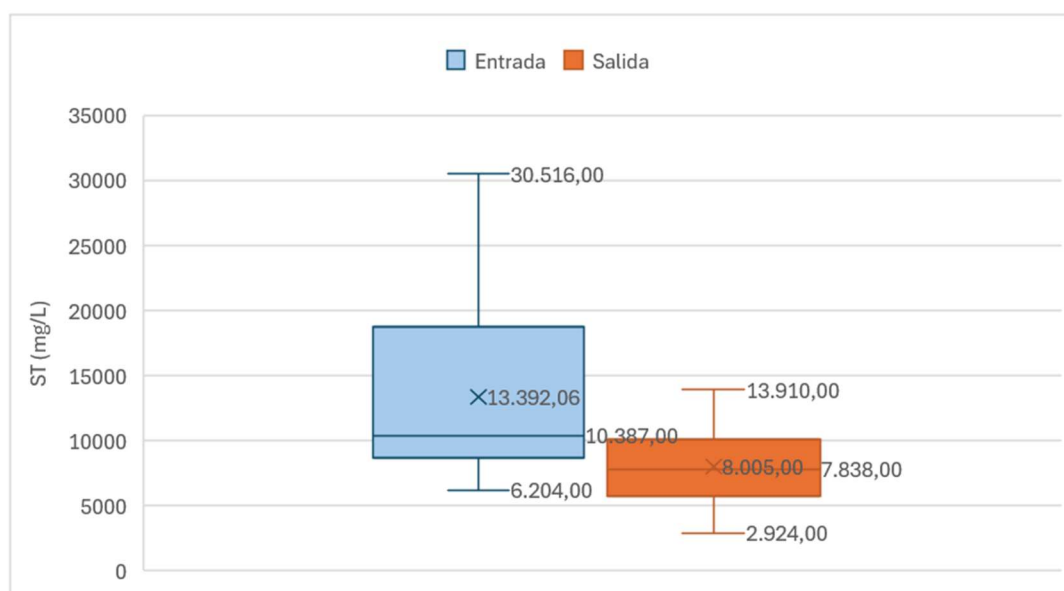


Figura 54. Diagrama de cajas y bigotes de los ST. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, a continuación, se realiza el análisis estadístico ANOVA.

Los datos que se utilizan son los que se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Datos de las eficiencias de ST (%) introducidos en Statgraphics. Fuente: Statgraphics.

	Eficiencia sólidos totales (%)	Diferentes volúmenes
	Numérico	Numérico
1	71.09	1
2	81.05	1
3	0	1
4	0	1
5	0	1
6	64.99	1
7	44.43	1
8	0	1
9	0	1
10	55.65	1
11	56.87	1
12	41.53	2
13	44.79	2
14	36.64	2
15	28.64	2
16	31.51	2
17	40.05	2

Con estos datos se construye la tabla ANOVA mostrada en la Tabla 9.

Tabla 9. Tabla ANOVA de las eficiencias de ST. Fuente: Statgraphics.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	39.4097	1	39.4097	0.05	0.8246
Intra grupos	11620.7	15	774.716		
Total (Corr.)	11660.1	16			

La tabla ANOVA descompone la varianza de Eficiencia sólidos totales (%) en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 0.05, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Eficiencia sólidos totales (%) entre un nivel de Diferentes volúmenes y otro, con un nivel del 5% de significación.

En el gráfico de cajas y bigotes representado en la Figura 55 se observa que las medias son muy similares.

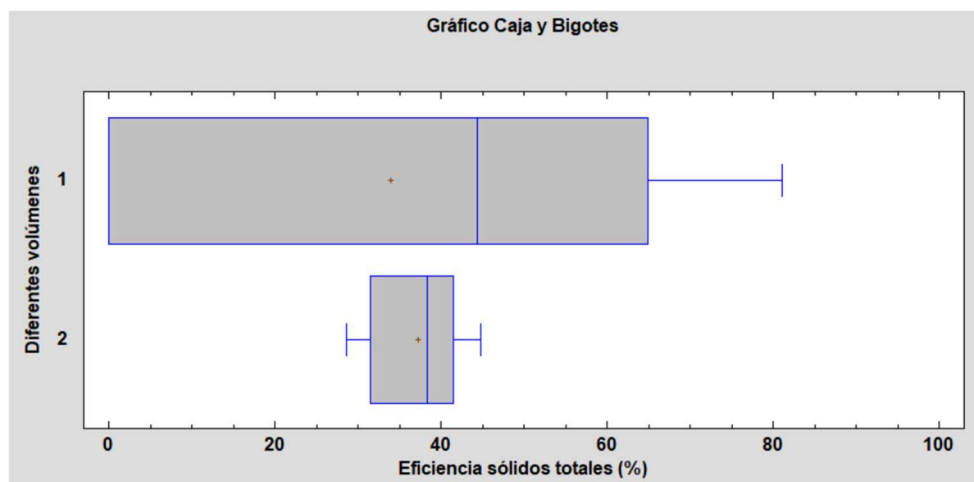


Figura 55. Diagrama de cajas y bigotes de las eficiencias de ST. Fuente: Statgraphics.

Por otro lado, en la Tabla 10 se muestra la prueba de Kruskal-Wallis. Esta prueba evalúa la hipótesis de que las medianas de Eficiencia sólidos totales (%) dentro de cada uno de los 2 niveles de Diferentes volúmenes son iguales.

Tabla 10. Prueba de Kruskal-Wallis para las eficiencias de ST. Fuente: Statgraphics.

Diferentes volúmenes	Tamaño Muestra	Rango Promedio
1	11	9.18182
2	6	8.66667

Estadístico = 0.0414192 Valor-P = 0.838731

intervalos de confianza del 95.0%

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
1 - 2		0.515152	5.0231

Primero se combinan los datos de todos los niveles y se ordenan de menor a mayor. Luego se calcula el rango (rank) promedio para los datos de cada nivel. Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza.

Debido a los resultados obtenidos en el análisis estadístico, interesa trabajar con la carga de 23 kgST/m²·año para reducir la superficie necesaria de tratamiento. Si en el análisis estadístico de los parámetros que se comentan a continuación se obtienen los mismos resultados se debería seguir el estudio probando con cargas de sólidos mayores.

8.7.2 Sólidos suspendidos

A continuación, se muestran las gráficas de los resultados obtenidos para los sólidos suspendidos. En la Figura 56 se muestra la evolución temporal de los valores que se han ido obteniendo. De ella se puede extraer que a pesar de los altos picos de concentración que se observan a la entrada en algunos momentos, la concentración en el drenaje permanece baja y estable, lo que implica también una gran robustez en el proceso de separación sólido-líquido.

Este gráfico de SS se correlaciona con el de ST (Figura 52) y refuerza las conclusiones extraídas anteriormente, dado que los sólidos totales incluyen a los sólidos suspendidos y a los sólidos disueltos, una reducción tan marcada en los sólidos suspendidos implica que la mayor parte de la masa de sólidos eliminada por la era de secado son precisamente los sólidos suspendidos. Por otra parte, esta conclusión extraída explica también las altas

conductividades obtenidas en el drenaje (Figura 50), debido a que el sistema no elimina apenas sólidos disueltos, por lo que las conductividades en el drenaje siguen siendo elevadas y también la baja eficiencia en la eliminación de sólidos totales como se ha comentado anteriormente. Para reforzar esta conclusión, también se muestra la Figura 57, donde se observa la concentración de sólidos totales, de sólidos disueltos y de sólidos suspendidos y se observa claramente que la mayor parte de los sólidos son disueltos.

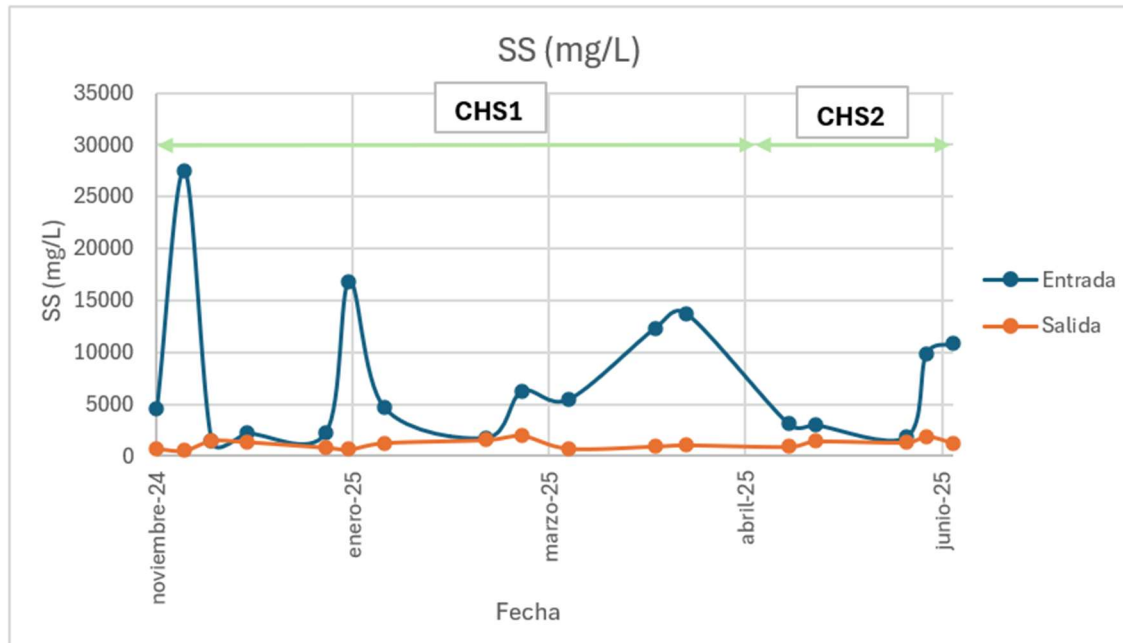


Figura 56. Evolución de los SS. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 56, no se observa una diferencia significativa entre las dos cargas hidráulicas superficiales, como se verá también posteriormente en el análisis estadístico ANOVA. Se mantienen muy estables los sólidos en suspensión a la salida de la era de secado piloto independientemente de la concentración de entrada aplicada, tanto en el periodo de la primera carga hidráulica superficial, como en el periodo de la segunda. Este resultado da pie a continuar experimentando con cargas hidráulicas superiores.

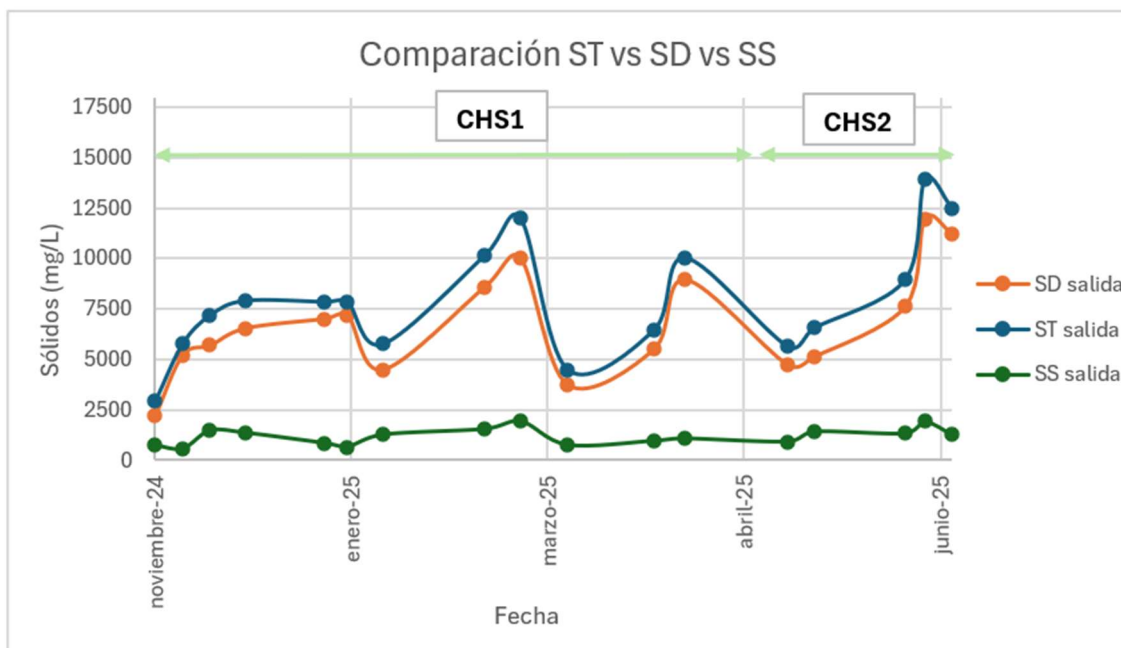


Figura 57. Comparación entre los ST, SD y SS. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 58 se observa la evolución temporal de la eficiencia en la eliminación de sólidos suspendidos. Se ven puntos donde la eficiencia baja mucho incluso llegando a 0 en los meses de diciembre y febrero. Al igual que en los sólidos totales, estas bajadas bruscas de eficiencia coinciden, si se observa la Figura 56, con concentraciones especialmente bajas de sólidos suspendidos en la entrada de purín bruto, de lo cual se puede extraer que el sistema funciona mejor con elevadas concentraciones a la entrada.

La media de la eficiencia de eliminación de sólidos suspendidos es del 65,88%. Comparando con el estudio realizado por El Bied (2021), donde trata purín en un humedal artificial, este obtiene una mayor eliminación de sólidos suspendidos debido a la sucesión de capas de diferente composición a lo largo del humedal, incluyendo zeolitas, por lo que, el valor de eficiencia obtenido en el presente TFM se considera muy bueno.



Figura 58. Evolución de la eficiencia en la eliminación de SS. Fuente: Elaboración propia.

Por último, en la Figura 59 se pueden observar de una manera clara los valores

estadísticos de los resultados. Este gráfico resume la tendencia general observada en el gráfico de líneas de SS a lo largo del tiempo: grandes fluctuaciones en la entrada versus una salida muy plana y baja. La estrechez de la caja y los bigotes en la salida, junto con los valores bajos, sugiere que el proceso de filtración dentro de la era es muy eficiente para retener las partículas suspendidas. La media de SS a la entrada es de 7.511,12 mg/L mientras que la media en el drenaje de salida es de 1.186,92 mg/L. Aunque todavía sea demasiado alta la salida, la era de secado tiene una buena capacidad de amortiguar grandes variaciones en la concentración de sólidos de entrada.

Como se ha comentado, la concentración de sólidos en suspensión a la salida sigue siendo elevada. Si se compara con un agua residual urbana típica cuyos valores se muestran en la Tabla 11, la concentración es un 66,3% mayor que la concentración media de SS.

Tabla 11. Valores típicos de una ARU. Fuente: Adaptado de Henze (2008)

Parámetro	Unidades	Fuerte	Media	Débil
DQO	mg O ₂ /l	1200	750	500
DBO ₅	mg O ₂ /l	560	350	230
AGV (acético)	mg/l	80	30	10
NT	mg N/l	100	60	30
NO	mg N/l	25	15	10
NH ₄ ⁺	mg N/l	75	45	20
NO ₃ ⁻ +NO ₂ ⁻	mg N/l	0.5	0.2	0.1
PT	mg P/l	25	15	6
PO	mg P/l	10	5	2
Ortofosfatos	mg P/l	15	10	4
SS	mg /l	600	400	250
SSV	mg/l	480	320	200
Alcalinidad	eqv./m ³	7	4	1
pH		8.0	7.5	7.0

Aunque no se haya reducido esta concentración a la de una ARU, podría ser viable tratarla mediante humedales artificiales. Según el estudio realizado por Fiorella (2024), en él trata una concentración de sólidos del fango de 3,67 g/l en un humedal artificial obteniendo buenas eficiencias de eliminación. Cabe destacar que el fango utilizado en el estudio mencionado es un fango de potabilizadora, siendo sus características muy diferentes a las del purín, debido a que el fango de ETAP es un residuo mayoritariamente inorgánico mientras que el purín es mayormente orgánico. Con esto, se pretende recalcar que por lo que respecta a la concentración de sólidos cabría la posibilidad de tratarlos en humedales artificiales, que el drenaje tenga una concentración elevada no lo imposibilita, pero sería necesario la realización de estudios para obtener la eficiencia del sistema.

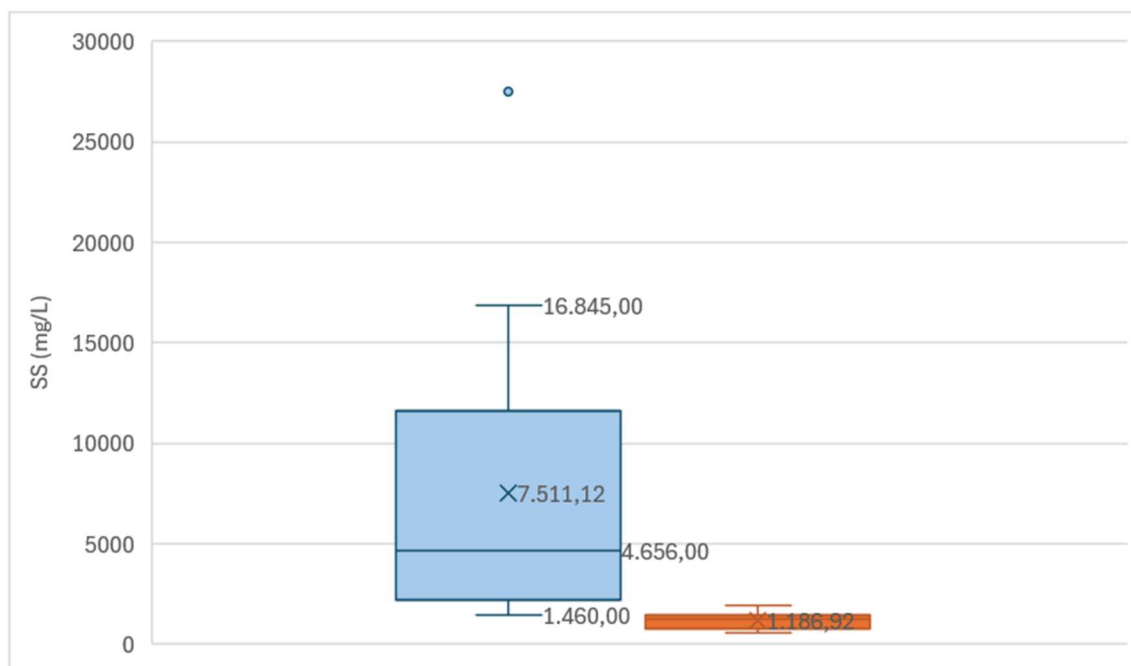


Figura 59. Diagrama de cajas y bigotes de los SS. Fuente: Elaboración propia.

De la misma manera que para los sólidos totales, se realiza el análisis estadístico ANOVA.

En la Tabla 12 se muestran los datos introducidos.

Tabla 12. Datos de las eficiencias de SS (%) introducidos en Statgraphics. Fuente: Statgraphics.

	Eficiencia SS (%)	Diferentes volúmenes
	Numérico	Numérico
1	83.9	1
2	98.0	1
3	0	1
4	37.5	1
5	62.0	1
6	96.1	1
7	72.5	1
8	12.3	1
9	68.5	1
10	86.3	1
11	92.2	1
12	92.1	2
13	70.2	2
14	52.0	2
15	27.5	2
16	80.4	2
17	88.4	2

A continuación, se muestra la tabla ANOVA.

Tabla 13. Tabla ANOVA de las eficiencias de SS. Fuente: Statgraphics.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	60.6209	1	60.6209	0.06	0.8056
Intra grupos	14490.7	15	966.049		
Total (Corr.)	14551.4	16			

Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Eficiencia SS (%) entre un nivel de Diferentes volúmenes y otro, con un nivel del 5% de significación.

En el diagrama de cajas y bigotes mostrado en la Figura 60 se observa la media de las eficiencias y no hay apenas diferencia.

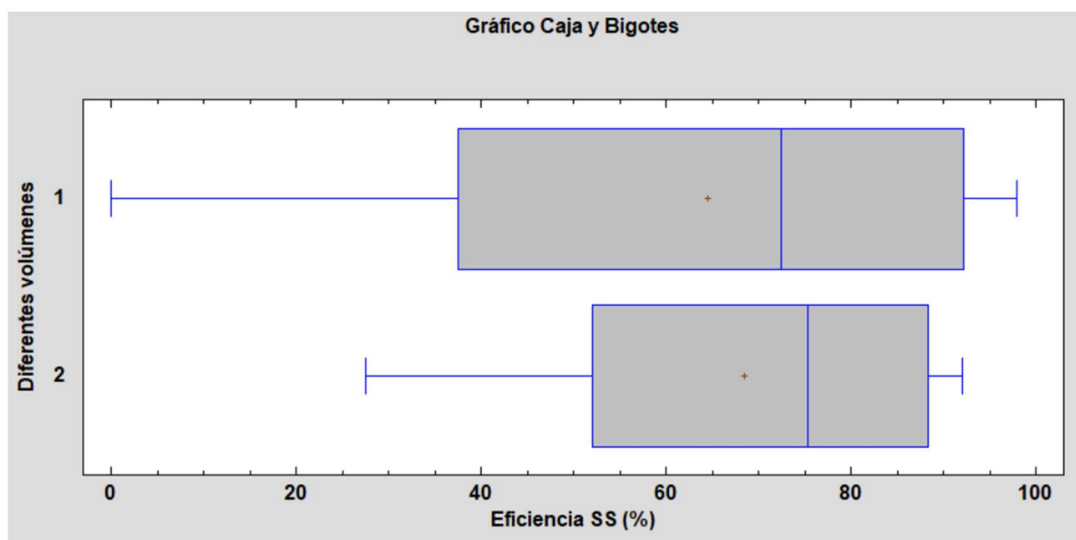


Figura 60. Diagrama de cajas y bigotes de las eficiencias de SS. Fuente: Statgraphics.

Por lo que respecta a la prueba de Kruskal-Wallis mostrada en la Tabla 14, se concluye que puesto que el valor-P es mayor o igual que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza.

Tabla 14. Prueba de Kruskal-Wallis para las eficiencias de SS. Fuente: Statgraphics.

Diferentes volúmenes	Tamaño Muestra	Rango Promedio
1	11	9.09091
2	6	8.83333

Estadístico = 0.010101 Valor-P = 0.919944

intervalos de confianza del 95.0%

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
1 - 2		0.257576	5.0231

Al igual que con los sólidos totales, debido a los resultados obtenidos en el análisis estadístico, interesa trabajar con la carga de 23 kgST/m²·año para reducir la superficie necesaria de tratamiento.

8.7.3 Sólidos suspendidos volátiles

El análisis de los sólidos suspendidos volátiles es crucial debido a que es un indicador de la cantidad de materia orgánica que contiene la muestra analizada.

En la Figura 61 se muestra el gráfico de evolución de los sólidos suspendidos volátiles tanto de la entrada de purín bruto como del drenaje líquido. Como en el resto de los gráficos comentados hasta ahora se observa la alta variabilidad en la entrada de purín, pero una baja concentración en el drenaje sin apenas variabilidad, lo que indica una gran robustez del sistema en cuanto a la remoción de sólidos suspendidos volátiles.

Si se comparan las dos cargas hidráulicas aplicadas, no se observan diferencias significativas en cuanto a los resultados del drenaje de la planta piloto. Al igual que con los sólidos suspendidos, se observa una baja variabilidad de los sólidos suspendidos volátiles en el drenaje tanto con la primera carga aplicada como con la segunda. Este hecho implica que en futuros experimentos se puede seguir incrementando la carga hidráulica aplicada con el objetivo de disminuir la superficie de la era de secado.

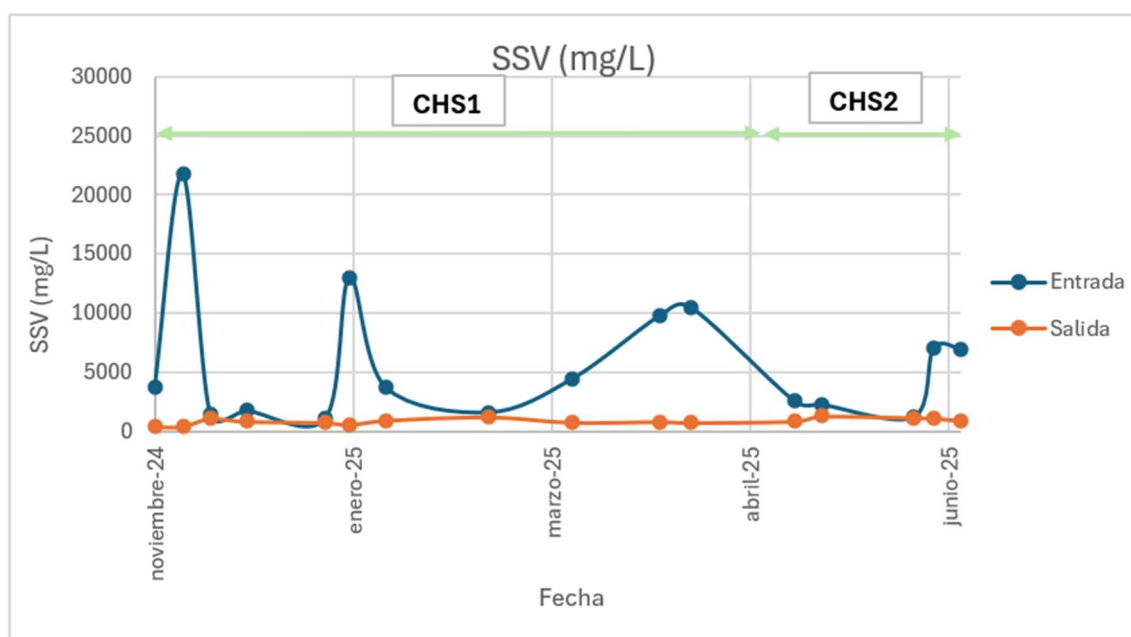


Figura 61. Evolución de los SSV. Fuente: Elaboración propia.

Por lo que respecta a la eficiencia, como se observa en la Figura 62 es generalmente alta, sin llegar nunca a valores de 0. En la mayor parte del tiempo supera el 80%, excepto en periodos concretos donde baja del 50%, reforzando lo que se ha visto y se ha explicado en gráficos de apartados anteriores, la eficiencia sufre una disminución cuando la concentración de sólidos suspendidos volátiles en la entrada es más baja y, por el contrario, se comporta de una manera mucho más eficiente cuando hay una gran concentración de estos en la entrada.

La media de la eficiencia es de 65,16% por lo que generalmente se puede considerar que la planta piloto es eficiente en la remoción de SSV y, en consecuencia, de la materia orgánica del purín de entrada.

Esta eficiencia se debe principalmente a la capacidad filtrante del lecho, y a parte de la capa de lodos que se ha ido formando en la superficie que también actúa como medio filtrante.

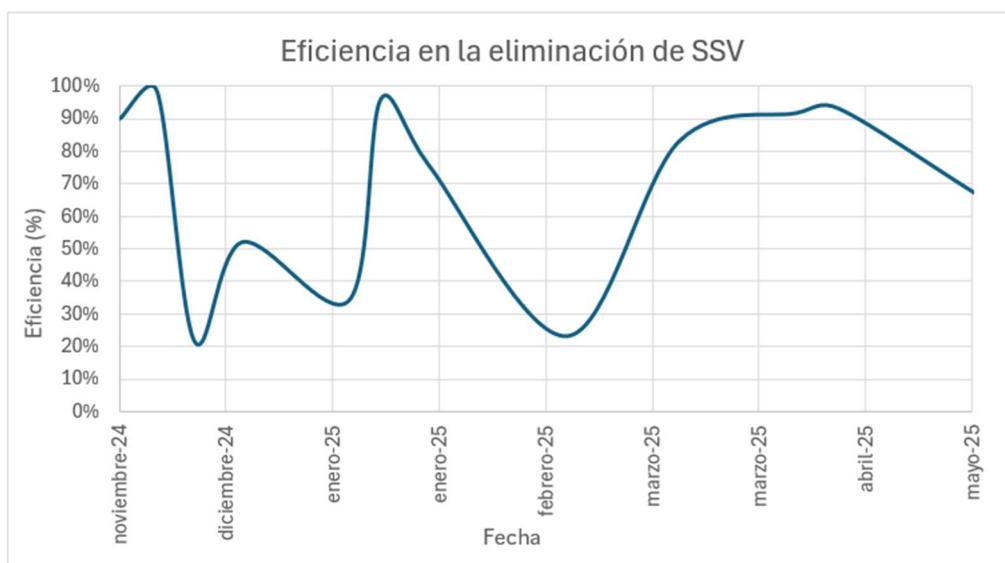


Figura 62. Evolución de la eficiencia de eliminación de SSV. Fuente: Elaboración propia.

Por último, en la Figura 63 se muestra el gráfico de cajas y bigotes donde se ven los parámetros estadísticos más importantes. Como refuerzo a los gráficos anteriores, la caja de la entrada es muy amplia, lo que implica una alta variabilidad en los datos, mientras que, por el contrario, la caja del drenaje de salida es muy estrecha, lo que indica que los resultados obtenidos apenas varían. En cuanto a la media obtenida, la de la entrada es de 5.795,15 mg/L, mientras que la de la salida es de 857,5 mg/L, la diferencia entre estos valores es del 85%.

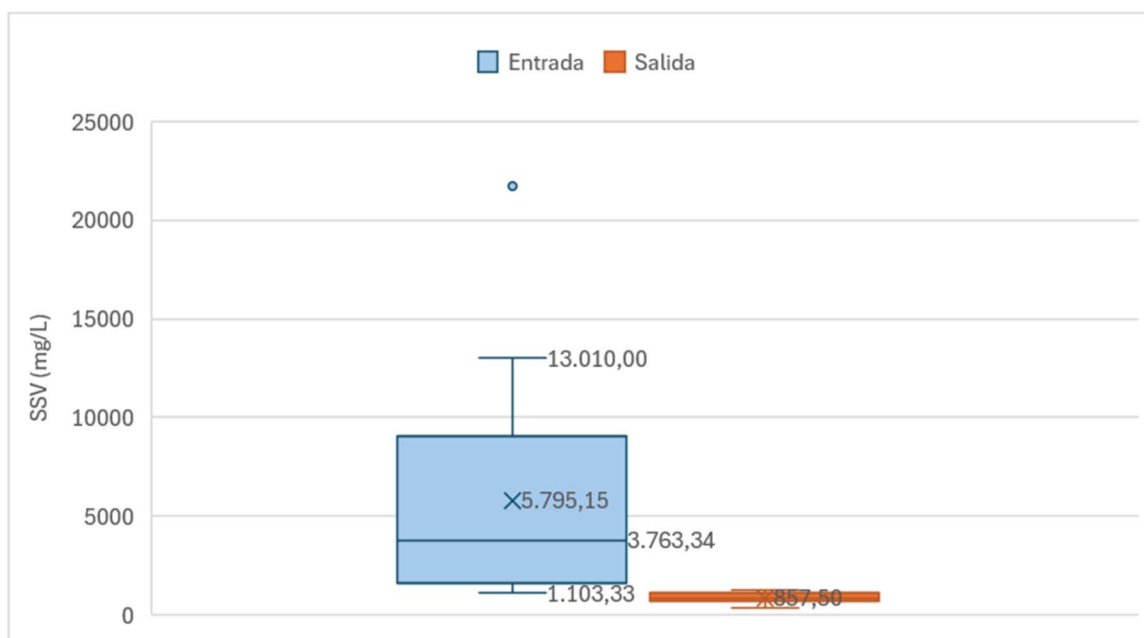


Figura 63. Diagrama de cajas y bigotes de los SSV. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se realiza el análisis estadístico.

Los datos introducidos son los que se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15. Datos de las eficiencias de SSV (%) introducidos en Statgraphics. Fuente: Statgraphics.

	Eficiencia SSV (%)	Diferentes volúmenes
	Numérico	Numérico
1	89.91	1
2	98.23	1
3	21.57	1
4	52.01	1
5	34.02	1
6	95.94	1
7	75.62	1
8	23.13	1
9	82.96	1
10	91.64	1
11	93.01	2
12	66.58	2
13	42.67	2
14	4.13	2
15	84.00	2
16	87.11	2

En cuanto a la tabla ANOVA mostrada en la Tabla 16 se observa que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Eficiencia SSV (%) entre un nivel de Diferentes volúmenes y otro, con un nivel del 5% de significación. Además, en la Figura 64 donde se muestra el diagrama de cajas y bigotes tampoco se observa una diferencia significativa en las medias.

Tabla 16. Tabla ANOVA de las eficiencias de SSV. Fuente: Statgraphics.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	48.2317	1	48.2317	0.05	0.8316
Intra grupos	14386.9	14	1027.63		
Total (Corr.)	14435.1	15			

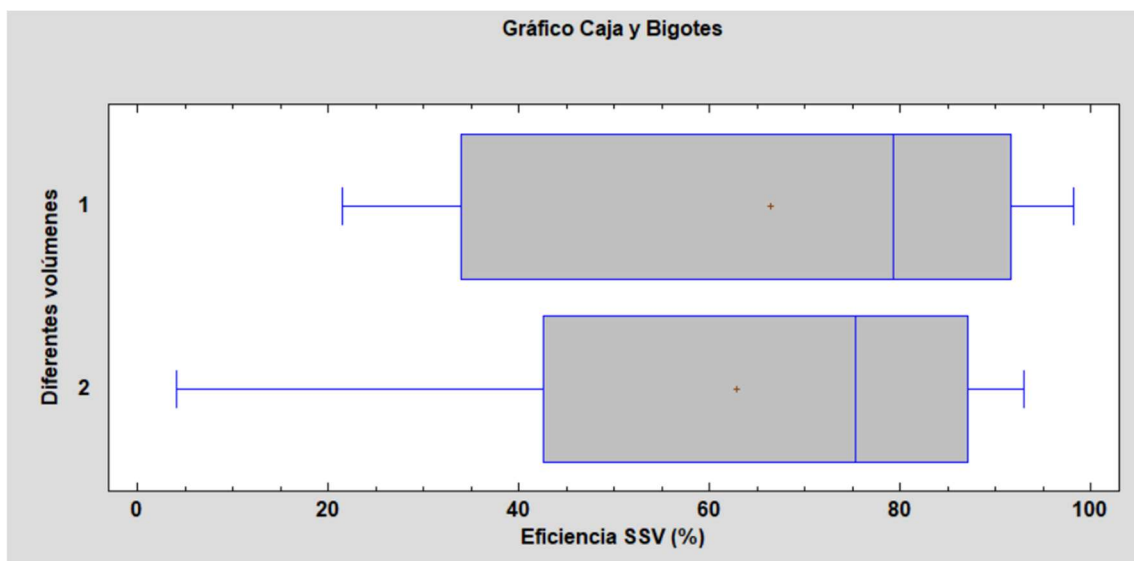


Figura 64. Diagrama de cajas y bigotes de las eficiencias de SSV. Fuente: Statgraphics.

Por último, en la prueba de Kruskal-Wallis se concluye que puesto que el valor-P es mayor o igual que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza.

Tabla 17. Prueba de Kruskal-Wallis para las eficiencias de SSV. Fuente: Statgraphics.

Diferentes volúmenes	Tamaño Muestra	Rango Promedio
1	10	8.8
2	6	8.0

Estadístico = 0.105882 Valor-P = 0.744882

intervalos de confianza del 95.0%

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
1 - 2		0.8	4.81867

De la misma manera que en los parámetros anteriores, interesa trabajar con la carga de 23 kgST/m²·año.

8.8 Evolución de la turbidez

En cuanto a la turbidez en la Figura 65 se observa su evolución con el paso del tiempo. Se ven los mismos picos de alta turbidez que se han visto para las concentraciones de sólidos, esto es lógico, debido a que la turbidez está directamente relacionada con la cantidad de sólidos que contiene el líquido.

En prácticamente todo el periodo la turbidez de entrada es mayor que la turbidez de salida, lo que indica que la era de secado es capaz de eliminar turbidez principalmente debido al fenómeno de filtración (del lecho y de la torta creada en la superficie).

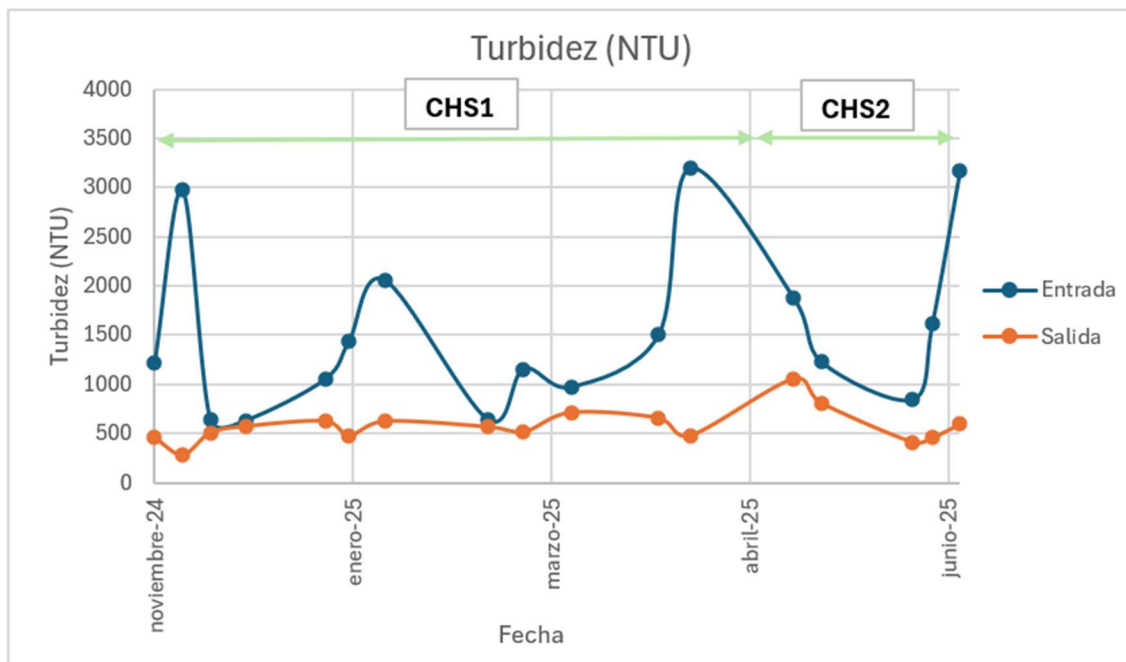


Figura 65. Evolución de la turbidez. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 66 se representa la evolución de la eficiencia en la eliminación de la turbidez a lo largo del periodo de estudio. En ella se puede ver que la eficiencia nunca llega a ser 0, es decir, siempre elimina cierto porcentaje de turbidez, aunque sea bajo. La explicación de los periodos donde es baja la eficiencia puede deberse a que a bajos valores de turbidez

a la entrada la era de secado es menos eficiente, al igual que ha pasado en los otros parámetros analizados. Estas fluctuaciones en la entrada pueden deberse a la propia variabilidad del purín, así como también a que este pueda estar diluido debido a periodos de lluvia.

Cabe destacar que conseguir mayores eficiencias en la eliminación de turbidez es complicado debido a la alta cantidad de sales y materia orgánica disuelta que contiene el purín bruto.

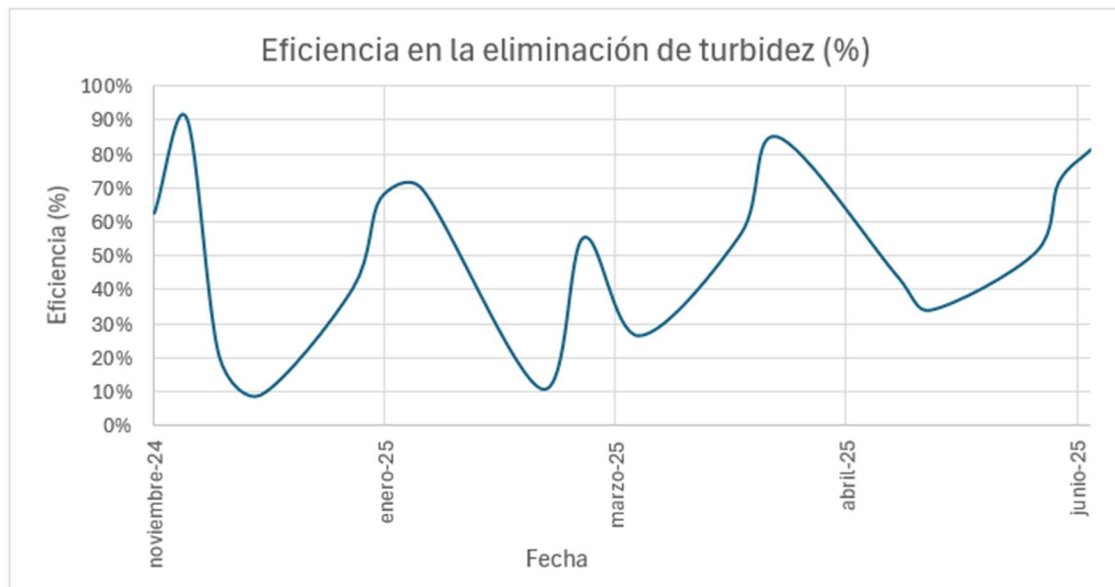


Figura 66. Evolución de la eficiencia en la eliminación de turbidez. Fuente: Elaboración propia.

Por último, en el diagrama de cajas y bigotes se observan los parámetros estadísticos más importantes. La variabilidad del purín bruto se observa en la anchura de la caja azul (purín de entrada) mientras que la caja del drenaje de salida es mucho más estrecha en comparación, indicando la robustez del sistema.

La entrada tiene una media de turbidez de 1.541,16 NTU mientras que el drenaje tiene una media de 577 NTU. La eficiencia de eliminación de turbidez promedio es de 62,56%.

De nuevo, comparando con el estudio realizado por El Bied (2021) cuya turbidez de entrada son 2000 NTU, obtiene una eficiencia de eliminación del 80% de turbidez. En el presente TFM con una media de 1.541,16 NTU de entrada se obtiene una eficiencia del 62,56% de turbidez. Se obtiene menos eficiencia de eliminación pero se considera un buen resultado debido a la menor variedad de capas filtrantes respecto al estudio mencionado.

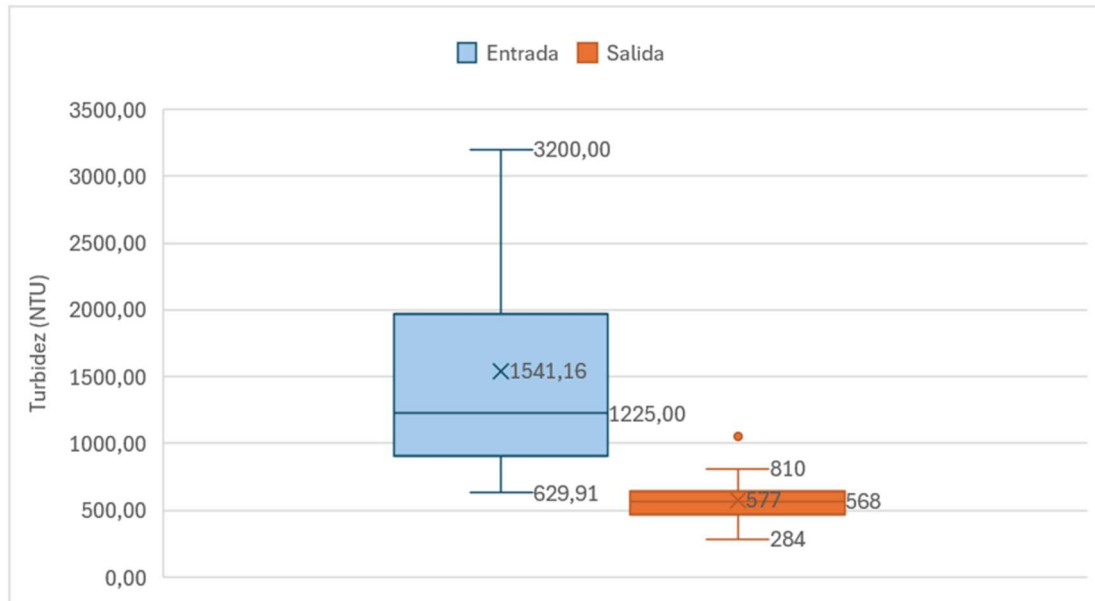


Figura 67. Diagrama de cajas y bigotes de la turbidez. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al análisis estadístico ANOVA, los datos introducidos son los que se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18. Datos de las eficiencias de turbidez (%) introducidos en Statgraphics. Fuente: Statgraphics.

	Eficiencia turbidez (%)	Diferentes volúmenes
	Numérico	Numérico
1	62.54	1
2	90.47	1
3	20.53	1
4	8.88	1
5	40.35	1
6	66.86	1
7	69.65	1
8	10.68	1
9	55.32	1
10	26.37	1
11	56.20	1
12	85.00	2
13	43.94	2
14	33.88	2
15	50.95	2
16	71.68	2
17	81.29	2

Y la tabla ANOVA obtenida es la que se muestra en la Tabla 19.

Tabla 19. Tabla ANOVA de las eficiencias de turbidez. Fuente: Statgraphics.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	868.314	1	868.314	1.39	0.2564
Intra grupos	9356.78	15	623.785		
Total (Corr.)	10225.1	16			

Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Eficiencia turbidez (%) entre un nivel de Diferentes volúmenes y otro. En la Figura 68 se representa el diagrama de cajas y bigotes de las eficiencias para los diferentes volúmenes.

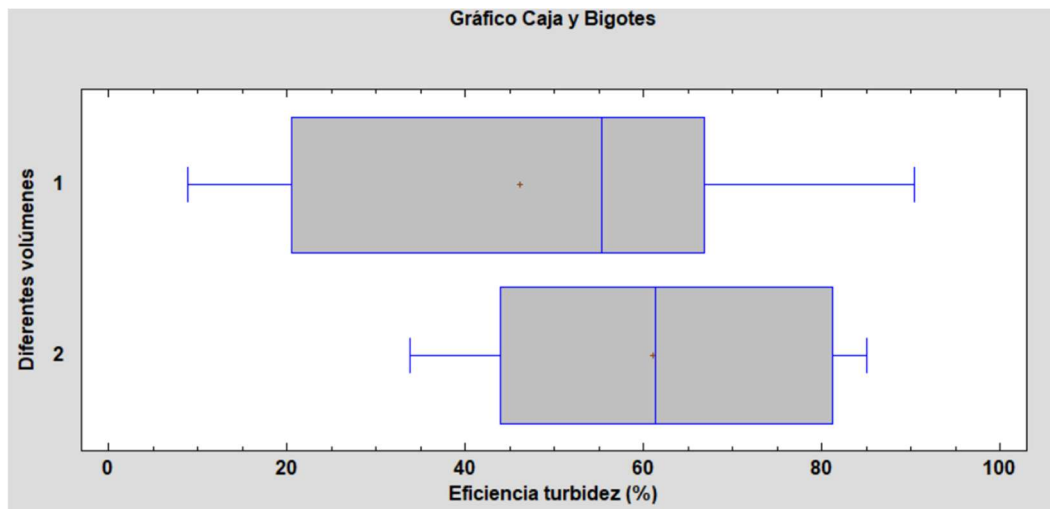


Figura 68. Diagrama de cajas y bigotes de las eficiencias de turbidez. Fuente: Statgraphics.

Por otro lado, también se realiza la prueba de Kruskal-Wallis cuyos resultados se muestran en la Tabla 20.

Tabla 20. Prueba de Kruskal-Wallis para las eficiencias de turbidez. Fuente: Statgraphics.

Diferentes volúmenes	Tamaño Muestra	Rango Promedio
1	11	8.0
2	6	10.8333

Estadístico = 1.22222 Valor-P = 0.268923

intervalos de confianza del 95.0%

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
1 - 2		-2.83333	5.0231

Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza.

Debido a los resultados obtenidos para los análisis realizados, se concluye que interesa trabajar con la tasa de carga de sólidos de 23 kgST/m²·año para reducir la superficie necesaria de tratamiento. Además, debido a que en los análisis estadísticos de todos los parámetros estudiados se ha obtenido que no existen diferencias significativas entre trabajar a menor o a mayor carga, esto daría la posibilidad de seguir con el estudio para probar con cargas de sólidos mayores.

9. Posibles tratamientos para la fracción líquida

Para evaluar los posibles tratamientos posteriores para la fracción líquida se deben conocer sus características fisicoquímicas. Como se ha observado en las gráficas mostradas en apartados anteriores la fracción líquida de salida del purín de la era de secado no tiene mucha variabilidad en cuanto a los resultados obtenidos. Por este motivo, se decide obtener la media de estos resultados, observada en la Tabla 21 y proponer soluciones a partir de estos valores.

Tabla 21. Medias de los resultados obtenidos del drenaje. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Valor
pH	8,03
CE (mS/cm)	12,54
Turbidez (NTU)	577,02
ST (mg/L)	8005
SS (mg/L)	1186,92
SD (mg/L)	6818,08
SSV (mg/L)	857,5

Este apartado se centrará en la propuesta de soluciones basadas en la naturaleza (SbN). Las SbN son procesos que utilizan los principios de la naturaleza para dar solución a distintos problemas relacionados con la gestión territorial y urbana como la adaptación al cambio climático, la gestión de los recursos, del agua, la seguridad alimentaria o la calidad del aire y el entorno (CONAMA, 2019).

El tratamiento que se va a desarrollar es el uso de humedales artificiales. Se analizarán varios estudios relevantes para establecer una comparativa con el presente caso de estudio y determinar la viabilidad de esta aplicación.

En el estudio realizado por Gallardo et al. (2024) trata el agua residual de una empresa de lácteos mediante un humedal artificial de flujo subsuperficial. En este estudio se trata un efluente con una concentración de 7136 mg/l de sólidos totales y 5420 mg/l de sólidos en suspensión, obteniendo muy buenas eficiencias de eliminación, casi del 99%. Con esto, se quiere recalcar que el tratamiento con humedales artificiales es posible, aunque la concentración de sólidos sea elevada. Esta podría ser la siguiente línea de investigación para conseguir tratar completamente el purín de la granja porcina, tratar el efluente de la era de secado con humedales artificiales.

Los humedales aireados, son una variante de los humedales de flujo subsuperficial, donde se inyectan burbujas de aire desde la base del humedal para aumentar la tasa de transferencia de oxígeno. Este tratamiento crea condiciones aeróbicas, lo que permite una mayor transformación de $\text{NH}_4^+\text{-N}$ en NO_3^- , reduciendo así significativamente los niveles de amoníaco tóxico en el agua. Por lo tanto, este enfoque resulta altamente recomendable para disminuir la toxicidad del agua hacia las plantas. Posteriormente, para eliminar completamente el nitrógeno, sería necesaria la desnitrificación.

10. Aplicación de la era de secado piloto a escala real

En este apartado se obtendrá la superficie necesaria de la era de secado para tratar el purín generado en la granja a partir del volumen de purín generado al año y de la tasa de carga aplicada.

Según los datos proporcionados por el propio gerente de la granja, en ella se generan alrededor de 5000 m³/año de purín. Teniendo en cuenta que en el presente TFM se han utilizado dos cargas hidráulicas y que no han presentado diferencias significativas entre ellas, se va a utilizar la mayor, es decir, la tasa de carga de 23 kg ST/m²·año.

Sabiendo que la concentración media de sólidos en el purín obtenida de esta experiencia es de 13.392,06 mg/L y que el volumen generado de purín son 5000 m³/año, se obtienen

los kg de sólidos totales generados al año de la siguiente manera:

$$13.392,06 \frac{mg}{L} \cdot 1 \frac{kg}{1000000 mg} \cdot 1000 \frac{L}{1 m^3} \cdot 5000 \frac{m^3}{año} = 66.960,3 \frac{kgST}{año}$$

Con el valor que se ha obtenido y la tasa de carga aplicada, ya se puede obtener la superficie de la siguiente manera:

$$\frac{66.960,3 \frac{kgST}{año}}{23 \frac{kgST}{m^2 \cdot año}} = 2.911,32 m^2$$

Como se ha comentado en apartados anteriores, los resultados obtenidos en cuanto a la tasa de carga aplicada sugieren la posibilidad de probar en futuras investigaciones con tasas de carga mayores, con lo que se conseguiría reducir el área de la era de secado.

11. Resumen y conclusiones

Este trabajo fin de máster ha abordado la problemática ambiental asociada a la producción intensiva de la carne de cerdo y ha propuesto y analizado una solución para la gestión del principal subproducto, el purín. Este estudio tiene una elevada relevancia debido a que la carne de cerdo representa el 34% de la producción cárnica mundial, siendo España el mayor productor dentro de la Unión Europea.

El purín porcino es una mezcla de heces, orines y otros residuos (pienso, agua de lavado, etc) que tiene numerosos impactos negativos sobre el medioambiente, tales como: contaminación de aguas subterráneas por nitratos, contaminación de aguas superficiales por materia orgánica y amoníaco y la emisión de gases de efecto invernadero. Estos impactos hacen que sea de gran relevancia implementar técnicas de gestión de purines que sean efectivas.

El TFM se centró en evaluar la eficiencia de una era de secado piloto para la separación sólido-líquido del purín bruto, además de la posterior búsqueda de tratamientos para la fracción líquida basados en la naturaleza. Se ha demostrado que la era de secado es una alternativa con eficiencias similares o incluso mayores a otras técnicas de separación como la centrífuga o el filtro prensa que a diferencia de la era de secado, conllevan costes energéticos y de operación más elevados.

La implementación de la era de secado piloto reafirma su simplicidad de operación y el ahorro tanto de energía como de productos químicos en comparación a otros tratamientos. A pesar de los problemas surgidos en cuanto a la automatización del proceso, la dosificación manual permitió evaluar su rendimiento. Para esto, la caracterización tanto del purín bruto como de la fracción líquida obtenida fueron cruciales para obtener la eficiencia de la era de secado en cuanto a eliminación de sólidos y turbidez y la mineralización de la materia orgánica en la fracción sólida acumulada. La media de los resultados de esta caracterización fueron los siguientes:

Tabla 22. Eficiencias de eliminación. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Entrada	Salida	Eliminación (%)
pH	7,83	8,03	
Conductividad (mS/cm)	13,82	12,54	9,28
Turbidez (NTU)	1.541,16	577	51,45
Sólidos totales (mg/L)	13.392,06	8.005	35,13
Sólidos suspendidos (mg/L)	7.511,12	1.186,92	65,88
Sólidos suspendidos volátiles (mg/L)	5.795,15	857,5	65,16

Los resultados obtenidos para la fracción líquida indican que ésta tiene todavía concentraciones muy elevadas como para ser vertida a medio natural. Por ello, se deben explorar alternativas de tratamiento basadas en la naturaleza, entre las cuales se encuentran las soluciones basadas en la naturaleza. Un ejemplo de ello son los humedales artificiales, que pueden reducir mucho los costes de gestión y ser manejados por los operarios de la propia granja, debido a su sencilla operación. Este aspecto es especialmente importante en granjas de tamaño pequeño, que no disponen de personal específico para el tratamiento de los residuos.

En el estudio se probaron dos cargas hidráulicas diferentes. Por lo que se observa en los gráficos, en el análisis estadístico ANOVA y en la prueba de Kruskal-Wallis realizados posteriormente para reforzar lo observado, no hay diferencias significativas entre las dos cargas, lo que implica que en estudios posteriores se puede seguir aumentando la carga con el objetivo de reducir la superficie de la era de secado piloto.

Este estudio, valida la era de secado como una tecnología de separación sólido-líquido de purines que, por su bajo coste, sencillez de operación y bajo coste energético representa una opción viable para las explotaciones porcinas.

12. Bibliografía

Alarcón-Herrera, M. T., Llorens, E., Poch, M. (2012). Los humedales como tecnología emergente para la remoción del arsénico del agua. *Remoción de Arsénico del Agua para Consumo Humano en Latinoamérica* (pp. 133-160). Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/304629137_7_LOS_HUMEDALES_COMO_TECNOLOGIA_EMERGENTE_PARA_LA_REMOCION_DEL_ARSENICO_DEL_AGUA

Álvarez, J. A., León-Cófreces, C., García-González, M. C., & Bécares, E. (2008). Caracterización de purines de cerdo y eficacias de tratamiento en España Central (Comunidad de Castilla y León). *ResearchGate*.

Badji K., Dodane P.H., Mbégué, M., Kone D., (2011), Traitement des boues de vidange: éléments affectant la performance des lits de séchage non plantés en taille réelle et les mécanismes de séchage. Actes du symposium international sur la Gestion des Boues de Vidange, Dakar, 30 juin – 1er juillet 2009, EAWAG/SANDEC.

Cofie, O., Agbottah, S., Strauss, M., Esseku, H., Montangero, A., Awuah, E., Kone, D. (2006). Solid-liquid separation of faecal sludge using drying beds in Ghana: Implications for nutrient recycling in urban agriculture. *Water Research* 40(1), p. 75-82.

El bied, O. (2019). Diseño y optimización de los humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales: purines de cerdos. Universidad Politécnica de Cartagena.
<http://hdl.handle.net/10317/11111>

Eras de secado. (s.f.). Recuperado de
https://cidta.usal.es/cursos/simulacion/modulos/cursos/uni_08/Enlace%20C8%282%29-Eras%20de%20secado..htm

Espinoza López, KF. (2024). Implementación y explotación de un humedal artificial piloto para la deshidratación de lodos de estaciones de tratamiento de agua potable. Universitat Politècnica de València. <https://riunet.upv.es/handle/10251/211202>

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2023). *Statistical Yearbook*. FAO. Recuperado de
https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/28cfd24e-81a9-4ebc-b2b5-4095fe5b1dab/content/cc8166en.html#chapter-2_2

Fundación CONAMA. (s. f.). *Soluciones basadas en la naturaleza*. Recuperado el 18 de agosto de 2025, de
<https://www.fundacionconama.org/que-hacemos/proyectos/soluciones-basadas-en-la-naturaleza/>

Gallardo-Donoso, L. J., Donoso-León, C. E., Inca-Lazo, J. A., & Pilco-Guamán, E. G. (2024). Depuración de aguas residuales de una industria láctea por medio de humedales artificiales de totora. *Polo del Conocimiento*, 9(5), 1083-1094.

Hernández Crespo, C., Martín Monerris, M. (2023). Guía didáctica sobre diseño de humedales artificiales. Editorial UPV.

Henze, M., van Loosdrecht, M.C.M, Ekama, G.A., Brdjanovic, D. (2008). *Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design*.
<https://doi.org/10.2166/9781780401867>

Hidrometalica. (s. f.). Filtro de prensa. Recuperado el 5 de septiembre de 2025, de Hidrometalica: <https://www.hidrometalica.com/filtro-de-prensa/>

Martínez, S., Ferrer, P., Cebrián, B., Bernace, J., Lainez, M., Moltó, E., & Suay, R. (2008). Estudio preliminar sobre la separación física sólido-líquido de purines para su reutilización. Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA).

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (2015). Evaluación de técnicas de gestión de deyecciones en ganadería. Centro de Publicaciones del MAGRAMA.

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA). (2023). *Indicadores del sector porcino*. Recuperado de
https://www.mapa.gob.es/es/ganaderia/estadisticas/indicadoressectorporcino2023_tcm38-564427.pdf

Neubauer, W. R. (1968). Waste alum sludge treatment. *J. Am. Water Works Assoc.*, 60(7), 819–826.

Nielsen S. (2003). Sludge drying reed beds. *Water Science and Technology*, 48(5), 101-109.

Nielsen, S. (2007). Sludge Treatment in Reed Beds Systems: Development and experience through 22 years in Denmark. Orbicon A/S

Nueva Cultura del Agua. Recuperado de
https://fnca.eu/biblioteca-del-agua/documentos/documentos/20190601_Fernando_Suarez.pdf

Rabat Blázquez, J. (2016). Análisis de los modelos de diseño de los sistemas naturales de depuración. Trabajo de fin de máster, Universitat d'Alacant.
<http://hdl.handle.net/10045/57213>

Redacción. (8 de marzo de 2019). La Junta amplía las excepciones para el enterrado de los purines. *El Adelantado de Segovia*. <https://eladelantado.com/segovia-provincia/la-junta-amplia-las-excepciones-para-el-enterrado-de-los-purines/>

Redacción. (27 de abril de 2021). Separación de la parte sólida y líquida del purín: Valoración de los distintos sistemas. *Campo Galego*.
<https://www.campogalego.es/separacion-de-la-parte-solida-y-liquida-del-purin-valoracion-de-los-distintos-sistemas/>

Ritornamedioambiente. (2016, 9 de enero). ¿Qué es el compostaje? Recuperado de
<https://www.ritornamedioambiente.com/single-post/2016-1-9--qu%C3%A9-es-el-compostaje>

Salas Rodríguez, J. J. (22 de octubre de 2018). Humedales Artificiales Aireados: como intensificar lo extensivo. iAgua. Recuperado de <https://www.iagua.es/blogs/juan-jose-salas/humedales-artificiales-aireados-como-intensificar-lo-extensivo>

Santos Chiang, AG. (2023). Evaluación a escala de laboratorio y planta piloto del potencial de los humedales artificiales para valorizar el escurrido de la digestión anaerobia. Universitat Politècnica de València.
<https://riunet.upv.es/handle/10251/197531>

Strande, L., Ronteltap, M., & Brdjanovic, D. (2014). Manejo de lodos fecales. Londres: IWA Publishing.

Suárez, F. (2019). Purines de porcino intensivo, problemática y alternativas. Fundación nueva cultura del agua.

Viñas, M., Álvarez, R., & García, R. (2021). Tecnología para el tratamiento y aprovechamiento de residuales porcinos. Empresa Nacional de Proyectos Agropecuarios. Recuperado de
<http://www.ingenieroambiental.com/new3informes/trataaguaporcinos.pdf>

YouTube. (2022). Decantador de Cono Profundo [Video]. YouTube.
<https://www.youtube.com/watch?v=PM6UEK1vw60>

13. Anexos

