



**Universidad
Zaragoza**

Trabajo Fin de Máster

Evaluación técnico-económica y ambiental de
diferentes escenarios de gestión y tratamiento de
fangos en la EDAR de Tudela (Navarra).
Recuperación de fósforo y energía

Technical-economic and environmental evaluation
of different stages of sludge management and
treatment at Tudela WWTP. Phosphorus and
energy recovery

Autor:

Álvaro Moreno Mendaña

Directora:

Andrea López Martín

Ponente:

M^a Peña Ormad Melero

Titulación del autor:

Máster Universitario en Ingeniería Química

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

2021

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no habría sido posible sin la ayuda recibida por parte de muchas personas, por lo que me gustaría dedicarles unas palabras a todos ellos.

En primer lugar, me gustaría agradecer a Andrea y Peña, directoras del estudio, su trabajo incondicional a la hora de guiarme a lo largo de este camino y estar siempre dispuestas a resolver todos los problemas surgidos. Gracias.

También quisiera agradecer a Jairo la oportunidad que me dio cuando me abrió las puertas de la EDAR y me propuso la realización de este trabajo. Ha sido un placer desarrollarlo.

A todos mis compañeros de laboratorio, con los que he disfrutado trabajando y de los que he aprendido muchísimas cosas. Volveremos a encontrarnos.

Me gustaría agradecer la atención prestada en todo momento al equipo de operarios de la EDAR, en especial a Félix. Sin vuestra ayuda no hubiera sido posible llevar a cabo este trabajo.

A Marta, por apoyarme en todo momento y ayudarme en los momentos más difíciles. Tú me has enseñado a ser mejor. Gracias por recorrer este camino a mi lado.

A mis abuelos. Allá donde estéis, siempre os recordaré.

Por último y seguramente más importante, quisiera mencionar a mis padres y hermano, ya que lo que soy ahora es gracias a ellos. Muchísimas gracias por todo.

A todos vosotros, gracias por haberme llevado en volandas hasta donde estoy ahora.

ÍNDICE

Índice de Tablas

Índice de Figuras

Relación de acrónimos

1.	Introducción	1
2.	Fundamentos teóricos	2
2.1.	Generación y composición de fangos	2
2.2.	Marco legislativo aplicable.....	4
2.3.	Procesos de tratamiento de fangos	5
2.3.1.	Espesamiento	5
2.3.2.	Estabilización	6
2.3.3.	Deshidratación.....	7
2.4.	El fósforo y su recuperación.....	8
2.5.	Producción de fangos en la Comunidad Foral de Navarra	9
3.	Metodología	10
3.1.	Descripción de las EDAR incluidas en el estudio.....	10
3.2.	Descripción de la planta piloto de digestión anaerobia.....	11
3.3.	Metodología analítica y datos históricos	11
3.4.	Gestión de fangos en la EDAR de Tudela: Descripción de escenarios	12
3.5.	Balances de fango y fósforo	14
3.5.1.	Balances de fango y fósforo del Escenario 1	14
3.5.2.	Balances de fango y fósforo del Escenario 2	17
3.6.	Análisis estadístico de datos	21
3.7.	Indicadores económicos y ambientales	22
4.	Procedimiento experimental, resultados e interpretación	23
4.1.	Ensayos a escala laboratorio y piloto.....	23
4.1.1.	Ensayos de calentamiento de fango	23
4.1.2.	Ensayos de digestión anaerobia termófila	29
4.2.	Escenario 1 – Resultados de los balances	30
4.2.1.	Balance de materia de la línea de fangos del Escenario 1	30
4.2.2.	Caracterización del fósforo en la línea de fangos del Escenario 1.....	32
4.2.3.	Balance del fósforo en la línea de fangos del Escenario 1	33
4.3.	Escenario 2 – Resultados de los balances	35
4.3.1.	Balance de materia de la línea de fangos del Escenario 2	35
4.3.2.	Caracterización del fósforo en la línea de fangos del Escenario 2.....	37
4.3.3.	Balance del fósforo en la línea de fangos del Escenario 2	39
4.4.	Análisis económico y ambiental de alternativas.....	40

5.	Conclusiones.....	41
6.	Referencias	43
7.	Anexos	45
7.1.	Anexo I – Localización de las EDAR de estudio	45
7.2.	Anexo II – Análisis estadístico de los datos	46
7.2.1.	Análisis estadístico descriptivo de los ensayos de calentamiento	46
7.2.2.	Análisis de varianza de los ensayos de calentamiento	48
7.2.3.	Análisis de varianza de los ensayos de digestión anaerobia termófila	60
7.2.4.	Análisis estadístico descriptivo de los datos del Escenario 1	64
7.2.5.	Análisis estadístico descriptivo de los datos del Escenario 2	65
7.3.	Anexo III – Distribución temporal de la carga sólida a tratar	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características principales de los fangos primario y secundario [4].	4
Tabla 2. Valores límite de concentración de metales pesados en suelos y en fangos destinados a su utilización agraria [10].	5
Tabla 3. Características principales del fango fresco procedente de procesos de fangos activos y tras la digestión anaerobia [14].	7
Tabla 4. Características principales del fango procedente de filtros percoladores y tras de la digestión anaerobia [14].	7
Tabla 5. Procedencia de las fuentes humanas de fósforo sobre las aguas residuales urbanas [19].	8
Tabla 6. Características principales de las EDARs incluidas en el estudio [21].	10
Tabla 7. Parámetros medidos, métodos empleados y equipos utilizados en el análisis de la composición físico-química de los fangos estudiados.	12
Tabla 8. Parámetros iniciales de cada EDAR en el balance de fango del Escenario 1.	31
Tabla 9. Características principales de las corrientes que conforman la línea de fangos del Escenario 1.	31
Tabla 10. Concentración de fósforo total y reactivo de las corrientes incluidas en la línea de fangos del Escenario 1.	34
Tabla 11. Parámetros iniciales de cada EDAR en el balance de fango del Escenario 2.	35
Tabla 12. Características principales de las corrientes que conforman la línea de fangos del Escenario 2.	36
Tabla 13. Concentración de fósforo total y reactivo de las corrientes incluidas en la línea de fangos del Escenario 2.	40
Tabla 14. Resultados obtenidos de la aplicación de los indicadores en función del escenario.	41
Tabla 15. Resultados globales del análisis económico y ambiental.	41
Tabla 16. Análisis estadístico descriptivo de la DQO decantada antes de calentar la muestra.	46
Tabla 17. Análisis estadístico descriptivo del nitrógeno amoniacal antes de calentar la muestra.	46
Tabla 18. Análisis estadístico descriptivo del calcio antes de calentar la muestra.	46
Tabla 19. Análisis estadístico descriptivo del fósforo total antes de calentar la muestra.	46
Tabla 20. Análisis estadístico descriptivo del fósforo reactivo antes de calentar la muestra.	47
Tabla 21. Análisis estadístico descriptivo de la DQO decantada después de calentar la muestra.	47
Tabla 22. Análisis estadístico descriptivo del nitrógeno amoniacal después de calentar la muestra.	47
Tabla 23. Análisis estadístico descriptivo del calcio después de calentar la muestra.	47
Tabla 24. Análisis estadístico descriptivo del fósforo total después de calentar la muestra.	47
Tabla 25. Análisis estadístico descriptivo del fósforo reactivo después de calentar la muestra.	48
Tabla 26. Análisis estadístico descriptivo del fósforo total contenido en los fangos de las EDARs incluidas en el Escenario 1.	64
Tabla 27. Análisis estadístico descriptivo del fósforo reactivo contenido en los fangos de las EDAR incluidas en el Escenario 1.	64
Tabla 28. Análisis estadístico descriptivo del porcentaje de ortofosfatos contenidos en el fósforo total de los fangos de las EDARs incluidas en el Escenario 1.	64
Tabla 29. Análisis estadístico descriptivo del fósforo total contenido en los fangos de las EDARs incluidas en el Escenario 2.	65
Tabla 30. Análisis estadístico descriptivo del fósforo reactivo contenido en los fangos de las EDARs incluidas en el Escenario 1.	65
Tabla 31. Análisis estadístico descriptivo del porcentaje de ortofosfatos contenidos en el fósforo total de los fangos de las EDARs incluidas en el Escenario 2.	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Serie temporal de la producción de fangos en las EDARs de España [11].	3
Figura 2. Representación del ciclo biogeoquímico del fósforo [18].	8
Figura 3. Serie temporal de la producción de fangos en las EDARs de la Comunidad Foral de Navarra [11].	9
Figura 4. Diagrama de flujo del Escenario 1 – Configuración actual de la línea de fangos.	13
Figura 5. Diagrama de flujo del Escenario 2 – Tratamiento centralizado de fangos frescos y deshidratados mediante digestión anaerobia termófila.	14
Figura 6. DQO decantada en función del tipo de fango analizado y el tiempo de calentamiento.	24
Figura 7. Concentración de nitrógeno amoniacal en función del tipo de fango analizado y el tiempo de calentamiento.	24
Figura 8. Concentración de calcio en función del tipo de fango analizado y el tiempo de calentamiento.	25
Figura 9. Concentración de fósforo total en función del tipo de fango analizado y el tiempo de calentamiento.	25
Figura 10. Concentración de fósforo reactivo en función del tipo de fango analizado y el tiempo de calentamiento.	26
Figura 11. Evolución temporal de la concentración de materia orgánica (DQO filtrada) durante el calentamiento del fango fresco obtenido directamente de un filtro percolador.	26
Figura 12. Evolución temporal de la concentración de nitrógeno amoniacal durante el calentamiento del fango fresco obtenido directamente de un filtro percolador.	27
Figura 13. Evolución temporal de la concentración de calcio durante el calentamiento del fango fresco obtenido directamente de un filtro percolador.	27
Figura 14. Evolución temporal de la concentración de fósforo reactivo durante el calentamiento del fango fresco obtenido directamente de un filtro percolador.	27
Figura 15. Evolución temporal de la concentración de magnesio durante el calentamiento del fango fresco obtenido directamente de un filtro percolador.	28
Figura 16. Evolución temporal del pH durante el calentamiento del fango fresco obtenido directamente de un filtro percolador.	28
Figura 17. DQO decantada, nitrógeno amoniacal y calcio en el fango antes y después de su paso por el digestor anaerobio termófilo (DAT).	29
Figura 18. Concentración de fósforo total y reactivo en el fango antes y después de su paso por el digestor anaerobio termófilo (DAT).	30
Figura 19. Diagrama de flujo del balance de fangos del Escenario 1 – Configuración actual de la línea de fangos.	31
Figura 20. Representación gráfica del contenido en fósforo total y sólidos totales de los fangos incluidos en el Escenario 1.	32
Figura 21. Representación gráfica del contenido en fósforo reactivo y sólidos totales de los fangos incluidos en el Escenario 1.	32
Figura 22. Concentración de fósforo total y reactivo del sobrenadante obtenido de los fangos procedentes de las EDARs incluidas en el Escenario 1 – Configuración actual de la línea de fangos.	33
Figura 23. Proporción de fósforo reactivo sobre el fósforo total del sobrenadante obtenido de los fangos procedentes de las EDARs incluidas en el Escenario 1 – Configuración actual de la línea de fangos.	33
Figura 24. Diagrama de flujo del balance de fósforo del Escenario 1 – Configuración actual de la línea de fangos.	34
Figura 25. Diagrama de flujo del balance de fangos del Escenario 2 – Tratamiento centralizado de fangos frescos y deshidratados mediante digestión anaerobia termófila.	36
Figura 26. Representación gráfica del contenido en fósforo total y sólidos totales de los fangos incluidos en el Escenario 2.	37
Figura 27. Representación gráfica del contenido en fósforo reactivo y sólidos totales de los fangos incluidos en el Escenario 2.	37

Figura 28. Concentración de fósforo total y reactivo del sobrenadante obtenido de los fangos procedentes de las EDARs 7-12 incluidas en el Escenario 2.....	38
Figura 29. Concentración de fósforo total y reactivo del sobrenadante obtenido de los fangos procedentes de las EDAR 13-17 incluidas en el Escenario 2.	38
Figura 30. Proporción de fósforo reactivo sobre el fósforo total del sobrenadante obtenido de los fangos procedentes de las EDARs 7-12incluidas en el Escenario 2.....	38
Figura 31. Proporción de fósforo reactivo sobre el fósforo total del sobrenadante obtenido de los fangos procedentes de las EDARs 13-17 incluidas en el Escenario 2.	39
Figura 32. Diagrama de flujo del balance de fósforo del Escenario 2 – Tratamiento centralizado de fangos frescos y deshidratados mediante digestión anaerobia termófila.	40
Figura 33. Localización de las EDARs incluidas en el Escenario 1.	45
Figura 34. Localización de las EDARs incluidas en el Escenario 2.	45
Figura 35. Análisis de varianza de la DQO del fango fresco producido en un filtro percolador antes y después de ser sometido al calentamiento.	48
Figura 36. Prueba de igualdad de varianzas de la DQO del fango fresco procedente del decantador antes y después de ser sometido al calentamiento.	48
Figura 37. Análisis de varianza de la DQO del fango fresco producido en el decantador antes y después de ser sometido al calentamiento.	49
Figura 38. Prueba de igualdad de varianzas de la DQO del fango fresco procedente de alimentación a la planta piloto antes y después de ser sometido al calentamiento.	49
Figura 39. Análisis de varianza de la DQO del fango fresco de alimentación antes y después de ser sometido al calentamiento.	49
Figura 40. Prueba de igualdad de varianzas de la DQO del fango digerido en el DAT antes y después de ser sometido al calentamiento.	50
Figura 41. Análisis de varianza de la DQO del fango digerido en el DAT antes y después de ser sometido al calentamiento.	50
Figura 42. Prueba de igualdad de varianzas del nitrógeno amoniacal del fango fresco procedente del filtro percolador antes y después de ser sometido al calentamiento.	50
Figura 43. Prueba de Welch para el nitrógeno amoniacal del fango producido en el filtro percolador antes y después de ser sometido al calentamiento.	51
Figura 44. Prueba de igualdad de varianzas del nitrógeno amoniacal del fango fresco procedente del decantador antes y después de ser sometido al calentamiento.	51
Figura 45. Análisis de varianza del nitrógeno amoniacal del fango fresco producido en el decantador antes y después de ser sometido al calentamiento.	51
Figura 46. Prueba de igualdad de varianzas del nitrógeno amoniacal del fango fresco de alimentación antes y después de ser sometido al calentamiento.	52
Figura 47. Análisis de varianza del nitrógeno amoniacal del fango fresco de alimentación antes y después de ser sometido al calentamiento.	52
Figura 48. Prueba de igualdad de varianzas del nitrógeno amoniacal del fango digerido en el DAT antes y después de ser sometido al calentamiento.	52
Figura 49. Análisis de varianza del nitrógeno amoniacal del fango digerido en el DAT antes y después de ser sometido al calentamiento.	53
Figura 50. Prueba de igualdad de varianzas del calcio del fango fresco procedente del filtro percolador antes y después de ser sometido al calentamiento.	53
Figura 51. Análisis de varianza del calcio del fango fresco producido en el filtro percolador antes y después de ser sometido al calentamiento.	53
Figura 52. Prueba de igualdad de varianzas del calcio del fango fresco procedente del decantador antes y después de ser sometido al calentamiento.	54
Figura 53. Análisis de varianza del calcio del fango fresco producido en el decantador antes y después de ser sometido al calentamiento.	54
Figura 54. Prueba de igualdad de varianzas del calcio del fango fresco de alimentación antes y después de ser sometido al calentamiento.	54
Figura 55. Análisis de varianza del calcio del fango fresco de alimentación antes y después de ser sometido al calentamiento.	55

Figura 56. Prueba de igualdad de varianzas del calcio del fango digerido en el DAT antes y después de ser sometido al calentamiento.....	55
Figura 57. Análisis de varianza del calcio del fango digerido en el DAT antes y después de ser sometido al calentamiento.	55
Figura 58. Prueba de igualdad de varianzas del fósforo total del fango fresco procedente del decantador antes y después de ser sometido al calentamiento.	56
Figura 59. Análisis de varianza del fósforo total del fango fresco producido en el decantador antes y después de ser sometido al calentamiento.....	56
Figura 60. Prueba de igualdad de varianzas del fósforo total del fango fresco de alimentación antes y después de ser sometido al calentamiento.....	56
Figura 61. Análisis de varianza del fósforo total del fango fresco de alimentación antes y después de ser sometido al calentamiento.....	57
Figura 62. Prueba de igualdad de varianzas del fósforo total del fango digerido en el DAT antes y después de ser sometido al calentamiento.....	57
Figura 63. Prueba de Welch del fósforo total del fango digerido en el DAT antes y después de ser sometido al calentamiento.....	57
Figura 64. Prueba de igualdad de varianzas del fósforo reactivo del fango fresco procedente del filtro percolador antes y después de ser sometido al calentamiento.....	58
Figura 65. Análisis de varianza del fósforo reactivo del fango fresco producido en el filtro percolador antes y después de ser sometido al calentamiento.	58
Figura 66. Prueba de igualdad de varianzas del fósforo reactivo del fango fresco procedente del decantador antes y después de ser sometido al calentamiento.....	58
Figura 67. Análisis de varianza del fósforo reactivo del fango fresco producido en el decantador antes y después de ser sometido al calentamiento.....	59
Figura 68. Prueba de igualdad de varianzas del fósforo reactivo del fango fresco de alimentación antes y después de ser sometido al calentamiento.....	59
Figura 69. Prueba de Welch del fósforo reactivo del fango fresco de alimentación antes y después de ser sometido al calentamiento.....	59
Figura 70. Prueba de igualdad de varianzas del fósforo reactivo del fango digerido en el DAT antes y después de ser sometido al calentamiento.....	60
Figura 71. Análisis de varianza del fósforo reactivo del fango digerido en el DAT antes y después de ser sometido al calentamiento.....	60
Figura 72. Prueba de igualdad de varianzas de la DQO del fango fresco antes y después de la digestión anaerobia termófila.....	60
Figura 73. Prueba de Welch de la DQO del fango fresco antes y después de la digestión anaerobia termófila.....	61
Figura 74. Prueba de igualdad de varianzas del nitrógeno amoniacal del fango fresco antes y después de la digestión anaerobia termófila.	61
Figura 75. Análisis de varianza del nitrógeno amoniacal del fango fresco antes y después de la digestión anaerobia termófila.....	61
Figura 76. Prueba de igualdad de varianzas del calcio del fango fresco antes y después de la digestión anaerobia termófila.....	62
Figura 77. Análisis de varianza del calcio del fango fresco antes y después de la digestión anaerobia termófila.....	62
Figura 78. Prueba de igualdad de varianzas del fósforo total del fango fresco antes y después de la digestión anaerobia termófila.	62
Figura 79. Prueba de Welch del fósforo total del fango fresco antes y después de la digestión anaerobia termófila.....	63
Figura 80. Prueba de igualdad de varianzas del fósforo reactivo del fango fresco antes y después de la digestión anaerobia termófila.	63
Figura 81. Prueba de Welch del fósforo reactivo del fango fresco antes y después de la digestión anaerobia termófila.....	63
Figura 82. Distribución mensual de la carga sólida contenida en los fangos a tratar en el Escenario 2. ...	66

RELACIÓN DE ACRÓNIMOS

Ca²⁺	Calcio	F_{CO2eq}	Flujo de CO ₂ equivalente
Coste_{Elec.}	Coste de la electricidad	F_{DQOElim}	Flujo de DQO eliminada
Coste_{Transporte}	Coste del transporte	F_{PR}	Flujo de fósforo reactivo
C_{PR}	Concentración de fósforo reactivo	F_{PRE1/E2}	Flujo de fósforo reactivo en el efluente de la EDAR en uno de los escenarios
C_{PRE1/E2}	Concentración de fósforo reactivo en el efluente de la EDAR en uno de los escenarios	F_{PRPrecipitado}	Flujo de fósforo reactivo precipitado
C_{PRSalida}	Concentración de fósforo reactivo en el efluente de la EDAR	F_{PRSalida}	Flujo de fósforo reactivo en el efluente de la EDAR
C_{PT}	Concentración de fósforo total	F_{PT}	Flujo de fósforo total
C_{ST}	Concentración de sólidos totales	F_{SF}	Flujo de sólidos fijos
C_{STDesh}	Concentración de sólidos totales del fango deshidratado	F_{ST}	Flujo de sólidos totales
C_{STEsp}	Concentración de sólidos totales del fango espesado	F_{SV}	Flujo de sólidos volátiles
DAT	Digestión anaerobia termófila	F_{SVElim}	Flujo de sólidos volátiles eliminados
DQO	Demanda química de oxígeno	FV	Fracción volátil
DQO_F	Demanda química de oxígeno filtrada	Mg²⁺	Magnesio
F	Flujo de fango	N_{he}	Número de habitantes equivalentes
F_(H2O)	Flujo de agua	N-NH₃	Nitrógeno amoniacal
F_{Biogás}	Flujo de biogás	P_R	Fósforo reactivo
F_{CH4}	Flujo de metano	Precio_{Elec.}	Precio de la electricidad

Precio_{Transporte}	Precio por viaje de camión cisterna	$\eta_{\text{Centrífuga}}$	Eficacia centrífuga
Producción Elec.	Producción de electricidad	η_{Digestor}	Eficacia digestor
P_T	Fósforo total	$\eta_{\text{Espesador}}$	Eficacia espesador
Q	Caudal	$\eta_{\text{Reducción}}$	Eficacia reducción
Q_{Biogás}	Caudal biogás	$\rho_{\text{Biogás}}$	Densidad biogás
Q_{CH4}	Caudal metano	ρ_{CH4}	Densidad metano
Q_{H2O}	Caudal agua	ρ_{FDesh}	Densidad fango deshidratado
Q_{Salida}	Caudal de salida de la EDAR	$\rho_{\text{FDigerido}}$	Densidad fango digerido
ST	Sólidos totales	ρ_{FEsp}	Densidad fango espesado
SV	Sólidos volátiles	ρ_{FFresco}	Densidad fango fresco
TRH	Tiempo de retención hidráulico	ρ_{H2O}	Densidad agua

RESUMEN

La gestión de los fangos de EDAR es uno de los problemas ambientales más complejos asociados al tratamiento de las aguas residuales, sin embargo, también se alza como una gran oportunidad para aprovechar los recursos que estos pueden aportar (nutrientes y energía). En este contexto se encuentra la EDAR de Tudela (Navarra) que, a través de la ampliación de la línea de fangos y consiguiente centralización del tratamiento de los lodos generados en instalaciones de depuración cercanas, pretende reducir el impacto ambiental y los costes mediante la recuperación del fósforo y la energía contenidos en el fango. Este estudio se enmarca en los proyectos Retos MAGNYFOS y LIFE-IP NAdapta-CC. De este modo, el objetivo principal de este estudio consiste en evaluar en términos técnicos, económicos y ambientales la situación actual y futura de la EDAR de Tudela. Tras la ampliación, la capacidad de tratamiento de la línea de fangos de la EDAR de Tudela aumenta un 220% respecto a la situación actual, pero el fósforo que finalmente atraviesa la línea de fangos y abandona la EDAR apenas varía. Además, la concentración de fósforo reactivo en la corriente final es de 81 mg $\text{PO}_4^{3-}/\text{L}$, la cual es suficiente para someter esta corriente a procesos de cristalización con el objetivo de obtener estruvita. Por otro lado, el escenario futuro contempla la instalación de un proceso de digestión anaerobia termófila a través del que generar biogás. En definitiva, la ampliación de la línea de fangos de la EDAR de Tudela genera un ahorro económico anual de alrededor de 150.000 € y evita la emisión de aproximadamente 700.000 toneladas de CO_2 equivalente, por lo que se concluye que la implantación del Escenario 2 mejora notablemente a la situación actual.

PALABRAS CLAVE

Agua residual, lodo, recurso, balance de materia, ortofosfato, digestión anaerobia termófila, biogás.

ABSTRACT

The management of WWTP sludge is one of the most complex environmental problems associated with the treatment of wastewater, however, it also stands as a great opportunity to take advantage of the resources that these can contribute (nutrients and energy). In this context is the Tudela WWTP (Navarra) which, through the expansion of the sludge line and consequent centralization of the treatment of the sludge generated in nearby treatment facilities, aims to reduce the environmental impact and costs through recovery of phosphorus and energy contained in the sludge. This study is part of the MAGNYFOS and LIFE-IP NAdapta-CC projects. Thus, the main objective of this study is to evaluate in technical, economic and environmental terms the current and future situation of the Tudela WWTP. After the expansion, the treatment capacity of the sludge line of the Tudela WWTP increases by 220% compared to the current situation, but the phosphorus that finally crosses the line and leaves the WWTP hardly varies. Furthermore, the concentration of reactive phosphorus in the final stream is 81 mg $\text{PO}_4^{3-}/\text{L}$, which is sufficient to subject this stream to crystallization processes to obtain struvite. On the other hand, the future stage contemplates the installation of a thermophilic anaerobic digestion process through which biogas is generated. In short, the expansion of the sludge line of the Tudela WWTP generates an annual economic saving of around € 150,000 and avoids the emission of approximately 700,000 tons of CO_2 equivalent, which is why it is concluded that the implementation of Stage 2 improve significantly to the current situation.

KEYWORDS

Wastewater, sludge, resource, mass balance, orthophosphate, thermophilic anaerobic digestion, biogas.

1. INTRODUCCIÓN

Las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) son instalaciones que tienen como objetivo conseguir, a partir de una mezcla más o menos proporcionada de aguas residuales urbanas e industriales asimilables a urbanas y mediante diferentes procedimientos físicos, químicos y biológicos, un agua efluente de mejores características de calidad, tomando como base ciertos parámetros de contaminación normalizados [1]. Tras el tratamiento del agua residual se genera una corriente de fango, de mayor contenido en sólidos y otras sustancias separadas en la línea de aguas. En este sentido, la gestión de los fangos de EDAR es uno de los problemas ambientales más complejos asociados al tratamiento de las aguas residuales, ya que se trata de un residuo capaz de causar problemas sobre la salud humana y ambiental si no se gestiona de forma adecuada [2] [3].

Por otro lado, en los últimos años cobra importancia la idea del aprovechamiento del fango como fuente de energía y nutrientes, ya que teniendo en cuenta los requisitos expuestos en la legislación, los principios de la denominada economía circular y la consideración del fango como un recurso se convierte en una gran alternativa para llevar a cabo su tratamiento y gestión [4].

Uno de los nutrientes contenidos en el fango de EDAR es el fósforo retirado de la línea de aguas, lugar al que llega procedente de los desechos humanos, detergentes y posibles vertidos industriales. Este elemento químico constituye un componente esencial en el crecimiento de plantas y animales, siendo junto al nitrógeno el factor limitante del desarrollo de los productores primarios de un ecosistema [5]. De este modo, el vertido de fósforo incontrolado sobre las masas de agua puede enriquecer de nutrientes los ecosistemas acuáticos y dar lugar a procesos de eutrofización, razón por la que eliminar el fósforo de las aguas residuales presenta una gran importancia; el fósforo retirado de la línea de aguas se acumula en la línea de fangos, lugar donde puede ser retirado mediante procesos de precipitación química. En este contexto, existen diversos compuestos originados a partir de la precipitación del fósforo, siendo realmente interesante la estruvita o fosfato de magnesio y amonio. La cristalización de estruvita no solo posibilita retirar el fósforo del proceso, sino que además permite llevarlo a cabo en una forma reutilizable ya que, entre sus posibles aplicaciones directas, destacan su empleo como fertilizante y su uso como materia prima en la industria del fósforo [6].

Por otro lado, existen diversos métodos para recuperar energía a partir del fango generado en las EDAR como son la digestión anaerobia, la incineración, la pirólisis, la gasificación y las pilas de combustible microbiano [3]. Actualmente, la tecnología más utilizada para recuperar energía a través del tratamiento de fangos es la digestión anaerobia, ya que el biogás producido supone la fuente principal de energía de las EDARs donde se aplica y, aunque presenta eficiencias pobres y largos tiempos de tratamiento, mejora a los tratamientos termoquímicos en requerimientos energéticos y necesidad de acondicionamiento posterior [3] [4]. Las pilas de combustible microbiano todavía se encuentran en proceso de investigación.

De este modo, aplicar la digestión anaerobia para producir biogás y la cristalización para retirar fósforo del efluente de la EDAR puede constituir una alternativa interesante para implantar en estas instalaciones y, de esta manera, acercarse a la visión de la EDAR como una biorrefinería en la que se obtienen productos de interés a partir de biomasa.

Actualmente, la EDAR de Tudela trata, además del fango producido en la propia instalación, los lodos generados en 6 EDARs cercanas, razón por la que el tratamiento de estabilización existente en planta está infradimensionado y por lo que, tras la deshidratación del fango, este se manda a gestor autorizado de residuos peligrosos para su correcto tratamiento de acuerdo con la legislación vigente. Por tanto, se plantea la ampliación de la línea de fangos de la EDAR de Tudela y la sustitución del tratamiento de estabilización actual por un proceso de digestión anaerobia termófila. De este modo, se procede a la centralización del tratamiento de los fangos generados en 18 EDARs situadas en la región sur de Navarra con el objetivo de reducir costes y optimizar la gestión de los fangos producidos.

En este contexto se sitúa el presente estudio, ya que evalúa de forma técnica la centralización en la EDAR de Tudela del tratamiento de fangos producidos en la zona sur de Navarra. De este modo, los objetivos principales que persigue la realización de esta memoria son los siguientes:

- ✚ Analizar la concentración de fósforo total y reactivo de los fangos producidos en las EDARs incluidas en los escenarios actual y futuro para realizar los balances de fósforo oportunos y conocer la cantidad de este nutriente que puede ser recuperado en la corriente final de la línea de fangos.
- ✚ Estudiar la producción de biogás procedente de la materia volátil eliminada en la digestión anaerobia termófila tras la centralización del tratamiento de fangos en Tudela.
- ✚ Evaluar en términos económicos y ambientales la situación actual y futura de la EDAR de Tudela con el objetivo de conocer la viabilidad técnica y económica y las repercusiones que supone el cambio de escenario.

Para ello, como cada fango presenta propiedades diferentes que lo caracterizan, viene de una población específica en cada caso y el tiempo de almacenamiento antes de su transporte es variable es necesario cumplir los siguientes objetivos concretos:

- ✚ Conocer el comportamiento del fango en función de su origen y temporalidad tras ser sometido a temperaturas similares a las que se produce la digestión anaerobia termófila (55 °C) y estudiar a escala piloto la variación que se produce en ciertos parámetros físico-químicos al tratar el fango mediante digestión anaerobia termófila.
- ✚ Comprobar si existe relación entre el contenido de sólidos totales de un fango y la concentración de fósforo, tanto total como reactivo, presente en este.

Este estudio se realiza en las instalaciones de Navarra de Infraestructuras Locales, S.A. (NILSA) presentes en la EDAR de Tudela y se enmarca en los siguientes proyectos:



- ✚ Proyecto Retos-colaboración *Utilización de subproductos de magnesio para la recuperación del fósforo en estaciones depuradoras de aguas residuales mediante precipitación de estruvita (MAGNYFOS)* (RTC2019-007257-5), del Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación orientada a los retos de la sociedad, en el marco del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica de Innovación 2017-2020 (Ministerio de Ciencia, Innovación e Universidades). Este proyecto ha financiado parte de este estudio.
- ✚ Acción C4.1 del proyecto LIFE-IP NAdapta-CC (LIFE 16 IPC001, “*Hacia una implementación completa, coherente e integrada de la política de adaptación al cambio climático en la región de Navarra - Towards an integrated, coherent and inclusive implementation of Climate Change Adaptation policy in a region: Navarre*” en el marco del programa europeo LIFE2016 Integrated Projects), cofinanciado por el Programa LIFE de la Unión Europea, del que NILSA es socia beneficiaria.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. GENERACIÓN Y COMPOSICIÓN DE FANGOS

Los fangos de EDAR se generan en distintas etapas de la depuración de las aguas residuales. Estos lodos son una mezcla de agua y sólidos separada de la línea de aguas a partir de procesos físicos, químicos y/o biológicos [7].

El fango procede de la línea de aguas de la EDAR, diferenciándose en función de la etapa en la que se genera. Los lodos primarios se originan en la decantación primaria (sedimentación de sólidos orgánicos e inorgánicos en suspensión), mientras que los fangos secundarios son el resultado del tratamiento biológico (biodegradación de la materia orgánica por la acción de microorganismos) [8]. Estos tratamientos secundarios pueden ser cultivos bacterianos en suspensión (fangos activos) y cultivos fijos (filtros percoladores):

- 
Fangos activos. El proceso de fangos activos es un sistema de tratamiento de las aguas residuales en el que se mantiene en un depósito o reactor biológico un cultivo bacteriano formado por diversos tipos de microorganismos y el agua residual a tratar. Los microorganismos se alimentan de las sustancias que lleva el agua residual para generar más microorganismos y en el proceso se forman unas partículas fácilmente sedimentables denominadas flóculos biológicos. Estos flóculos conforman el fango secundario [9]. Generalmente, el tratamiento mediante fangos activos suele ser aerobio, aunque también se puede dar en condiciones anóxicas o anaerobias.
- 
Filtros percoladores. Los lechos bacterianos son un sistema de depuración biológica de aguas residuales en el que la oxidación se produce al hacer circular, a través de un medio poroso, aire y agua residual. El agua residual, previamente decantada, se distribuye homogéneamente por la parte superior del relleno y por goteo atraviesa el material de relleno. La materia orgánica y otras sustancias del agua son degradadas en una película biológica compuesta por microorganismos que se desarrollan alrededor de los elementos constitutivos del material de relleno formando una película [9].

Generalmente, el fango generado en las EDARs tiene una composición de sólidos variable entre el 0,2 y el 12% en peso y está compuesto mayoritariamente por materia orgánica sujeta a procesos de descomposición, todo ello dependiendo del proceso aplicado en la depuración de las aguas residuales [10] [8]. Además de esta materia orgánica y de los sólidos inorgánicos, el fango puede contener cierta cantidad de componentes tóxicos o contaminantes entre los que destacan los metales pesados, potencialmente acumulables en la cadena trófica; el nitrógeno y el fósforo, causantes de episodios de eutrofización; contaminantes orgánicos persistentes (COPs) y microorganismos patógenos [8]. En la Tabla 1 se muestra la composición característica de los fangos de EDAR.

En los últimos años la producción de fangos de EDAR ha crecido considerablemente a causa del incremento de la población y, consecuentemente, del aumento en el número y capacidad de las estaciones depuradoras [8]. En España se producen anualmente alrededor de 1,2 millones de toneladas de fango (en materia seca), lo que supone en torno a 0,3 kilogramos de lodo seco por metro cúbico de agua tratada en las depuradoras del territorio nacional (ver Figura 1). [11]

Aunque es considerado un residuo, el fango de EDAR puede convertirse en una fuente de energía o recursos que para producirlos de otro modo supondrían considerables impactos ambientales [4]. En el año 2018 en España el aprovechamiento principal de los lodos fue su uso en agricultura, seguido de la incineración y el depósito en vertedero. Por todo ello, no solo es necesario garantizar una correcta gestión de los fangos de forma económica sin poner en peligro el medio ambiente ni la salud humana, sino que además es preciso contemplar alternativas que recuperen o valoricen este producto de la depuración de las aguas residuales disminuyendo el impacto ambiental que provoca y reduciendo los costes económicos que genera.

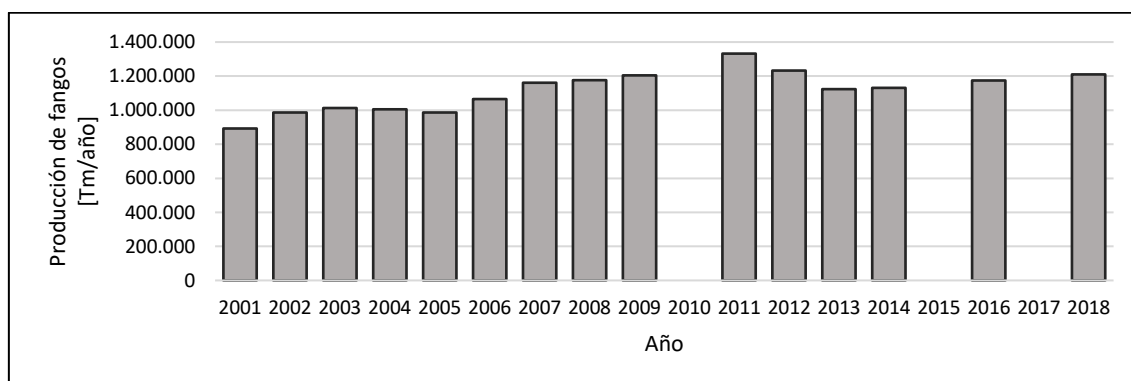


Figura 1. Serie temporal de la producción de fangos en las EDARs de España [11].

Tabla 1. Características principales de los fangos primario y secundario [4].

Parámetros	Unidades	Fango primario	Fango secundario
ST	%	2 – 9	0,8 – 3,3
Contenido en agua	%	91 – 98	96,7 – 99,2
FV	%	60 – 80	59 – 88
Nitrógeno (N)	% ST	1,5 – 4,0	2,4 – 5,0
Fósforo (P)	% ST	0,17 – 2,80	0,5 – 2,3
Potasio (K ₂ O)	% ST	0 – 1	0,5 – 0,7
Celulosa	% ST	8 – 15	7,0 – 9,7
Hierro (Fe)	g/kg	2 – 4	n.d.
Sílice (SiO ₂)	% ST	15 – 20	n.d.
pH	-	5 – 8	6,5 – 8,0
Grasas	% ST	7 – 65	2 – 12
Proteínas	% ST	20 – 30	32 – 41
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /L	500 – 1.500	580 – 1.100
Ácidos grasos volátiles	mg C ₂ H ₃ O ₂ -R/L	200 – 2.000	1.100 – 1.700
Carbohidratos	% ST	n.d.	6,1 – 9,8
Contenido energético	kJ/kg ST	2.900 – 23.000	19.000 – 23.000

2.2. MARCO LEGISLATIVO APLICABLE

Conforme al Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022, la gestión de los fangos generados debe llevarse a cabo acorde a lo establecido en la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. De este modo, las EDARs, como productoras de estos residuos, deben asegurar su tratamiento adecuado, ya sea mediante la realización directa o el encargo a gestores autorizados. Además, tal y como expone la Ley 22/2011, en la gestión de los fangos debe primar la denominada jerarquía de residuos que, en este caso, clasifica el destino final de estos en 3 categorías: utilización en agricultura (recuperación), incineración (valorización energética) y depósito en vertedero (eliminación). Actualmente, esta Ley se encuentra en proceso de actualización mediante el nuevo proyecto de Ley de residuos y suelos contaminados.

Cuando el tratamiento final de los lodos generados en la EDAR sea la utilización de éstos en la agricultura, se debe cumplir con lo establecido en el Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los fangos de depuración en el sector agrario, que transpone la Directiva 86/278/CEE relativa a la protección del medio ambiente y, en particular, de los suelos. En este caso, los criterios de calidad mínimos de aplicación de fangos en suelo agrícola son los que se muestran en la Tabla 2.

Asimismo, en este contexto también es aplicable la Directiva 91/676/CEE transpuesta en el Real Decreto 261/1996 sobre protección de las aguas contra la contaminación producida por los nitratos procedentes de fuentes agrarias.

En el caso de que la incineración sea el tratamiento asignado para los fangos de EDAR, además de cumplir con lo establecido en la Ley 22/2011, se debe acatar lo expuesto en el Real Decreto 815/2013 por el que se aprueba el Reglamento de emisiones industriales y de desarrollo de la Ley 16/2002 de prevención y control integrados de la contaminación.

Por otro lado, si el destino de los lodos de depuradora es su depósito en vertedero se debe atender a la Directiva 1999/31/CEE relativa al vertido de residuos junto con la Decisión del Consejo, de 19 de diciembre de 2002, por la que se establecen los criterios en los vertederos con arreglo al artículo 16 y al anexo II de la Directiva 1999/31/CEE. Todo ello transpuesto en el Real Decreto 1481/2001 por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.

Tabla 2. Valores límite de concentración de metales pesados en suelos y en fangos destinados a su utilización agraria [10].

Anexo del RD 1310/1990	Parámetro	Unidades	Suelos con pH < 7	Suelos con pH > 7
ANEXO IA Valor límite de concentración de metales pesados en suelos	Cadmio	mg/kg materia seca	1	3
	Cobre		50	210
	Níquel		30	112
	Plomo		50	300
	Zinc		150	450
	Mercurio		1	1,5
	Cromo		100	150
ANEXO IB Valor límite de concentración de metales pesados en los lodos destinados a su utilización agraria	Cadmio	mg/kg materia seca	20	40
	Cobre		1000	1750
	Níquel		300	400
	Plomo		750	1200
	Zinc		2500	4000
	Mercurio		16	25
	Cromo		1000	1500

Finalmente, si los fangos contienen alguna sustancia tóxica o peligrosa es preciso aplicar el apartado correspondiente de la Ley 22/2011. En el caso de que no se encuentre regulado por esta ley se aplica el Real Decreto 833/1988 por el que se aprueba el Reglamento para la ejecución de la Ley 20/1986, básica de residuos tóxicos y peligrosos.



2.3. PROCESOS DE TRATAMIENTO DE FANGOS

Existen diversidad de tratamientos empleados en las EDARs, pero generalmente, la línea de fangos está constituida por el espesamiento, la estabilización y la deshidratación.

2.3.1. ESPESAMIENTO

El espesamiento de lodos tiene como objeto la reducción del volumen de estos para incrementar la eficacia y economía de los procesos posteriores, permitiendo reducir la capacidad de tanques y equipos, cantidad de reactivos de acondicionamiento y cantidad de calor y combustible en digestores, secado o incineración. Además, se consigue la mezcla y homogeneización de los fangos procedentes de distintos procesos de decantación [12] [9].

El espesado suele llevarse a cabo mediante procedimientos físicos entre los que destacan los espesamientos por gravedad o por flotación [13].

-  **Espesamiento por gravedad.** El espesamiento por gravedad se lleva a cabo en un tanque de diseño similar al de un decantador convencional [13]. El fango diluido se conduce a una cámara de alimentación central tras la que sedimenta y compacta [9].
-  **Espesamiento por flotación.** Este sistema se basa en que cuando se introduce aire a presión en un líquido con cierto contenido de sólidos, parte de las burbujas de aire se fijan a estos elementos sólidos y debido a la menor densidad del agregado tienden a flotar [9].

2.3.2. ESTABILIZACIÓN

El aprovechamiento de los fangos como un producto requiere la aplicación de un tratamiento previo de estabilización que lo haga adecuado para el fin requerido [12]. Esta estabilización se lleva a cabo para reducir la presencia de microorganismos patógenos, eliminar olores desagradables e inhibir, reducir o eliminar su potencial de putrefacción [13].

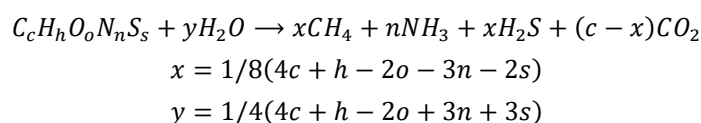
De entre todas las tecnologías disponibles para la estabilización en este texto se describe debido a su implicación directa en el estudio la digestión anaerobia de fangos.

La digestión anaerobia de lodos es llevada a cabo por un consorcio de bacterias. Dentro de la biomasa implicada en este proceso, algunas bacterias asociadas con la hidrólisis son capaces de degradar materia orgánica tanto en condiciones aerobias como anaerobias (anaerobias facultativas). Otros microorganismos asociados con las siguientes fases únicamente son activos en ambientes estrictamente anaerobios (anaerobios obligados), ya que son capaces de obtener el oxígeno necesario para su desarrollo directamente de la descomposición de la materia orgánica [9] [14].

En este proceso de digestión la materia orgánica a descomponer sigue una ruta que, a grandes rasgos, suele dividirse en 4 etapas principales:

- ✚ Hidrólisis. Las enzimas extracelulares transforman compuestos de elevado peso molecular como carbohidratos, proteínas y aminoácidos en compuestos que pueden servir como fuente de energía y de carbono celular (ácidos orgánicos volátiles) [9].
- ✚ Acidogénesis. Es la conversión bacteriana de los compuestos obtenidos en la primera etapa en compuestos intermedios identificables de menor peso molecular [9]. Los productos de esta fase son principalmente ácidos simples como acético, butírico y propiónico (ácidos grasos volátiles). También se pueden obtener gases como CO₂, H₂ y NH₃, así como pequeñas cantidades de alcoholes, aldehídos y cetonas [14]. Esta fase conforma la etapa crítica del proceso, por lo que es esta la que determina el tiempo de retención hidráulico del proceso de digestión.
- ✚ Acetogénesis. Esta etapa consiste en el metabolismo de los ácidos grasos volátiles para producir en última instancia acetato, CO₂ y H₂ [14].
- ✚ Metanogénesis. Es la conversión bacteriana de los productos intermedios en productos finales más simples, principalmente CH₄ [9]. En esta etapa, los productos de la acetogénesis son utilizados como fuente de energía, a la vez que consiguen mantener la concentración de H₂ baja para que la etapa anterior se pueda seguir produciendo [14].

De forma global, la descomposición de materia orgánica en biogás en condiciones anaerobias se expresa mediante la siguiente reacción bioquímica [3]:



La composición volumétrica del gas generado contiene un 65-70% de CH₄, un 25-30% de CO₂ y pequeñas cantidades de N₂, H₂, H₂S, vapor de agua y otros gases [13]. Por tanto, este biogás es susceptible de ser aprovechado energéticamente mediante su combustión en motores, turbinas o calderas, reduciendo así el consumo energético de la EDAR [9]. Además del biogás, la digestión anaerobia produce un digestato como producto final que contiene grandes cantidades de nutrientes y, por tanto, puede ser utilizado como fertilizante o materia prima del proceso de compostaje [3].

La digestión anaerobia se realiza normalmente en procesos de una etapa en condiciones mesófilas (alrededor de 35 °C) o en condiciones termófilas (en torno a 55 °C) [12]. Las ventajas que presenta la digestión anaerobia mesófila son la producción de energía en forma de metano, la reducción en un 30-50% de la masa de fango final y su sencilla operación. Sin embargo, suele presentar baja eficiencia en la reducción de sólidos e incapacidad de higienización [14]. Por este motivo, surge la digestión anaerobia termófila. La velocidad de reacción de las reacciones bioquímicas aumenta con la temperatura, de modo que se duplica con cada incremento de 10 °C hasta alcanzar una temperatura límite [13]. De este modo, se deduce que la digestión anaerobia termófila presenta cinéticas mucho más rápidas y, por tanto, aumenta de forma considerable la capacidad de tratamiento de fangos y la producción de biogás. Además, mejora la deshidratación posterior y, debido a la temperatura de operación, se produce la higienización del fango. Por el contrario, los inconvenientes que presenta la digestión termófila incluyen el mayor requerimiento energético, la peor calidad del sobrenadante obtenido, la generación de olores y la menor estabilidad del proceso [13]. En las Tablas 3 y 4 se exponen las características del fango digerido en función del origen del fango fresco y del tipo de digestión anaerobia aplicada.

Tabla 3. Características principales del fango fresco procedente de procesos de fangos activos y tras la digestión anaerobia [14].

Parámetro	Unidades	Fango fresco	Mesófilo	Termófilo
pH	-	-	7,8	8,0
ST	g/L	35,2	26,7	26,0
SV	g/L	26,2	16,4	15,9
FV	%	74,3	60,7	61,1
DQO _f	mg/L	11.431	3.798	8.123
TRH	Días	-	15	10
Rendimiento eliminación SV	%	-	46,3	45,5

Tabla 4. Características principales del fango procedente de filtros percoladores y tras la digestión anaerobia [14].

Parámetro	Unidades	Fango fresco	Mesófilo	Termófilo
pH	-	5,7	7,4	7,6
ST	g/L	32,2	23,2	22,5
SV	g/L	21,3	12,2	11,7
FV	%	66,1	52,8	51,9
DQO _f	mg/L	4.160	750	2.052
TRH	Días	-	15	10
Rendimiento eliminación SV	%	-	42,6	44,7

2.3.3. DESHIDRATACIÓN

La deshidratación es una operación física utilizada para reducir el contenido de humedad del lodo y, consecuentemente, su volumen hasta convertirlo en una masa fácilmente manejable y transportable [12]. Existen diversas tecnologías para llevar a cabo la deshidratación del fango, aunque en esta memoria únicamente se incluye la descripción de la centrifugación debido a su aplicación en este proyecto.

El proceso de centrifugación se basa en la acción centrípeta para la separación sólido-líquido por diferencia de densidades. El fango se introduce a caudal constante en la cuba giratoria donde se separa en una torta densa que contiene los sólidos y una corriente diluida que contiene sólidos finos de poca densidad [9]. Cabe mencionar que el fango se acondiciona previamente mediante la adición de floculantes para mejorar sus características de deshidratación [13].

Llegados a este punto es importante señalar las diferencias entre espesamiento y deshidratación ya que, aunque ambos procesos persiguen un aumento de la concentración de sólidos y, por tanto, reducción del volumen, el grado de concentración alcanzado es diferente en cada caso. De este modo, los fangos espesados presentan características correspondientes a líquidos, mientras que los lodos deshidratados se comportan como sólidos [12].

2.4. EL FÓSFORO Y SU RECUPERACIÓN

El fósforo es un no metal de la decimoquinta familia de la tabla periódica representado por el símbolo P [15] [16]. El fósforo es un elemento vital para las formas de vida, siendo sus formas fosfatadas un compuesto esencial en los procesos de transferencia de energía como el metabolismo, la fotosíntesis, la acción muscular y la función nerviosa [16]. La forma más estable del fósforo es el fosfato, por lo que en condiciones atmosféricas el fósforo no aparece prácticamente en forma gaseosa [5]. De este modo, el ciclo biogeoquímico del fósforo se desarrolla principalmente sobre la corteza terrestre y la hidrosfera (ver Figura 2) [17] [5].

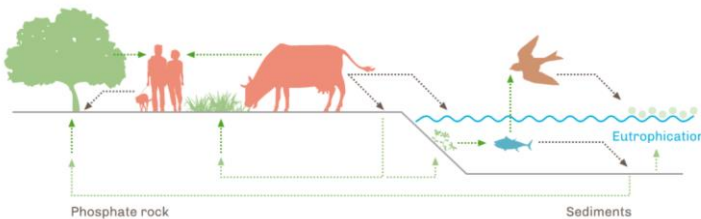


Figura 2. Representación del ciclo biogeoquímico del fósforo [18].

El aprovechamiento de este recurso se basa en la extracción de mineral fosfático y su posterior procesamiento en la fabricación de productos de uso comercial, principalmente fertilizantes (aproximadamente el 80%) [5]. De este modo, el incremento de la población mundial y, por tanto, de las necesidades alimentarias provocan el aumento de la extracción del fósforo, reduciendo así las reservas de este recurso finito. Además, gran parte del ciclo biogeoquímico del fósforo transcurre en el agua, pudiendo provocar nocivas proliferaciones de algas dando lugar a la eutrofización [13].

Por tanto, existe una urgente necesidad de encontrar una fuente renovable de fósforo como alternativa a las reservas de roca fosfórica y evitar los posibles episodios de eutrofización que puede provocar su vertido incontrolado sobre las masas de agua [17]. En este sentido, del total de las entradas de fosfatos a las aguas superficiales europeas, el 24% proviene de residuos humanos en las aguas residuales, el 11% del empleo de detergentes, el 34% de la ganadería, el 7% de la industria, el 16% del empleo de fertilizantes y el 10% restante proviene de procesos naturales de erosión [6]. Por tanto, las aguas residuales urbanas representan una importante opción en cuanto a la recuperación de fósforo se refiere, ya que contienen el 30% de fosfatos disponibles en los cuerpos de agua y mediante su extracción en las EDARs se evitan problemas de vertido sobre las masas de agua susceptibles de eutrofización. La cantidad de fosfatos de las aguas residuales urbanas procede fundamentalmente de fuentes humanas, detergentes, desechos de comida y otros productos (ver Tabla 5).

Tabla 5. Procedencia de las fuentes humanas de fósforo sobre las aguas residuales urbanas [19].

Fuente	Unidades	Valor
Orina	kg/hab·d	0,3 – 0,4
Heces		0,18 – 0,2
Detergentes y productos de limpieza		0,18
Total		0,66 – 0,78

En este contexto, existen diversos métodos de recuperación de fósforo en aguas residuales entre los que destacan la precipitación química, la adsorción, el intercambio iónico, los procesos de membrana y la cristalización, siendo esta última la técnica más prometedora [20].

Los principales precipitados de fósforo mediante cristalización en el proceso de depuración de aguas residuales son los que se describen a continuación:

- ✚ Estruvita. Es un compuesto químico formado por fosfato hexahidratado que contiene a su vez amonio y magnesio ($\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Este compuesto posee una formación cristalina y aparece normalmente en la línea de fango de las EDARs [16]. La estruvita precipita a valores de pH comprendidos entre 7 y 11 [6].
- ✚ Hidroxiapatita. De entre todos los fosfatos cálcicos, la hidroxiapatita es el compuesto más estable termodinámicamente, por lo que los compuestos más inestables actúan como precursores en su transformación final [6]. La hidroxiapatita es un compuesto químico formado por fosfato, calcio y iones hidróxidos [$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$]. Tiene una formación cristalina y aparece, como la estruvita, en la línea de fangos de las depuradoras [16].

Además, cabe destacar que la precipitación descontrolada de estos compuestos en las líneas de tratamiento de aguas y fangos representa un grave problema para la operación de estas, ya que se trata de compuestos altamente insolubles que si no se presta atención a dónde se pueden formar son capaces de provocar la obstrucción parcial o total de los circuitos de depuración. De este modo, es importante detectar los puntos en los que se dan concentraciones altas de fósforo, calcio y magnesio para intentar reconducir esas corrientes a un tratamiento adecuado y, de paso, recuperar estos compuestos en su forma mineral.

2.5. PRODUCCIÓN DE FANGOS EN LA COMUNIDAD FORAL DE NAVARRA

En Navarra se producen anualmente alrededor de 50.000 toneladas de fango de EDAR (en materia seca), lo que suponen unos 0,5 kilogramos de lodo seco por metro cúbico de agua tratada en la Comunidad (ver Figura 3).

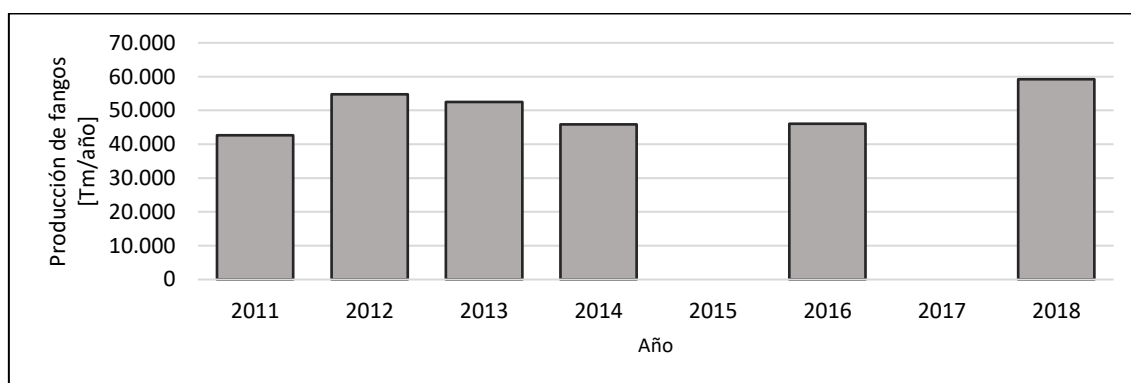


Figura 3. Serie temporal de la producción de fangos en las EDARs de la Comunidad Foral de Navarra [11].

La depuración biológica, basada generalmente en filtros de lecho bacteriano o filtros percoladores, es el tratamiento secundario convencional en casi todas las plantas de Navarra, aunque existen otras técnicas como el lecho biológico móvil aireado y los fangos activos.

Cabe destacar que prácticamente un tercio del caudal de aguas residuales tratadas en Navarra se da en la EDAR de Arazuri (Pamplona), por lo que el resto de las depuradoras son de mediano (Tudela) y pequeño tamaño. Normalmente, la operación de estas plantas depuradoras da servicio a poblaciones de hasta 50.000 habitantes equivalentes. Este hecho provoca que el tratamiento de los fangos producidos no resulte viable en el lugar de origen, y por tanto, los lodos son transportados a otras EDARs de mediano tamaño cercanas donde sí se puede llevar a cabo el tratamiento.

3. METODOLOGÍA

3.1. DESCRIPCIÓN DE LAS EDAR INCLUIDAS EN EL ESTUDIO

La EDAR de Tudela, lugar donde se desarrolla la parte experimental del presente Trabajo Fin de Máster, es la depuradora de mayor tamaño de la región sur de Navarra, razón por la que se plantea la centralización del tratamiento de fangos generados en varias EDARs cercanas.

En esta memoria se considera la producción de fangos de otras 18 depuradoras situadas en la zona sur de la Comunidad Foral de Navarra. Las características principales, tanto de la EDAR de Tudela como del resto de EDARs incluidas en esta memoria, se exponen en la Tabla 6.

Tabla 6. Características principales de las EDARs incluidas en el estudio [21].

EDAR	Habitantes equivalentes	Componente agroindustrial [%]	Caudal de diseño [m³/d]	Caudal de tratamiento [m³/d]	Tratamiento secundario
Tudela	114.550	60	22.150	21.160	Lecho bacteriano
EDAR 1	8.500	76	701	490	Lecho bacteriano
EDAR 2	3.350	6	1.800	536	Fangos activos
EDAR 3	15.558	49	2.086	1.860	Lecho bacteriano
EDAR 4	11.500	31	2.990	2.055	Lecho bacteriano
EDAR 5	13.083	89	750	776	Lecho bacteriano
EDAR 6	34.225	82	4.147	3.369	Lecho bacteriano
EDAR 7	4.580	9	1.400	864	Lecho bacteriano
EDAR 8	10.066	80	2.852	717	Lecho bacteriano
EDAR 9	78.857	84	8.500	10.639	Lecho bacteriano
EDAR 10	4.800	20	3.250	2.048	Lecho bacteriano
EDAR 11	52.050	81	10.400	5.170	Lecho bacteriano
EDAR 12	22.425	35	5.555	4.611	MBBR
EDAR 13	42.964	58	7.500	6.140	Lecho bacteriano y fangos activos
EDAR 14	36.592	56	8.500	4.720	Lecho bacteriano
EDAR 15	5.175	45	1.500	858	Lecho bacteriano
EDAR 16	21.567	84	3.200	2.487	Lecho bacteriano
EDAR 17	42.400	89	3.500	2.903	Lecho bacteriano
EDAR 18	3.773	6	2.232	1.696	Lecho bacteriano

La línea de aguas de la EDAR de Tudela está compuesta por el pretratamiento, el tratamiento primario y el tratamiento secundario.

El agua residual llega a una reja de gruesos donde se eliminan partículas con diámetro superior a 20 mm. Tras ello, el agua atraviesa los tamices y los desarenadores eliminando partículas de tamaño superior a 3 mm y arenas.

El tratamiento primario consiste en un decantador de 2.440 m³ de volumen en el que se eliminan sólidos en suspensión, grasas y sólidos flotantes. Por otro lado, el tratamiento secundario se lleva a cabo en filtros percoladores en triple etapa. En primer lugar, el agua de salida del decantador primario se dirige a un filtro percolador de 30 m de diámetro y 5 m de altura con un volumen de relleno útil de 3.534 m³. De aquí se envía a otro decantador de características similares al decantador primario y, tras ello, se manda en paralelo a 2 filtros percoladores como el anterior. Una vez atravesados estos filtros, el agua se dirige a 2 decantadores intermedios (1.677 m³) y, posteriormente, a otros 2 filtros percoladores de menor tamaño (1.571 m³). Finalmente, el agua deja los filtros y se dirige a 2 decantadores finales de 1.677 m³ cada uno.

De este modo, todos los sólidos recogidos en los decantadores intermedios y finales se redirigen a la decantación primaria y desde este punto se envían a la línea de fangos. La línea de fangos de la EDAR de Tudela se compone de un tratamiento de digestión aerobia termófila autosostenida (ATAD) y un proceso de centrifugación mecánica.

En primer lugar, los fangos se almacenan en un depósito de 165 m³. Tras ello, se dirigen a 2 digestores ATAD de 350 m³ de volumen útil. Finalmente, el fango tratado se almacena en un depósito de 395 m³ desde donde se alimenta a los sistemas de centrifugación.

3.2. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA PILOTO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

La planta piloto de digestión anaerobia instalada en la EDAR de Tudela consta de un tanque de alimentación, 2 digestores operando en condiciones anaerobias y todos los sistemas mecánicos de control que acompañan a la instalación y aseguran su correcto funcionamiento.

El fango de alimentación a los digestores se almacena en un tanque de poliéster con un diámetro de 2,35 m y una altura de 2 m. Dentro de este existe un sistema de agitación y aireación, tipo jet, que funciona de forma intermitente controlado por un autómata. La carga de los digestores se realiza una vez al día.

La planta piloto consta de 2 digestores de mezcla perfecta (CSTR). Este tipo de digestores convencionales mantienen una agitación completa y continua del fango en su interior para conseguir un mejor contacto entre la biomasa y el sustrato a tratar. En estas condiciones el tiempo de retención de sólidos (TRS) es igual al tiempo de retención hidráulico (TRH) y, en este caso, se opera a 15 días el digestor anaerobio termófilo y a 20 días el digestor anaerobio mesófilo.

Ambos digestores son iguales y presentan 1,3 m de diámetro por 3 m de altura total, con un volumen útil de aproximadamente 2,75 m³. La salida del fango de los tanques se realiza por rebose mediante un tubo sumergido unos 20 cm en el fango del digestor, actuando de esta manera de sello hidráulico sobre el biogás. Un digestor opera en rango de temperatura mesófilo (35 °C) y el otro en rango termófilo (55 °C), siendo el fango digerido de este último el objeto de estudio del presente proyecto. Finalmente, al tanque de salida del fango digerido en el digestor anaerobio termófilo está conectado un tornillo deshidratador donde se obtiene el rebose o sobrenadante, por un lado, y el fango deshidratado, por el otro.

3.3. METODOLOGÍA ANALÍTICA Y DATOS HISTÓRICOS

Los parámetros físico-químicos analizados, el método empleado y los equipos utilizados se recogen en la Tabla 7.

Por otro lado, se cuenta con datos de tonelaje diario y porcentaje en materia seca de los fangos generados en las EDARs citadas anteriormente. Los datos empleados proceden de la base de datos de NILSA de los años 2019 y 2020. En el caso de la EDAR de Tudela y otras plantas en las que se produce la recepción de lodos originarios de depuradoras cercanas se calcula la producción diaria de fangos (F_{Fango}) mediante la Ecuación 1:

$$F_{Fango} = 32,5 \left[\frac{g \text{ ST}}{(hab - eq) \cdot d} \right] \cdot Nhe [(hab - eq)] \cdot \frac{1}{C_{ST}} \left[\frac{L}{g \text{ ST}} \right] \cdot \rho_{FFresco} \left[\frac{g}{L} \right] \quad (1)$$

Tabla 7. Parámetros medidos, métodos empleados y equipos utilizados en el análisis de la composición físico-química de los fangos estudiados.

Parámetro	Unidades	Método	Rango	Precisión	Equipo
DQO	mg O ₂ /L	Adaptación del método 410.4 aprobado por la USEPA para la determinación de la DQO en aguas superficiales y residuales	0 – 1.500	±22	Fotómetro multiparamétrico HI83399
N-NH₃	mg N-NH ₃ /L	Adaptación del método de Nessler D1426 del ASTM <i>Manual of Water and Environmental Technology</i>	0 – 100	±3	Fotómetro multiparamétrico HI83399
P_T	mg PO ₄ ³⁻ /L	Adaptación del método del ácido vanadomolibdofosfórico 4500-P C del <i>Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater</i> , 20ª edición	0 – 32,6	±1	Fotómetro multiparamétrico HI83399
P_R	mg PO ₄ ³⁻ /L	Adaptación del método del ácido vanadomolibdofosfórico 4500-P C del <i>Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater</i> , 20ª edición	0 – 32,6	±0,5	Fotómetro multiparamétrico HI83399
Mg²⁺	mg Mg ²⁺ /L	Adaptación del método de la calmagita	0 – 150	±5	Fotómetro multiparamétrico HI83399
Ca²⁺	mg Ca ²⁺ /L	Adaptación del método del oxalato	0 – 400	±10	Fotómetro multiparamétrico HI83399
pH	Unidades de pH	Método 4500-H ⁺ de <i>Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater</i> , 20ª edición	0 – 14	–	pHímetro HI5221
ST	%	Método 2540B de <i>Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater</i> , 20ª edición	–	–	Estufa
SV	%	Método 2540E de <i>Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater</i> , 20ª edición	–	–	Mufla
Temperatura	°C	–	-50 – 300	–	Termómetro

3.4. GESTIÓN DE FANGOS EN LA EDAR DE TUDELA: DESCRIPCIÓN DE ESCENARIOS

En primer lugar, se procede al planteamiento de diferentes escenarios sobre los que realizar la simulación del movimiento de fangos con destino a la EDAR de Tudela. Estos escenarios son los que se describen a continuación:

- Escenario 1 – Configuración actual de la EDAR de Tudela. El Escenario 1 se basa en las condiciones de operación actuales de la EDAR de Tudela con la salvedad de que los digestores ATAD no soportan la carga actual y se asume que funcionan como depósitos de almacenamiento intermedio. La línea de fangos presente consta de un proceso de deshidratación mediante centrifugas donde se separa parte del agua contenida en los fangos tratados para obtener un producto sólido con un porcentaje de materia seca de aproximadamente el 20% (ver Figura 4). El fango procesado en este escenario procede de 6 instalaciones situadas en la región sur de Navarra (EDARs 1-6), además de Tudela (ver Anexo I). Actualmente, la EDAR de Tudela no tiene capacidad para tratar todo el fango que le llega por lo que únicamente se deshidrata y se manda a un gestor autorizado de residuos para ser tratado.
- Escenario 2 – Tratamiento centralizado de fangos frescos y deshidratados mediante digestión anaerobia termófila. En este escenario se plantea la ampliación de la línea de fangos de la EDAR de Tudela con el objetivo de centralizar el tratamiento de los fangos generados en depuradoras situadas en las zonas media y sur de la Comunidad Foral de Navarra, por tanto, el Escenario 2 difiere del anterior en el origen y cantidad de fango a tratar y en el propio tratamiento empleado. En primer lugar, el fango producido en Tudela es introducido en espesadores con el fin de aumentar el porcentaje en materia seca del 3 al 4,5%. Tras ello, se produce la mezcla de este con distintos fangos generados de forma externa (alguno de ellos deshidratado en origen) y se aplica un tratamiento de digestión anaerobia termófila con el fin de estabilizarlos. Finalmente, se deshidrata el fango digerido en un sistema de centrifugación mayor que el del Escenario 1 para obtener un fango deshidratado con un contenido en materia seca de alrededor del 20%. Finalmente, el rebose obtenido en la centrifuga se mezcla con la corriente de bajo contenido en sólidos derivada de los espesadores (ver Figura 5). En este caso, el fango a tratar procede de las mismas 6 depuradoras incluidas en el Escenario 1 (EDARs 1-6) más otras 11 instalaciones (EDARs 7-18), todo ello además de Tudela (ver Anexo I).

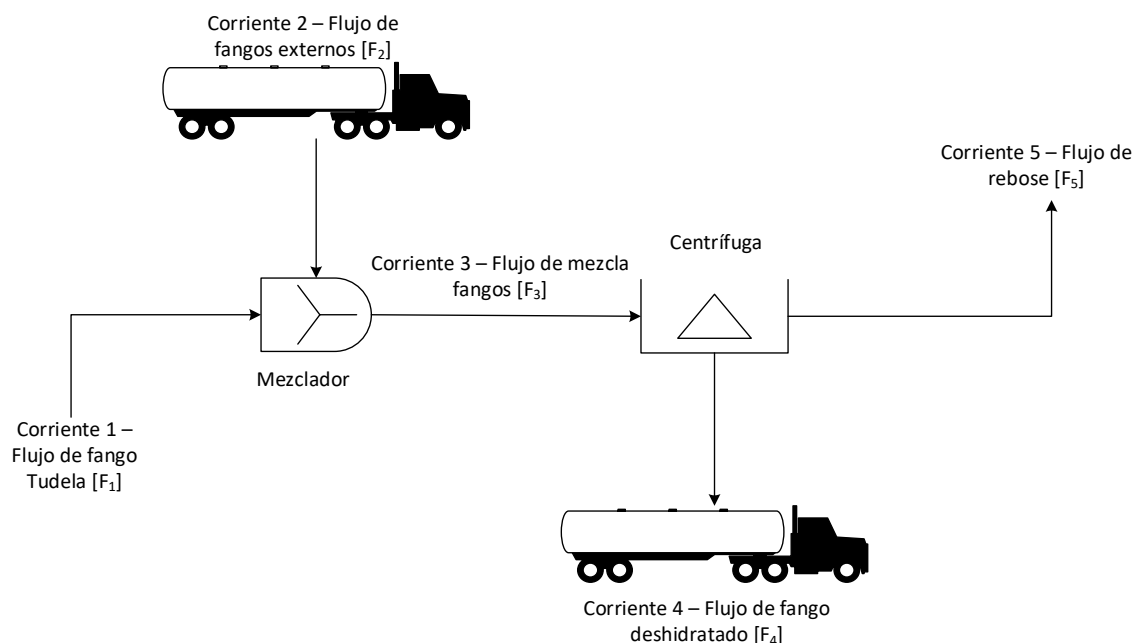


Figura 4. Diagrama de flujo del Escenario 1 – Configuración actual de la línea de fangos.

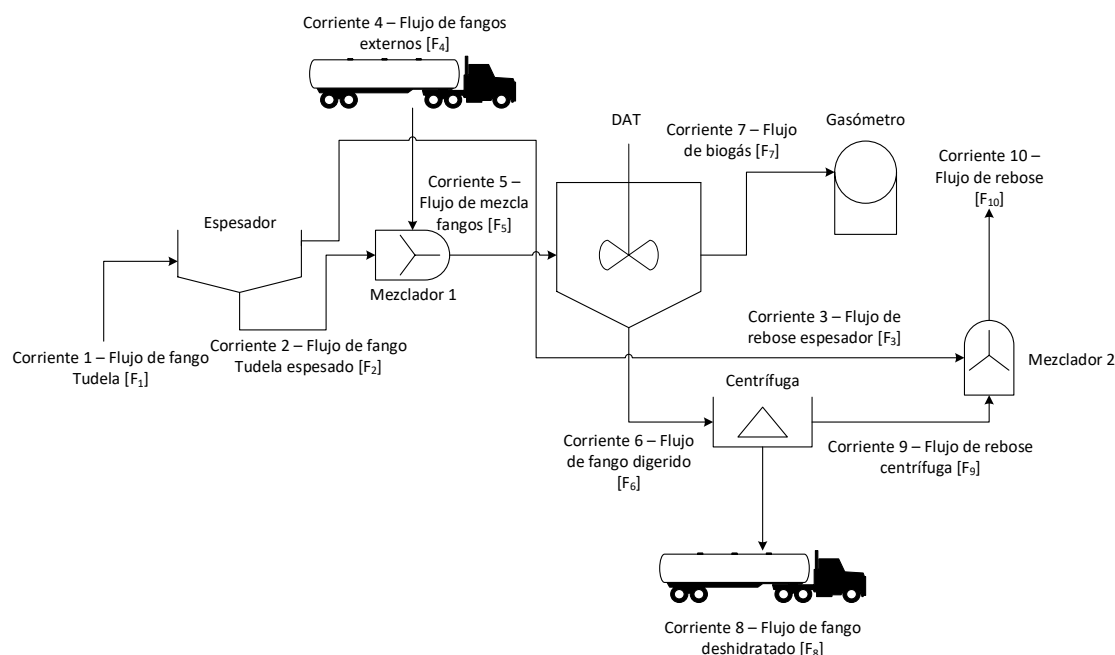


Figura 5. Diagrama de flujo del Escenario 2 – Tratamiento centralizado de fangos frescos y deshidratados mediante digestión anaerobia termófila.

Una vez conocidos los diferentes escenarios de gestión y tratamiento, se procede a la simulación del movimiento de fangos. Para ello, se utilizan datos reales de producción y porcentaje en materia seca de fangos de distintas EDARs referentes a los años 2019 y 2020 con el objetivo de calcular el flujo de fango diario y la cantidad de sólidos que deben ser tratados en la EDAR de Tudela en cada uno de los distintos escenarios de gestión.

3.5. BALANCES DE FANGO Y FÓSFORO

3.5.1. BALANCES DE FANGO Y FÓSFORO DEL ESCENARIO 1

En este escenario ninguno de los fangos es deshidratado con anterioridad, por tanto, prácticamente todo su contenido es agua y se considera que la densidad del fango fresco es igual a la de esta. De este modo se calculan los caudales de fango proporcionados por Tudela (Q_1) y por cada una de las EDARs externas (Q_2) a partir de las Ecuaciones 2-4:

$$\rho_{FFresco} = \rho_{H_2O} = 1.000 \frac{kg}{m^3} \quad (2)$$

$$Q_1 = \frac{F_1}{\rho_{FFresco}} \quad (3)$$

$$Q_2 = \frac{F_2}{\rho_{FFresco}} \quad (4)$$

Conocidos los caudales de las corrientes de entrada (Q_1 y Q_2) se calcula el flujo de sólidos totales de cada una de ellas (F_{ST1} y F_{ST2}) (ver Ecuaciones 5 y 9) y, tras ello, se aplica la fracción volátil de cada fango (FV) para obtener el flujo de sólidos volátiles (F_{SV1} y F_{SV2}) (ver ecuaciones 6 y 10).

Finalmente, se obtiene el flujo de sólidos fijos o inorgánicos (F_{SF1} y F_{SF2}) mediante la diferencia entre sólidos totales y volátiles (ver Ecuaciones 7 y 11) y se calcula el flujo de agua presente en las corrientes de entrada ($F_{(H_2O)1}$ y $F_{(H_2O)2}$) mediante la diferencia entre flujo total de fango y flujo de sólidos totales (ver Ecuaciones 8 y 12).

$$F_{ST1} = Q_1 \cdot C_{ST1} \quad (5)$$

$$F_{SV1} = F_{ST1} \cdot FV_1 \quad (6)$$

$$F_{SF1} = F_{ST1} - F_{SV1} \quad (7)$$

$$F_{(H_2O)1} = F_1 - F_{ST1} \quad (8)$$

$$F_{ST2} = Q_2 \cdot C_{ST2} \quad (9)$$

$$F_{SV2} = F_{ST2} \cdot FV_2 \quad (10)$$

$$F_{SF2} = F_{ST2} - F_{SV2} \quad (11)$$

$$F_{(H_2O)2} = F_2 - F_{ST2} \quad (12)$$

Ambas corrientes se dirigen a un depósito de almacenamiento donde se mezclan y se forma la corriente de fango a tratar en la EDAR de Tudela (ver Ecuaciones 13-18):

$$F_3 = F_1 + F_2 \quad (13)$$

$$F_{ST3} = F_{ST1} + F_{ST2} \quad (14)$$

$$F_{SV3} = F_{SV1} + F_{SV2} \quad (15)$$

$$F_{SF3} = F_{SF1} + F_{SF2} \quad (16)$$

$$F_{(H_2O)3} = F_{(H_2O)1} + F_{(H_2O)2} \quad (17)$$

$$Q_3 = \frac{F_3}{\rho_{FFresco}} \quad (18)$$

Tras ello, el fango se introduce en los sistemas de centrifugación donde se separa parte de la fracción líquida del sólido. Para hacer los cálculos de esta etapa se fija que el contenido en sólidos totales del lodo deshidratado debe ser del 20% (C_{STDesh}), siendo la eficacia de la centrífuga del 89% ($\eta_{Centrifuga}$). Conocidos estos datos se obtiene el caudal de fango deshidratado (Q_2) mediante la Ecuación 19:

$$Q_3 \cdot C_{ST3} \cdot \eta_{Centrifuga} = Q_4 \cdot C_{STDesh} \quad (19)$$

Una vez conocido el caudal de la corriente se calcula el flujo total de esta (F_2) a partir de la densidad típica del fango deshidratado mediante las Ecuaciones 20 y 21:

$$\rho_{FDeshid} = 1.050 \frac{kg}{m^3} \quad (20)$$

$$F_4 = Q_4 \cdot \rho_{FDesh} \quad (21)$$

El siguiente paso consiste en calcular el flujo de sólidos totales (F_{ST4}). Para ello, se aplica la Ecuación 22. Como en el caso de la corrientes 1 y 2, se calcula el flujo de sólidos volátiles (F_{SV4}), sólidos fijos (F_{SF4}) y flujo de agua ($F_{(H_2O)4}$) (ver Ecuaciones 23-25).

$$F_{ST4} = F_{ST3} \cdot \eta_{Centrifuga} \quad (22)$$

$$F_{SV4} = F_{ST4} \cdot FV \quad (23)$$

$$F_{SF4} = F_{ST4} - F_{SV4} \quad (24)$$

$$F_{(H_2O)4} = F_4 - F_{ST4} \quad (25)$$

De la centrífuga sale otra corriente resultante de la separación entre el sólido y el líquido que, en este caso, está compuesta prácticamente en su totalidad por agua. Mediante la Ecuación 26 se aplica la eficacia de la centrífuga y se obtiene el flujo de sólidos totales (F_{ST5}). Sobre este flujo, como en los casos anteriores, se utiliza la fracción volátil del fango para hallar el flujo de sólidos volátiles (F_{SV5}) y, mediante la diferencia entre ambos flujos, se obtiene el flujo de sólidos fijos (F_{SF4}). Por último, el flujo de agua ($F_{(H_2O)5}$) se determina a partir de la diferencia entre el flujo de agua de entrada a la centrífuga ($F_{(H_2O)3}$) y el flujo de agua contenido en el fango deshidratado ($F_{(H_2O)4}$) (ver Ecuaciones 27-29).

$$F_{ST5} = F_{ST3} \cdot (1 - \eta_{Centrífuga}) \quad (26)$$

$$F_{SV5} = F_{ST5} \cdot FV \quad (27)$$

$$F_{SF5} = F_{ST5} - F_{SV5} \quad (28)$$

$$F_{(H_2O)5} = F_{(H_2O)3} - F_{(H_2O)4} \quad (29)$$

Una vez conocidos el flujo de agua ($F_{(H_2O)5}$) y de sólidos totales (F_{ST5}) se calcula el flujo de rebose que se obtiene a la salida de la centrífuga (F_5) mediante la Ecuación 30:

$$F_5 = F_{ST5} + F_{(H_2O)5} \quad (30)$$

De este modo, ya se conoce el flujo de sólidos totales, sólidos fijos, sólidos volátiles, agua y el flujo de fango total de todas las corrientes que intervienen en el escenario 1 y ya es posible realizar el balance de fósforo en la línea de tratamiento de lodos.

En primer lugar, se transforman los flujos máscicos de agua contenida en las corrientes 1, 2 y 3 en caudales volumétricos (ver Ecuaciones 31-35):

$$Q_{(H_2O)1} = \frac{F_{(H_2O)1}}{\rho_{H_2O}} \quad (31)$$

$$Q_{(H_2O)2} = \frac{F_{(H_2O)2}}{\rho_{H_2O}} \quad (32)$$

$$Q_{(H_2O)3} = \frac{F_{(H_2O)3}}{\rho_{H_2O}} \quad (33)$$

$$Q_{(H_2O)4} = \frac{F_{(H_2O)4}}{\rho_{H_2O}} \quad (34)$$

$$Q_{(H_2O)5} = \frac{F_{(H_2O)5}}{\rho_{H_2O}} \quad (35)$$

Sobre estos caudales se aplican las concentraciones de fósforo total y reactivo de cada uno de los fangos analizados (ver Ecuaciones 36-45) y se obtiene el flujo máscico de fósforo que atraviesa la línea de fangos.

$$F_{PT1} = Q_{(H_2O)1} \cdot C_{PTE1} \quad (36)$$

$$F_{PT2} = Q_{(H_2O)2} \cdot C_{PTE1} \quad (37)$$

$$F_{PT3} = Q_{(H_2O)3} \cdot C_{PTE1} \quad (38)$$

$$F_{PT4} = Q_{(H_2O)4} \cdot C_{PTE1} \quad (39)$$

$$F_{PT5} = Q_{(H_2O)5} \cdot C_{PTE1} \quad (40)$$

$$F_{PR1} = Q_{(H_2O)1} \cdot C_{PRE1} \quad (41)$$

$$F_{PR2} = Q_{(H_2O)2} \cdot C_{PRE1} \quad (42)$$

$$F_{PR3} = Q_{(H_2O)3} \cdot C_{PRE1} \quad (43)$$

$$F_{PR4} = Q_{(H_2O)4} \cdot C_{PRE1} \quad (44)$$

$$F_{PR5} = Q_{(H_2O)5} \cdot C_{PRE1} \quad (45)$$

Con todo ello, se determinan los flujos de fósforo, total y reactivo, que atraviesan la línea de fangos de la EDAR de Tudela.

3.5.2. BALANCES DE FANGO Y FÓSFORO DEL ESCENARIO 2

En este escenario se contempla la instalación de espesadores en la EDAR de Tudela para realizar un pretratamiento sobre el fango fresco que en esta planta se genera. Así, el fango obtenido a la salida del espesador contiene un 4,5% de sólidos totales y el rendimiento del equipo es del 95%. El caudal de fango espesado (Q_2) se calcula mediante la Ecuación 46:

$$Q_1 \cdot C_{ST} \cdot \eta_{Espesador} = Q_2 \cdot C_{STEsp} \quad (46)$$

Una vez conocido el caudal de esta corriente se considera que la densidad del fango espesado es igual a la densidad del fango fresco y, por tanto, a la del agua y se obtiene el flujo de fango espesado (F_2) (ver Ecuaciones 47 y 48):

$$\rho_{FEsp} = \rho_{FFresco} = \rho_{(H_2O)} = 1.000 \frac{kg}{m^3} \quad (47)$$

$$F_2 = Q_2 \cdot \rho_{FEsp} \quad (48)$$

El siguiente paso consiste en calcular el flujo de sólidos totales (F_{ST2}). Para ello, se aplica la Ecuación 49. Como en el caso de la corriente 1, se calcula el flujo de sólidos volátiles (F_{SV2}), sólidos fijos (F_{SF2}) y flujo de agua ($F_{(H_2O)2}$) (ver Ecuaciones 50-52).

$$F_{ST2} = F_{ST1} \cdot \eta_{Espesador} \quad (49)$$

$$F_{SV2} = F_{ST2} \cdot FV \quad (50)$$

$$F_{SF2} = F_{ST2} - F_{SV2} \quad (51)$$

$$F_{(H_2O)2} = F_2 - F_{ST2} \quad (52)$$

Del espesador también sale una corriente formada por agua casi en su totalidad. Para caracterizarla se procede a calcular el flujo de sólidos totales (F_{ST3}) mediante la eficacia del espesador ($\eta_{Espesador}$) (ver Ecuación 53). Tras ello, se aplica la fracción volátil del fango para obtener el flujo de sólidos volátiles (F_{SV3}) (ver Ecuación 54) y, una vez conocido esto, se calculan los flujos de sólidos fijos (F_{SF3}) y de agua ($F_{(H_2O)3}$) mediante las diferencias entre sólidos totales y volátiles y entre flujo total y de sólidos totales, respectivamente (ver Ecuaciones 55 Y 56):

$$F_{ST3} = F_{ST2} \cdot (1 - \eta_{\text{Espesador}}) \quad (53)$$

$$F_{SV3} = F_{ST3} \cdot FV \quad (54)$$

$$F_{SF3} = F_{ST3} - F_{SV3} \quad (55)$$

$$F_{(H_2O)3} = F_{(H_2O)1} - F_{(H_2O)2} \quad (56)$$

Posteriormente, se calculan el caudal y el flujo total de fango de esta corriente (Q_3 y F_3) a partir de la suma entre los flujos de agua y sólidos totales y la densidad del agua (ver Ecuaciones 57-59):

$$F_3 = F_{ST3} + F_{(H_2O)3} \quad (57)$$

$$\rho_{H_2O} = 1.000 \frac{kg}{m^3} \quad (58)$$

$$Q_3 = \frac{F_3}{\rho_{H_2O}} \quad (59)$$

Por otro lado, se calcula el caudal volumétrico de fango que proporciona cada una de las EDARs incluidas en el Escenario 2 (Q_4). Debido a que hay fangos que pueden ser deshidratados en origen se aplica la densidad típica de un fango deshidratado en estos casos y la densidad del fango fresco en el resto de los fangos (ver Ecuaciones 60-62).

$$\rho_{FFresco} = 1.000 \frac{kg}{m^3} \quad (60)$$

$$\rho_{FDesh} = 1.050 \frac{kg}{m^3} \quad (61)$$

$$Q_4 = \frac{F_4}{\rho_{FFresco}/\rho_{FDesh}} \quad (62)$$

Tras ello, se calcula el flujo de sólidos totales (F_{ST4}) a partir de la concentración de estos sólidos (C_{ST4}) y, una vez conocido este dato, se determinan los flujos de sólidos volátiles, sólidos fijos y agua (F_{SV4} , F_{SF4} y $F_{(H_2O)4}$) (ver Ecuaciones 63-66).

$$F_{ST4} = Q_4 \cdot C_{ST4} \quad (63)$$

$$F_{SV4} = F_{ST4} \cdot FV_4 \quad (64)$$

$$F_{SF4} = F_{ST4} - F_{SV4} \quad (65)$$

$$F_{(H_2O)4} = F_4 - F_{ST4} \quad (66)$$

Las corrientes 2 y 4 se mezclan en un depósito de almacenamiento. Por tanto, la corriente 5 está compuesta por la suma de ambas corrientes y aunque presenta una concentración de sólidos mayor se mantiene la consideración de igualdad entre las densidades del fango fresco y del agua (ver Ecuaciones 67-72):

$$F_5 = F_2 + F_4 \quad (67)$$

$$F_{ST5} = F_{ST2} + F_{ST4} \quad (68)$$

$$F_{SV5} = F_{SV2} + F_{SV4} \quad (69)$$

$$F_{SF5} = F_{SF2} + F_{SF4} \quad (70)$$

$$F_{(H_2O)5} = F_{(H_2O)2} + F_{(H_2O)4} \quad (71)$$

$$Q_5 = \frac{F_5}{\rho_{FFresco}} \quad (72)$$

La siguiente etapa consiste en la digestión anaerobia termófila de la corriente resultante. En esta se estima un rendimiento de eliminación de sólidos volátiles del 40% ($\eta_{Digestor}$), por lo que el flujo de salida del digestor de sólidos volátiles se calcula a partir de la Ecuación 73. Por otro lado, el flujo de sólidos fijos y el flujo de agua no presentan variaciones en el digestor, por tanto, es posible calcular el flujo de sólidos totales (F_{ST6}) y el flujo de fango digerido (F_6) a partir de las Ecuaciones 74 y 75:

$$F_{SV6} = F_{SV5} \cdot (1 - \eta_{Digestor}) \quad (73)$$

$$F_{ST6} = F_{SV6} + F_{SF5} \quad (74)$$

$$F_6 = F_{ST6} + F_{(H_2O)5} \quad (75)$$

El caudal volumétrico de esta corriente (Q_6) se calcula a partir de la densidad típica del fango digerido (ver Ecuaciones 76 y 77):

$$\rho_{FDigerido} = 1.000 \frac{kg}{m^3} \quad (76)$$

$$Q_6 = \frac{F_6}{\rho_{FDigerido}} \quad (77)$$

Por otro lado, en la digestión anaerobia termófila se produce biogás procedente de la materia volátil eliminada por los microorganismos. El flujo de sólidos volátiles eliminados (F_{SVElim}) se calcula a partir de la Ecuación 78:

$$F_{SVElim} = F_{SV5} \cdot \eta_{Digestor} \quad (78)$$

Por cada kilogramo consumido de materia volátil se eliminan 1,7 kilogramos de DQO y, a partir de esta reducción de DQO se generan 0,35 Nm³ de CH₄. Además, la composición típica de CH₄ contenido en el biogás es del 65% en volumen. Por último, las densidades del CH₄ y del biogás son 0,66 y 1,2 kg/m³, respectivamente. Con todo ello, es posible calcular los flujos de CH₄ y biogás producidos en la digestión anaerobia termófila propuesta en el Escenario 2 (ver Ecuaciones 79-85):

$$F_{DQOElim} = 1,7 \cdot F_{SVElim} \quad (79)$$

$$Q_{CH_4} = 0,35 \cdot F_{DQOElim} \quad (80)$$

$$\rho_{CH_4} = 0,66 \frac{kg}{m^3} \quad (81)$$

$$F_{CH_4} = Q_{CH_4} \cdot \rho_{CH_4} \quad (82)$$

$$Q_{Biogás} = 0,65 \cdot Q_{CH_4} \quad (83)$$

$$\rho_{Biogás} = 1,2 \frac{kg}{m^3} \quad (84)$$

$$F_{Biogás} = Q_{Biogás} \cdot \rho_{Biogás} \quad (85)$$

Tras su paso por la etapa de digestión anaerobia, el fango digerido se introduce en los sistemas de centrifugación donde se separa parte de la fracción líquida del sólido. Para hacer los cálculos de esta etapa se fija que el contenido en sólidos totales del lodo deshidratado debe ser del 20% (C_{STDesh}), siendo la

eficacia de la centrífuga del 89% ($\eta_{Centrifuga}$). Conocidos estos datos se obtiene el caudal de fango deshidratado (Q_8) mediante la Ecuación 86:

$$F_{ST6} \cdot \eta_{Centrifuga} = Q_8 \cdot C_{STDesh} \quad (86)$$

Una vez conocido el caudal de la corriente se calcula el flujo total de esta (F_8) a partir de la densidad típica del fango deshidratado mediante las Ecuaciones 87 y 88:

$$\rho_{FDesh} = 1.050 \frac{kg}{m^3} \quad (87)$$

$$F_8 = Q_8 \cdot \rho_{FDesh} \quad (88)$$

El siguiente paso consiste en calcular el flujo de sólidos totales (F_{ST8}) (ver Ecuación 89). Tras ello, se calcula el flujo de sólidos volátiles (F_{SV8}), sólidos fijos (F_{SF8}) y flujo de agua ($F_{(H_2O)8}$) (ver Ecuaciones 90-92).

$$F_{ST8} = F_{ST6} \cdot \eta_{Centrifuga} \quad (89)$$

$$F_{SV8} = F_{SV6} \cdot \eta_{Centrifuga} \quad (90)$$

$$F_{SF8} = F_{ST8} - F_{SV8} \quad (91)$$

$$F_{(H_2O)8} = F_8 - F_{ST8} \quad (92)$$

Por otro lado, de la centrífuga sale otra corriente formada por el sobrenadante obtenido en esta etapa. Como en el caso de la corriente de fango deshidratado se calculan los flujos que la caracterizan, pero en este caso se aplica la diferencia entre el rendimiento de la centrífuga y la separación de sólidos totales (ver Ecuaciones 93-96). Posteriormente, se calcula el flujo total de la corriente mediante la Ecuación 97:

$$F_{ST9} = F_{ST6} \cdot (1 - \eta_{Centrifuga}) \quad (93)$$

$$F_{SV9} = F_{SV6} \cdot (1 - \eta_{Centrifuga}) \quad (94)$$

$$F_{SF9} = F_{ST9} - F_{SV9} \quad (95)$$

$$F_{(H_2O)9} = F_{(H_2O)6} - F_{(H_2O)8} \quad (96)$$

$$F_9 = F_{ST9} + F_{(H_2O)9} \quad (97)$$

Tras ello, los reboses obtenidos en la centrífuga y en el espesador se mezclan, siendo esta la corriente final de la línea de fangos (ver Ecuaciones 98-103):

$$F_{10} = F_9 + F_3 \quad (98)$$

$$F_{ST10} = F_{ST9} + F_{ST3} \quad (99)$$

$$F_{SV10} = F_{SV9} + F_{SV3} \quad (100)$$

$$F_{SF10} = F_{ST10} - F_{SV10} \quad (101)$$

$$F_{(H_2O)10} = F_{10} - F_{ST10} \quad (102)$$

$$Q_{10} = \frac{F_{10}}{\rho_{H_2O}} \quad (103)$$

Con todo ello, ya están totalmente caracterizadas todas las corrientes de la línea de fangos del Escenario 2. De este modo, se procede a llevar a cabo el balance de fósforo. En primer lugar, se calcula el caudal de agua contenida en cada corriente (ver Ecuaciones 104-112):

$$Q_{(H_2O)1} = \frac{F_{(H_2O)1}}{\rho_{H_2O}} \quad (104)$$

$$Q_{(H_2O)2} = \frac{F_{(H_2O)2}}{\rho_{H_2O}} \quad (105)$$

$$Q_{(H_2O)3} = \frac{F_{(H_2O)3}}{\rho_{H_2O}} \quad (106)$$

$$Q_{(H_2O)4} = \frac{F_{(H_2O)4}}{\rho_{H_2O}} \quad (107)$$

$$Q_{(H_2O)5} = \frac{F_{(H_2O)5}}{\rho_{H_2O}} \quad (108)$$

$$Q_{(H_2O)6} = \frac{F_{(H_2O)6}}{\rho_{H_2O}} \quad (109)$$

$$Q_{(H_2O)8} = \frac{F_{(H_2O)8}}{\rho_{H_2O}} \quad (110)$$

$$Q_{(H_2O)9} = \frac{F_{(H_2O)9}}{\rho_{H_2O}} \quad (111)$$

$$Q_{(H_2O)10} = \frac{F_{(H_2O)10}}{\rho_{H_2O}} \quad (112)$$

Finalmente, sobre los caudales de agua se aplican las concentraciones de fósforo, total y reactivo, tanto del fango fresco como del fango digerido. De este modo, se obtienen los flujos de fósforo que atraviesan la línea de fangos de la EDAR de Tudela (ver Ecuaciones 113-132):

$$F_{PT1} = Q_{(H_2O)1} \cdot C_{PT_{E2}} \quad (113)$$

$$F_{PT2} = Q_{(H_2O)2} \cdot C_{PT_{E2}} \quad (114)$$

$$F_{PT3} = Q_{(H_2O)3} \cdot C_{PT_{E2}} \quad (115)$$

$$F_{PT4} = Q_{(H_2O)4} \cdot C_{PT_{E2}} \quad (116)$$

$$F_{PT5} = Q_{(H_2O)5} \cdot C_{PT_{E2}} \quad (117)$$

$$F_{PT6} = Q_{(H_2O)6} \cdot C_{PT_{E2}} \cdot f_{PT} \quad (118)$$

$$F_{PT8} = Q_{(H_2O)8} \cdot C_{PT_{E2}} \cdot f_{PT} \quad (119)$$

$$F_{PT9} = Q_{(H_2O)9} \cdot C_{PT_{E2}} \cdot f_{PT} \quad (120)$$

$$F_{PT10} = F_{PT9} + F_{PT3} \quad (121)$$

$$F_{PR1} = Q_{(H_2O)1} \cdot C_{PR_{E2}} \quad (122)$$

$$F_{PR2} = Q_{(H_2O)2} \cdot C_{PR_{E2}} \quad (123)$$

$$F_{PR3} = Q_{(H_2O)3} \cdot C_{PR_{E2}} \quad (124)$$

$$F_{PR4} = Q_{(H_2O)4} \cdot C_{PR_{E2}} \quad (125)$$

$$F_{PR5} = Q_{(H_2O)5} \cdot C_{PR_{E2}} \quad (126)$$

$$F_{PR6} = Q_{(H_2O)6} \cdot C_{PR_{E2}} \cdot f_{PR} \quad (127)$$

$$F_{PR8} = Q_{(H_2O)8} \cdot C_{PR_{E2}} \cdot f_{PR} \quad (128)$$

$$F_{PR9} = Q_{(H_2O)9} \cdot C_{PR_{E2}} \cdot f_{PR} \quad (129)$$

$$F_{PR10} = F_{PR9} + F_{PR3} \quad (130)$$

3.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS

El análisis estadístico de los datos obtenidos se realiza en el programa Minitab 19. En primer lugar, se realiza el análisis descriptivo donde se incluye la media, la desviación estándar, el coeficiente de variación y el número de muestras analizadas. Tras ello, se lleva a cabo una prueba de Grubbs de valores atípicos con un nivel de significancia de 0,05 para comprobar que los datos referentes a cada fango pertenecen a la misma distribución normal. El siguiente paso consiste en comprobar que los datos obtenidos presentan una distribución normal. Para ello, se realiza la prueba de normalidad de Shapiro-Wilks. Con todo ello, si se cumplen los requisitos y se han detectado valores atípicos se vuelve a realizar el análisis descriptivo inicial.

Por otro lado, se realiza un ensayo en el que se debe determinar si existen diferencias entre los estadios inicial y final de la muestra. Para ello, se repiten todos los pasos descritos hasta este momento y se realiza una prueba de varianzas iguales con un 95% de confianza para confirmar que los datos pueden ser sometidos a una prueba ANOVA. Si no es posible asumir varianzas iguales se realiza una prueba de Welch.

3.7. INDICADORES ECONÓMICOS Y AMBIENTALES

Para determinar cuál de los escenarios es más rentable en términos económicos se plantean los siguientes indicadores:

- Costes del transporte de fangos. Este indicador consiste en el coste en euros de transportar fango generado en una EDAR para ser tratado en otra instalación diferente. Para ello, se considera un precio medio de 5,85 € por metro cúbico de fango transportado y para su cálculo se aplica la Ecuación 133:

$$Coste_{Transporte} = Precio_{Transporte} \cdot Q_{Fango} \quad (133)$$

- Costes de operación. Los costes de operación consisten en la cuantificación del coste monetario que implica el gasto en electricidad producido para llevar a cabo la operación de la planta. Para ello, se parte del consumo eléctrico de la planta en ambos escenarios y a partir de la cantidad de energía contenida en el biogás producido se calcula el ahorro monetario que se da en el Escenario 2 asumiendo un precio de la electricidad de 0,11 €/kWh (ver Ecuaciones 134 y 135).

$$Producción\ Elec. = 2,2 \frac{kWh}{m^3\ biogás} \cdot Q_{Biogás} \quad (134)$$

$$Coste_{Elec.} = Precio_{Elec.} \cdot (Consumo\ Elec. - Producción\ Elec.) \quad (135)$$

Por otro lado, con el objetivo de definir el escenario más provechoso en términos ambientales se utilizan los siguientes indicadores:

- Cantidad de fósforo disponible para la recuperación por tonelada de fango tratado. Este indicador consiste en conocer los gramos de fósforo que se dan en el rebose final de la línea de fangos de la EDAR por cada tonelada de fango tratado.
- Reducción de la concentración del efluente de la EDAR. El rebose obtenido de la deshidratación y, en el caso del Escenario 2, del espesamiento del fango se dirige a cabecera de planta. De este modo, mediante este indicador se pretende evaluar la influencia de la cantidad de fango tratado en la EDAR sobre el efluente final de la línea de aguas de la EDAR de Tudela (aproximadamente 20.000 m³/d). Para ello, se calcula la cantidad de fósforo reactivo que abandona la planta actualmente y en el futuro y qué reducción cabría esperar si se recupera mediante precipitación el 90% de los ortofosfatos contenidos en la corriente recirculada. En primer lugar, se calcula mediante la Ecuación 136 la cantidad de fósforo reactivo que sale de la EDAR de Tudela en la actualidad, para ello se aplica que la concentración de salida es de 6,4 mg PO₄³⁻/L. Tras ello, se calcula el fósforo que puede precipitar en el rebose antes de ser devuelto a planta (ver Ecuación 137) y, con este dato, se calcula la cantidad de fósforo (y concentración) del efluente de la EDAR si este fósforo es retirado con anterioridad (ver Ecuaciones 138 y 139). Finalmente, mediante la Ecuación 140 se calcula el rendimiento de reducción.

$$F_{PRSalida} = Q_{Salida} \cdot C_{PRSalida} \quad (136)$$

$$F_{PRPrecipitado} = 0,9 \cdot F_{PR} \quad (137)$$

$$F_{PRSalidaE1/E2} = F_{PRSalida} - F_{PRPrecipitado} \quad (138)$$

$$C_{PRE1/E2} = \frac{F_{PRSalida}}{Q_{Salida}} \quad (139)$$

$$\eta_{Reducción} = \frac{C_{PRSalida} - C_{PRE1/E2}}{C_{PRSalida}} \quad (140)$$

🌈 Cantidad de CO₂ equivalente emitido por el transporte de fangos. Del mismo modo que con el coste del transporte, este indicador consiste en calcular la cantidad de CO₂ equivalente emitido por los camiones que realizan el transporte de los fangos entre instalaciones. Para ello, se aplica un consumo de diésel por kilómetro y tonelada de fango transportada de 0,037 (dato proporcionado por Ecoinvent) y una producción de CO₂ equivalente de 3.620 g/kg diésel (dato proporcionado por Ecoinvent y JRC). Por tanto, se calcula el kilometraje asociado a cada EDAR y la cantidad de fango transportado y se calcula el consumo de combustible (ver Ecuación 141). Tras ello, se halla la cantidad de CO₂ equivalente derivado del transporte de fangos a partir de la Ecuación 142:

$$Consumo\ Diésel = 0,037 \frac{kg\ diésel}{km \cdot Tm\ fango} \cdot Kilometraje \cdot F_{Fango} \quad (141)$$

$$F_{CO2eq} = 3.620 \frac{g}{kg\ diésel} \cdot Consumo\ Diésel \quad (142)$$

🌈 Cantidad de CO₂ equivalente emitido por el consumo energético de la EDAR. Este indicador consiste en conocer la cantidad de CO₂ equivalente emitido por el consumo eléctrico de la planta. Para ello, se parte de los consumos de ambos escenarios y la producción de electricidad generada a partir del biogás. Tras ello, se aplica un factor de conversión IPCC de 0,38 Tm CO₂ equivalente/kWh y se calcula el flujo de CO₂ equivalente (ver Ecuación 143):

$$F_{CO2eq} = 0,38 \frac{Tm\ CO_2\ equivalente}{kWh} \cdot (Consumo - Producción\ Elec.) \quad (143)$$

Los datos proporcionados por Ecoinvent y JRC han sido recopilados por el Centro Nacional de Energías Renovables (CENER) y se contemplan dentro de un estudio cuyo objetivo consiste en analizar las posibilidades del biogás generado.

4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL, RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

4.1. ENSAYOS A ESCALA LABORATORIO Y PILOTO

4.1.1. ENSAYOS DE CALENTAMIENTO DE FANGO

Los ensayos de calentamiento de fango realizados consisten en la reproducción de las condiciones de entrada del fango en el digestor anaerobio termófilo (a excepción de la ausencia de oxígeno) para evidenciar si se produce la liberación de ciertos compuestos con el aumento de temperatura y comprobar si el tipo de fango y el tiempo de almacenamiento influyen sobre esta variación. Para ello, se toman 200 mL de muestra de fango y se calientan durante 30 minutos a 55 °C, temperatura a la cual se destruye la pared celular de los microorganismos y razón por la que se espera un incremento del fósforo disponible en el fango.

Las muestras analizadas con este propósito son el fango fresco obtenido directamente de un filtro percolador (n=3), el fango procedente de un decantador primario (n=5), el fango de alimentación de la planta piloto (n=5) y el fango digerido en el digestor anaerobio termófilo (n=5), todas ellas analizadas antes y después del calentamiento.

El fango fresco recogido del filtro percolador se corresponde con la fase inicial del fango, ya que este está compuesto principalmente por la biopelícula formada sobre la superficie del relleno del filtro. En cambio, el fango fresco del decantador está constituido por la mezcla de fango primario y secundario almacenado

en la decantación. De este modo, el fango fresco del decantador presenta edades de fango más avanzadas y, por tanto, sobre este ya se dan procesos de hidrólisis. Tal y como se menciona en el apartado 3.2., el fango de alimentación se almacena en un tanque previo a los digestores donde es sometido a una etapa previa de hidrólisis. Por último, el fango procedente del digestor anaerobio termófilo se corresponde a un fango ya digerido.

Para llevar a cabo el análisis las muestras de fango se recogen en botes de plástico de 250 mL, se centrifugan y se separa de forma manual el sobrenadante, siendo este líquido el que conforma la muestra a analizar. Los resultados obtenidos son los que se muestran en las Figuras 6-10 y los resultados del análisis estadístico se presentan en el Anexo II.

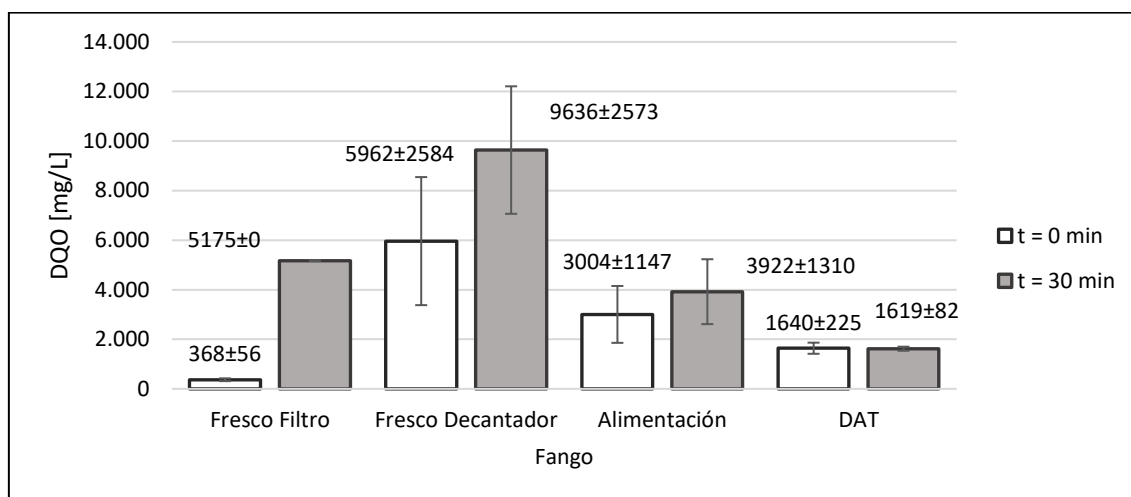


Figura 6. DQO decantada en función del tipo de fango analizado y el tiempo de calentamiento.

Como se puede observar en la Figura 6, la DQO decantada aumenta considerablemente en el fango fresco procedente del filtro percolador (p-valor=0,000). En cambio, en los casos del fango fresco del decantador y de alimentación el aumento es menor y no es posible confirmar cambios significativos en la concentración de materia orgánica. Por último, en el fango digerido no se detectan diferencias tras realizar el calentamiento del fango. Este comportamiento puede deberse a que en fango fresco sí se produce la ruptura celular y consiguiente liberación de materia orgánica, mientras que en fangos almacenados durante cierto tiempo esta liberación ya se ha realizado debido a la hidrólisis del fango en el propio depósito [22].

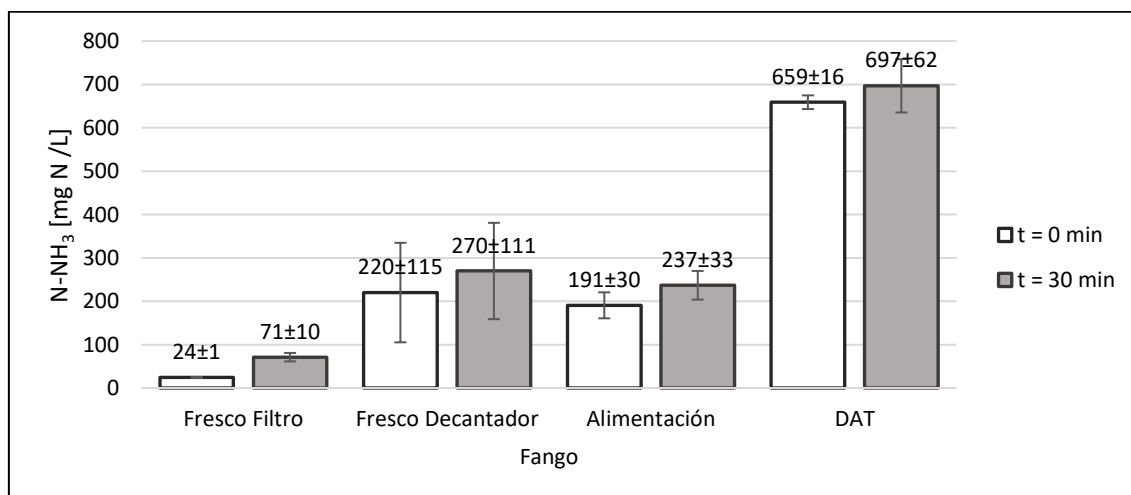


Figura 7. Concentración de nitrógeno amoniacal en función del tipo de fango analizado y el tiempo de calentamiento.

En el caso del nitrógeno amoniacal (ver Figura 7) se observa un comportamiento similar en el fango fresco procedente del filtro percolador (p -valor=0,014) mientras que, en el resto de los fangos, aunque se percibe cierta liberación de nitrógeno, no es destacable.

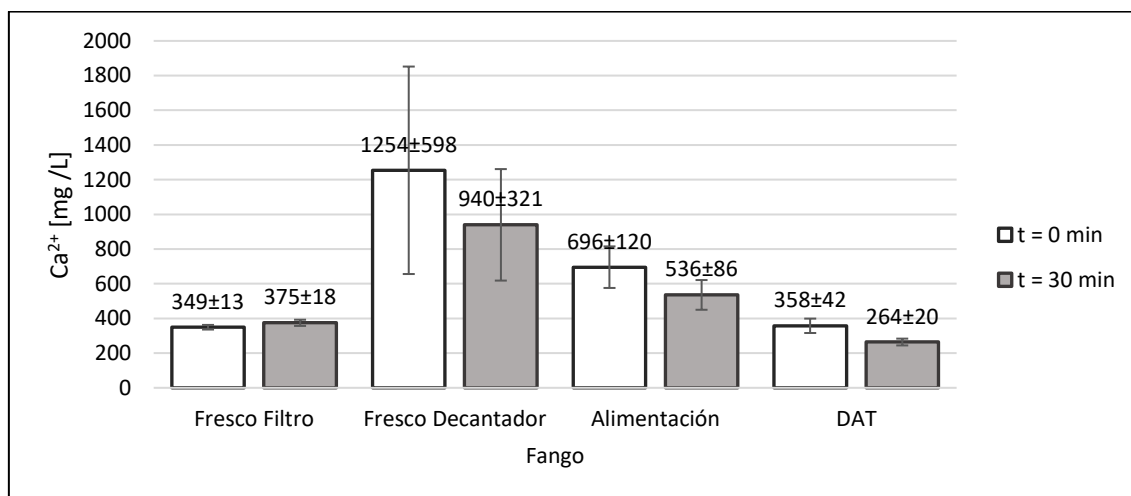


Figura 8. Concentración de calcio en función del tipo de fango analizado y el tiempo de calentamiento.

Tal y como se puede observar en la Figura 8, el calcio se comporta de forma diferente a los 2 parámetros estudiados hasta el momento. Para el fango fresco, tanto el procedente del filtro como el correspondiente al decantador primario, no se detectan diferencias antes y después del calentamiento debido, posiblemente, a la alta variabilidad de los datos. En cambio, en el fango del tanque de carga y en el fango digerido sí existe una disminución significativa de la concentración de calcio (p -valor=0,041 y p -valor=0,002, respectivamente). Esto puede deberse a que los fangos frescos presentan pHs inferiores a 7,5, mientras que el fango de alimentación y el fango digerido tienen un pH superior, por lo que suponen un medio más favorable para la precipitación química del calcio [6].

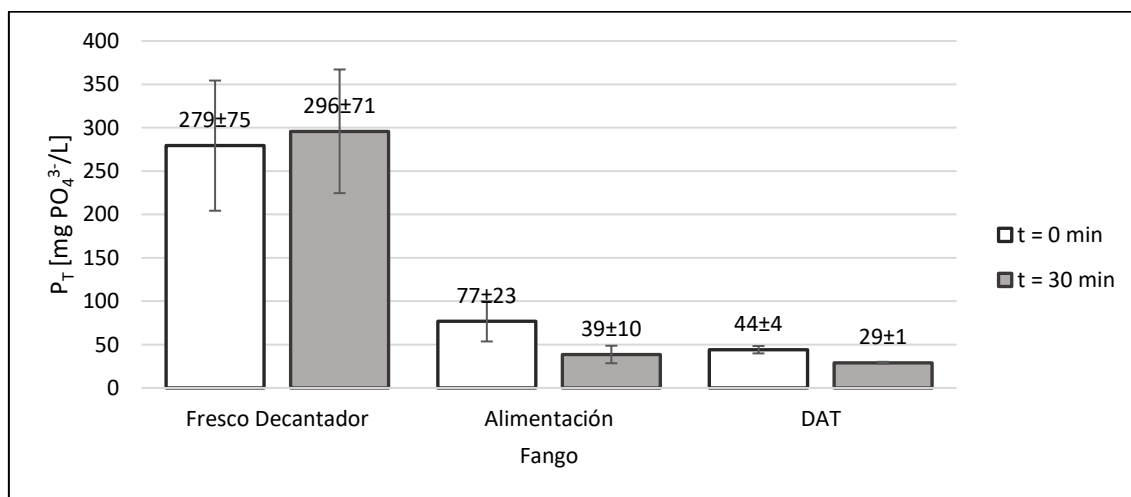


Figura 9. Concentración de fósforo total en función del tipo de fango analizado y el tiempo de calentamiento.

Por otro lado, se analiza el fósforo total del fango fresco del decantador, del fango de alimentación y del fango digerido en la planta piloto de digestión anaerobia (ver Figura 9). En el primer caso no se detecta ninguna variación en la concentración de fósforo. En cambio, en los fangos de alimentación y digerido se observa una disminución provocada por el calentamiento de la muestra (p -valor=0,01 y p -valor=0,001, respectivamente).

Del mismo modo que en el caso del calcio, la reducción en la cantidad de fósforo total puede deberse a que durante el calentamiento se alcance un pH favorable para la formación de complejos de fósforo que en el caso del fango fresco del decantador no se forman. Además, se analiza el fósforo reactivo presente en el fango fresco procedente del filtro, en el fango del decantador, en el fango de alimentación y en el fango digerido.

Como se puede observar en la Figura 10, para estos 3 últimos sucede algo similar al caso del fósforo total. En cambio, en el fango fresco originado en el filtro percolador se produce un aumento importante de la concentración de ortofosfatos (p -valor=0,000). Como ocurre con la materia orgánica, la ruptura de la pared celular de los microorganismos presentes en el fango provoca la liberación de los nutrientes presentes en su interior [22].

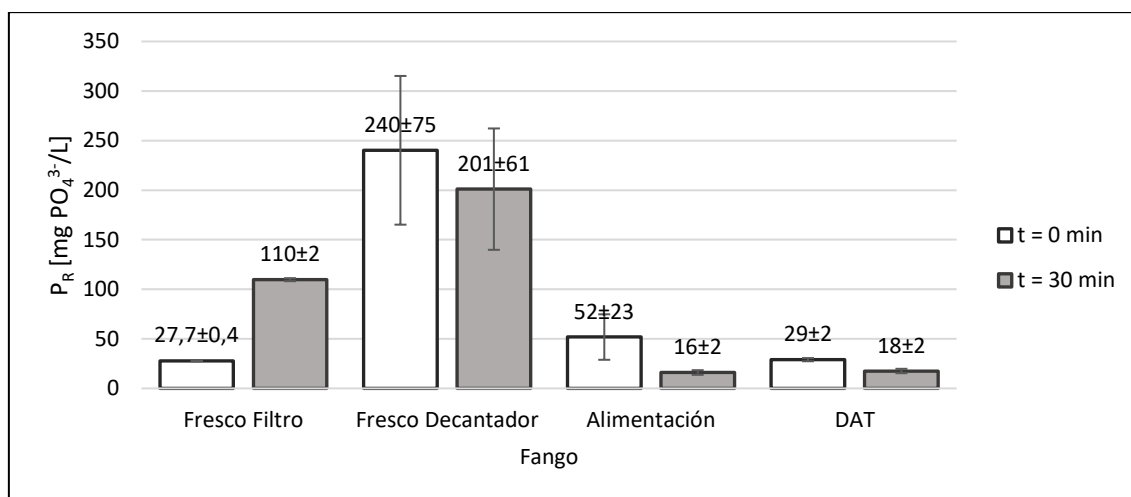


Figura 10. Concentración de fósforo reactivo en función del tipo de fango analizado y el tiempo de calentamiento.

Además, se ha realizado el análisis temporal de la liberación de materia orgánica y nutrientes mediante la toma de muestras tras permanecer a la temperatura indicada (55 °C) durante 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15 y 30 minutos. Este ensayo se lleva a cabo para comprobar si las variaciones detectadas son constantes en el tiempo o si por el contrario existe una evolución en la concentración de los parámetros físico-químicos analizados. En este caso, únicamente se analiza el fango fresco obtenido directamente de un filtro percolador y los parámetros examinados son la DQO filtrada, el nitrógeno amoniacal, el calcio, el fósforo reactivo, el magnesio y el pH. Los resultados obtenidos son los que se muestran en las Figuras 11-16:

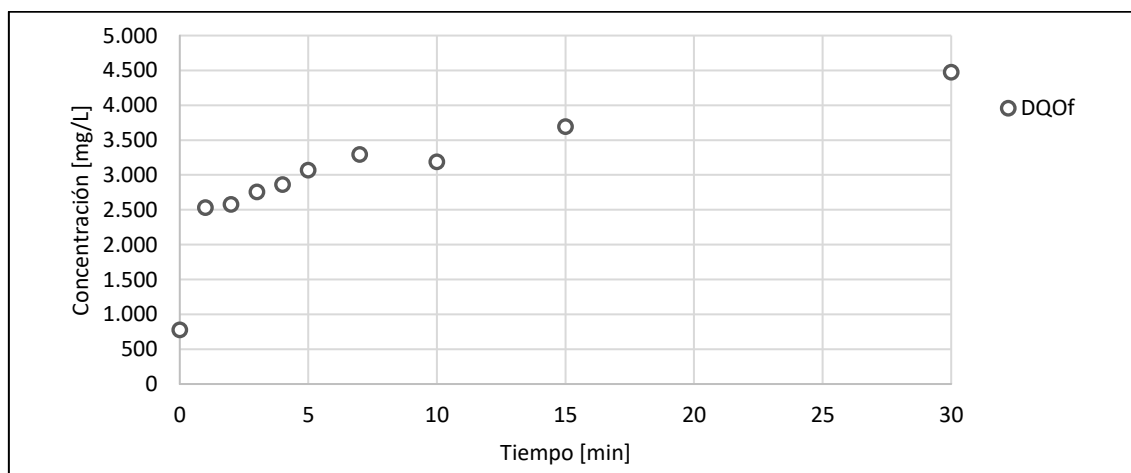


Figura 11. Evolución temporal de la concentración de materia orgánica (DQO filtrada) durante el calentamiento del fango fresco obtenido directamente de un filtro percolador.

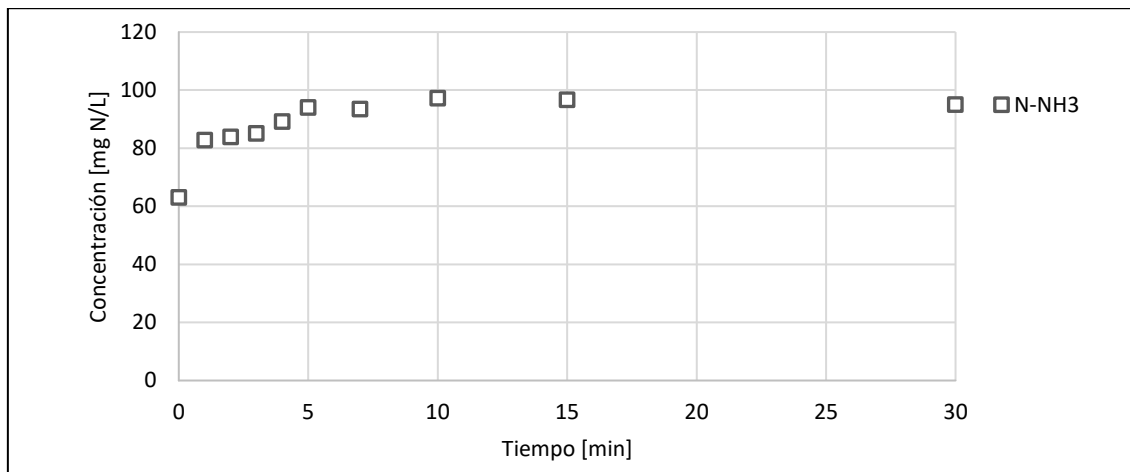


Figura 12. Evolución temporal de la concentración de nitrógeno amoniacal durante el calentamiento del fango fresco obtenido directamente de un filtro percolador.

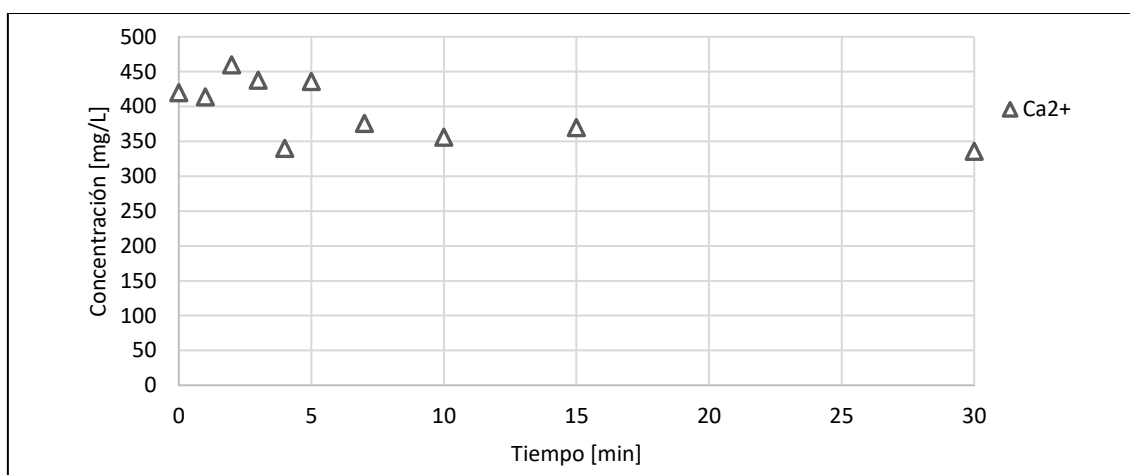


Figura 13. Evolución temporal de la concentración de calcio durante el calentamiento del fango fresco obtenido directamente de un filtro percolador.

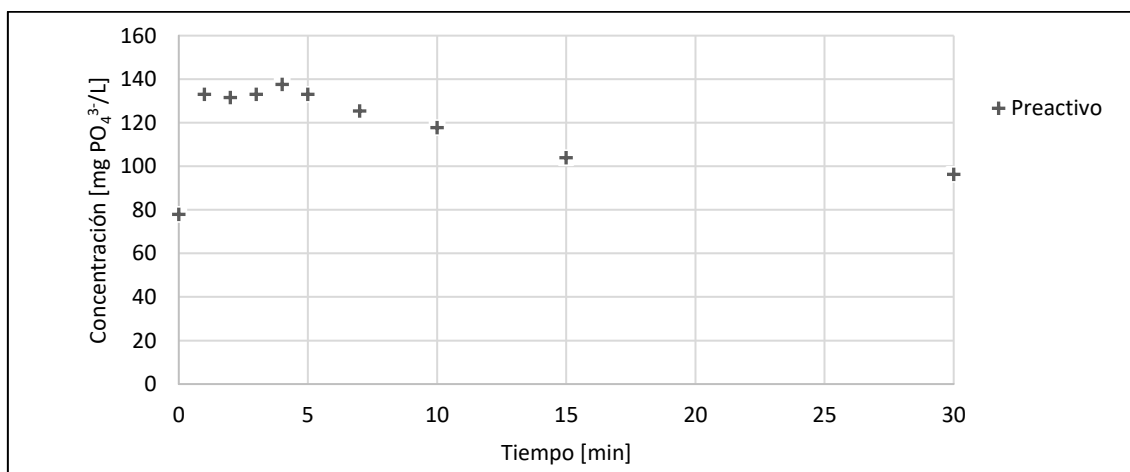


Figura 14. Evolución temporal de la concentración de fósforo reactivo durante el calentamiento del fango fresco obtenido directamente de un filtro percolador.

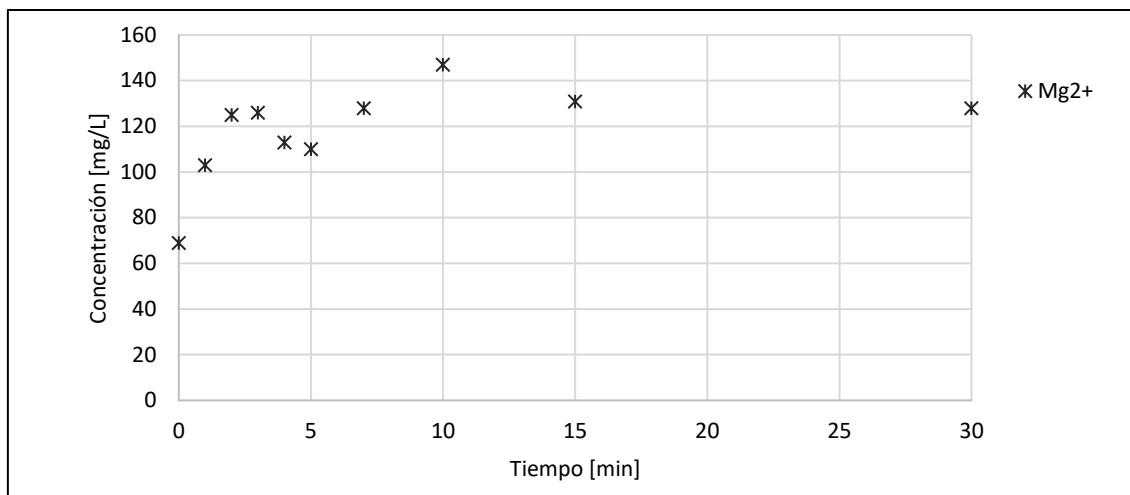


Figura 15. Evolución temporal de la concentración de magnesio durante el calentamiento del fango fresco obtenido directamente de un filtro percolador.

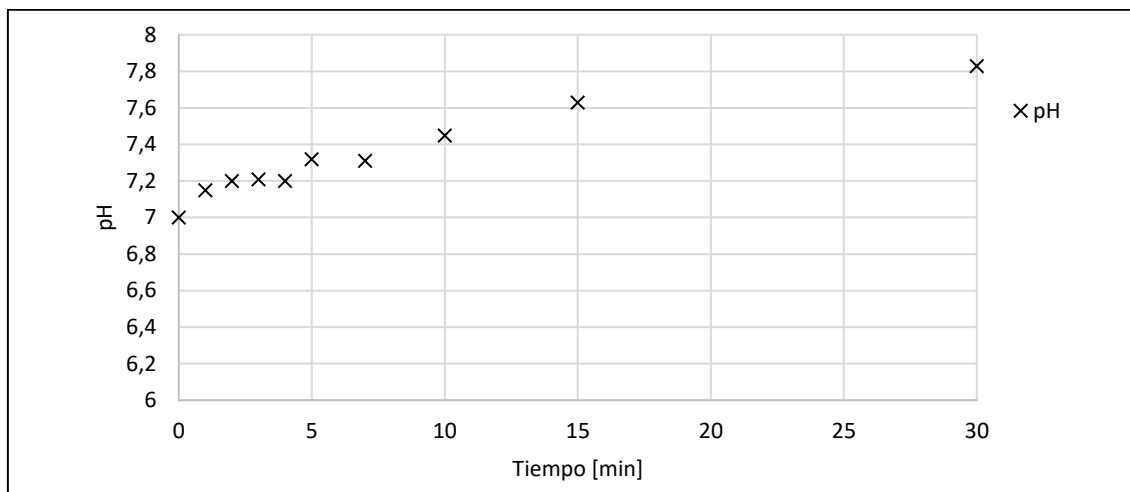


Figura 16. Evolución temporal del pH durante el calentamiento del fango fresco obtenido directamente de un filtro percolador.

Como se puede observar en las Figuras 11-16, todos los parámetros, a excepción del calcio y el pH, presentan un aumento brusco durante el primer minuto en el que la muestra se encuentra a 55 °C, razón por la que se refuerza la idea de la liberación de materia orgánica y nutrientes en el momento en que se rompe la pared celular de los microorganismos presentes en el fango. Tras ello, la DQO sigue aumentando, mientras que el nitrógeno amoniacal y el magnesio tienden a estabilizarse y el fósforo reactivo disminuye hasta que, del mismo modo, se estabiliza. Por su parte, el calcio disminuye ligeramente y el pH aumenta de forma lineal durante todo el intervalo.

Por lo tanto, aunque debería producirse un aumento de concentración en el caso del fósforo reactivo al igual que ocurre en los casos de la DQO filtrada y el nitrógeno amoniacal, debido a las condiciones de pH y la disminución de la concentración de calcio se deduce que el fósforo reactivo contenido en la muestra disminuye por precipitación.

De este modo, tras la realización de los ensayos de calentamiento se observa, por un lado, que es importante conocer la temporalidad del fango porque esta influye en la liberación posterior de fósforo y, por el otro lado, que el pH al que se encuentre el fango interviene en la precipitación de compuestos de fósforo y calcio.

4.1.2. ENSAYOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TERMÓFILA

A continuación, se analiza a escala piloto la relación entre el fango fresco de alimentación y el fango digerido en un digestor anaerobio termófilo para conocer la evolución de los compuestos físico-químicos de interés tras someter el fango al proceso de digestión. En este caso, el fango utilizado es generado en la EDAR de Tudela. Además, se pretende estimar la relación numérica entre el fósforo de entrada y salida para aplicarla en los balances de fósforo posteriores. Para ello, se analiza la DQO decantada, el nitrógeno amoniacal, el calcio, el fósforo total y el fósforo reactivo del rebose obtenido en la centrifugación del fango en laboratorio antes y después de ser sometido al proceso de digestión anaerobia termófila. Los resultados obtenidos son los que se muestran en las Figuras 17 y 18.

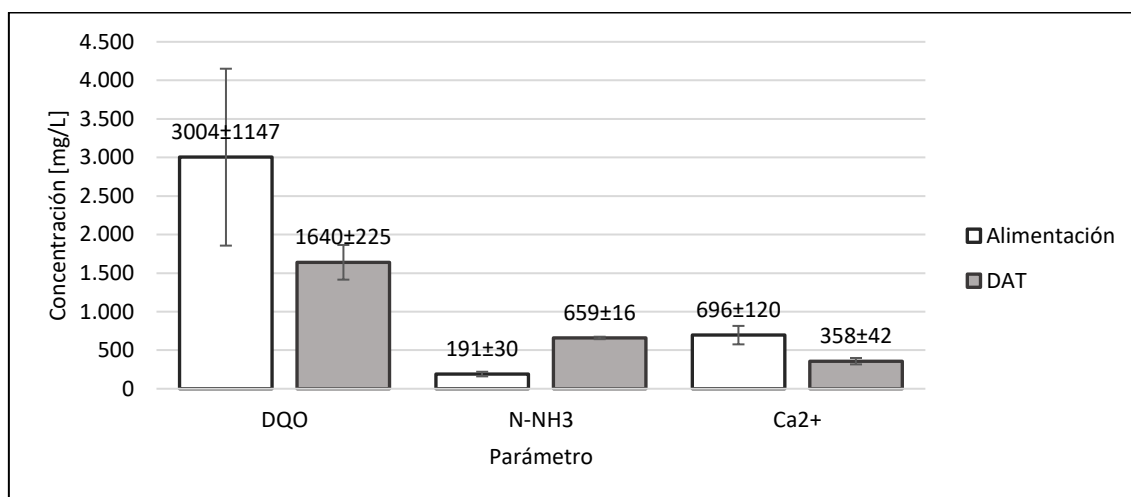


Figura 17. DQO decantada, nitrógeno amoniacal y calcio en el fango antes y después de su paso por el digestor anaerobio termófilo (DAT).

En este caso (ver Figura 17), la DQO decantada se reduce a su paso por el digestor anaerobio termófilo y aunque debido a la elevada variabilidad de los datos obtenidos del fango de alimentación (asociados a los cambios en el tiempo de almacenamiento) no es posible confirmarlo estadísticamente se conoce que la cantidad de biogás producido es proporcional a la DQO eliminada, por lo que se entiende que esta se reduce tal y como demuestran los promedios expuestos en la Figura 17. En concreto, la experimentación de los últimos años en la planta piloto de la EDAR de Tudela se genera 1 m³ de biogás por cada kilogramo de sólido volátil eliminado. Por otro lado, el nitrógeno amoniacal aumenta considerablemente en el fango digerido (p-valor=0,000), mientras que el calcio disminuye (p-valor=0,000). De este modo y una vez conocidos los resultados del ensayo expuesto en el apartado 4.1.1. es posible que la liberación de nitrógeno amoniacal produzca el aumento del pH y este provoque la precipitación del calcio contenido en el fango.

En la Figura 18 se observa que el fósforo total presente en el fango de alimentación y su relación con el fango digerido se observa que existe una reducción en su contenido a su paso por el digestor (p-valor=0,033). Por otro lado, también parece observarse la disminución de fósforo reactivo en valores promedio. Como en los ensayos de calentamiento, la reducción de la concentración de fósforo viene acompañada por la disminución de la concentración de calcio, por lo que se deduce que existe precipitación en el proceso de digestión anaerobia termófila.

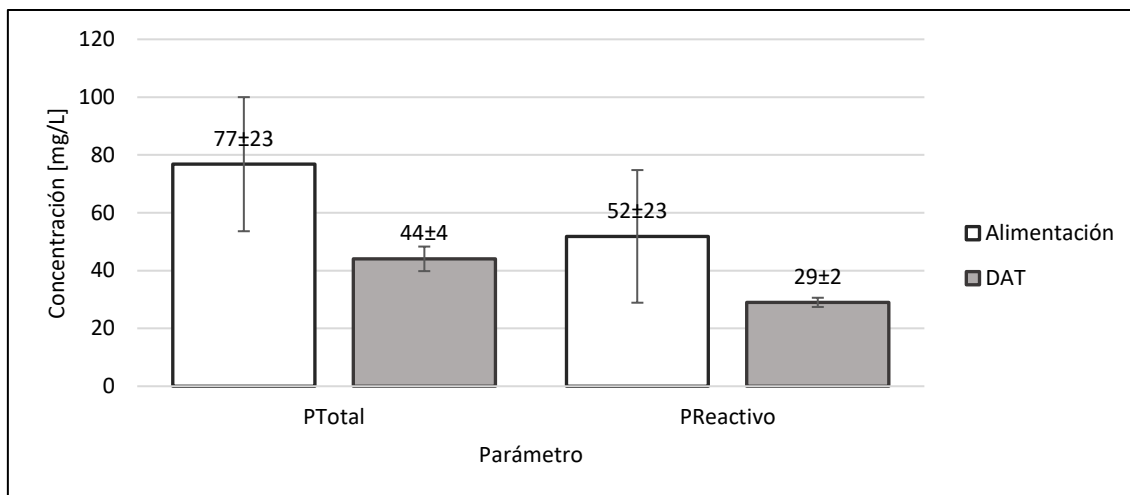


Figura 18. Concentración de fósforo total y reactivo en el fango antes y después de su paso por el digestor anaerobio termófilo (DAT).

Con todo ello y con el objetivo de conocer la cantidad de fósforo que atraviesa el proceso de digestión anaerobia termófila en el Escenario 2, se calcula la relación entre la concentración de fósforo, tanto total como reactivo, a la entrada y a la salida del reactor anaerobio (f_{PT} y f_{PR}) mediante las Ecuaciones 144 y 145:

$$f_{PT} = \frac{[C_{PT}]_{Alim}}{[C_{PT}]_{DAT}} = 0,57 \quad (144)$$

$$f_{PR} = \frac{[C_{PR}]_{Alim}}{[C_{PR}]_{DAT}} = 0,56 \quad (145)$$

Finalmente, una vez realizado el ensayo de digestión anaerobia se observa que la digestión anaerobia termófila reduce el contenido en fósforo del fango provocando posibles problemas de obstrucción de tuberías si el producto obtenido de su precipitación es estruvita, tal y como se expone en el apartado 2.4. El fósforo y su recuperación. En este caso, se distingue que la concentración de calcio, incluso en la muestra digerida, es elevada, razón por la que es posible que los iones de calcio tengan prioridad sobre los de magnesio y el producto final sea hidroxiapatita. Este hecho que *a priori* puede ser una ventaja operacional puede dar lugar a problemas al intentar recuperar el fósforo restante en etapas posteriores.

4.2. ESCENARIO 1 – RESULTADOS DE LOS BALANCES

4.2.1. BALANCE DE MATERIA DE LA LÍNEA DE FANGOS DEL ESCENARIO 1

Se realiza el balance de materia global de la línea de fangos con el objetivo de conocer la cantidad de fango que se trata en esta situación y, de este modo, estimar la cantidad de fósforo disponible. Para ello, se parte de los datos diarios de generación, sequedad y fracción volátil del fango a tratar proporcionado por cada EDAR (ver Tabla 8). Los cálculos llevados a cabo se realizan en formato matriz, por lo que se obtienen resultados por día y EDAR que se convierten en datos diarios a tratar en la EDAR de Tudela y, posteriormente, se transforman en el resultado final del balance mediante un promedio diario global.

Tabla 8. Parámetros iniciales de cada EDAR en el balance de fango del Escenario 1.

EDAR	F ₁ [Tm/d]	Proporción (P) [%]	Materia seca [%]	Materia seca [kg/m ³]	Fracción volátil [%]
Tudela	140	62	3,0	30	76
EDAR 1	6	3	3,5	35	70
EDAR 2	6	2	3,5	35	81
EDAR 3	20	9	2,8	28	67
EDAR 4	27	12	3,8	38	73
EDAR 5	16	7	2,2	22	73
EDAR 6	13	6	5,1	51	79

De este modo, tal y como se describe en el apartado 3.5.1. Balances de fango y fósforo en el Escenario 1 se realizan los cálculos pertinentes y, con todo ello, en la Figura 19 se expone el resultado final de los balances de materia globales realizados sobre la línea de fangos de la EDAR de Tudela en el denominado Escenario 1 – Configuración actual de la línea de fangos.

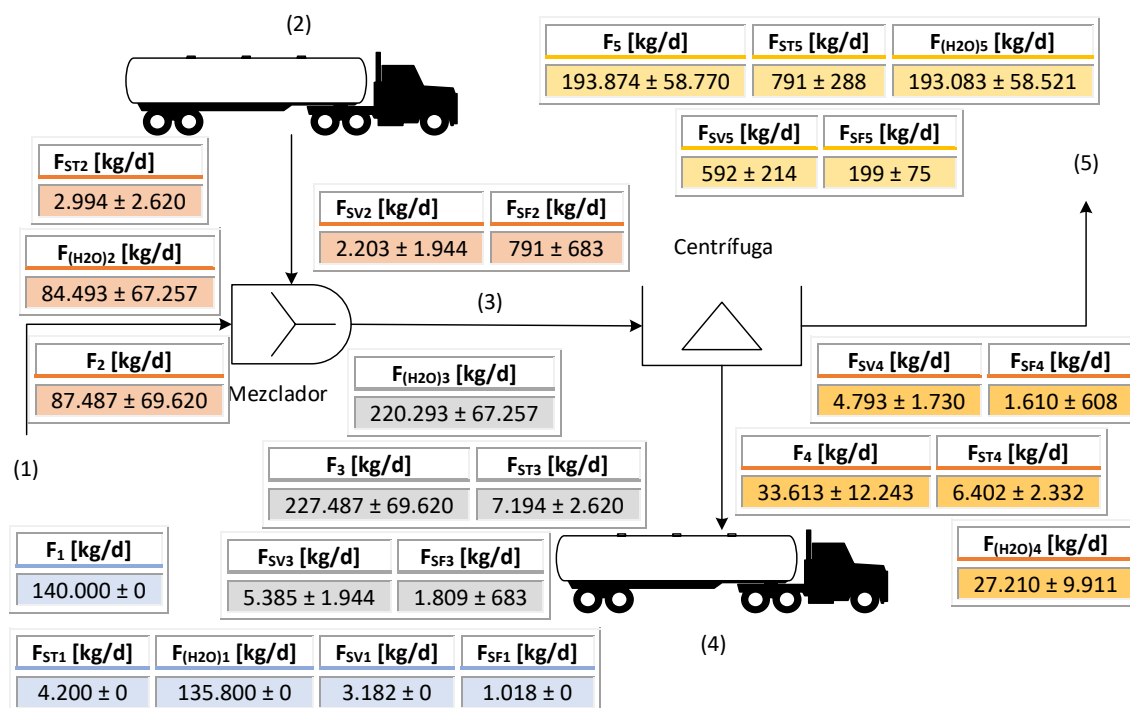


Figura 19. Diagrama de flujo del balance de fangos del Escenario 1 – Configuración actual de la línea de fangos.

Tabla 9. Características principales de las corrientes que conforman la línea de fangos del Escenario 1.

Corriente	Concentración de ST [%]	Humedad [%]	Fracción volátil [%]
1. Fango de Tudela	3,0	97	75,8
2. Fango externo	3,4	96,6	73,6
3. Mezcla de fangos	3,2	96,8	74,9
4. Fango deshidratado	19,0	81,0	74,9
5. Rebose de centrífuga	0,4	99,6	74,9

De esta manera, los rasgos principales que caracterizan cada una de las corrientes se exponen en la siguiente Tabla (ver Tabla 9). Por último, aplicando la Ecuación 1 se obtiene que la EDAR de Tudela en el Escenario 1 procesa la cantidad de fango semejante a una población de 221.346 habitantes equivalentes.

4.2.2. CARACTERIZACIÓN DEL FÓSFORO EN LA LÍNEA DE FANGOS DEL ESCENARIO 1

En primer lugar y con el objetivo de poder utilizar una base de datos mayor, se relaciona la concentración de fósforo con el contenido de sólidos del fango fresco (ver Figuras 20 y 21). Como se puede observar, no existe una relación lineal entre ambas variables, por tanto, no se puede determinar que la cantidad de fósforo sea proporcional a la concentración en sólidos totales si se consideran todos los lodos.

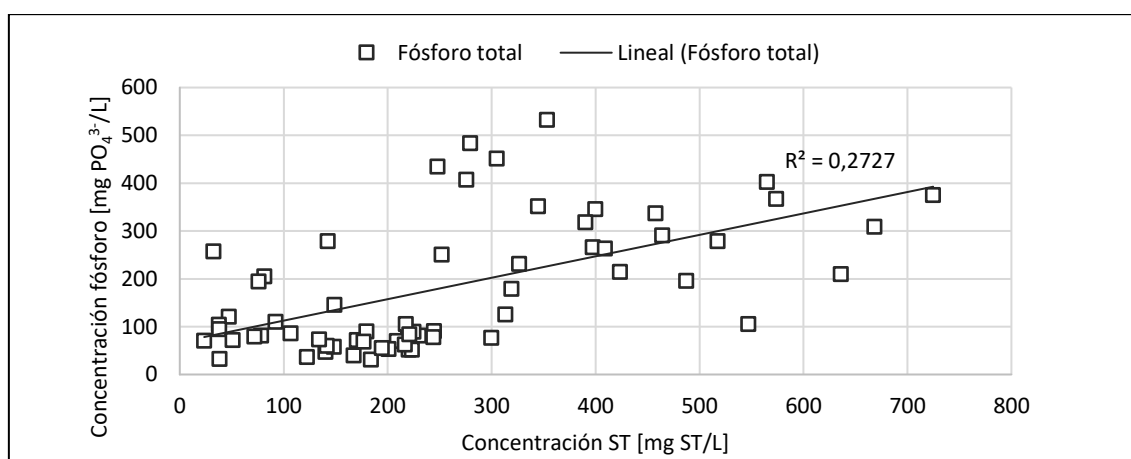


Figura 20. Representación gráfica del contenido en fósforo total y sólidos totales de los fangos incluidos en el Escenario 1.

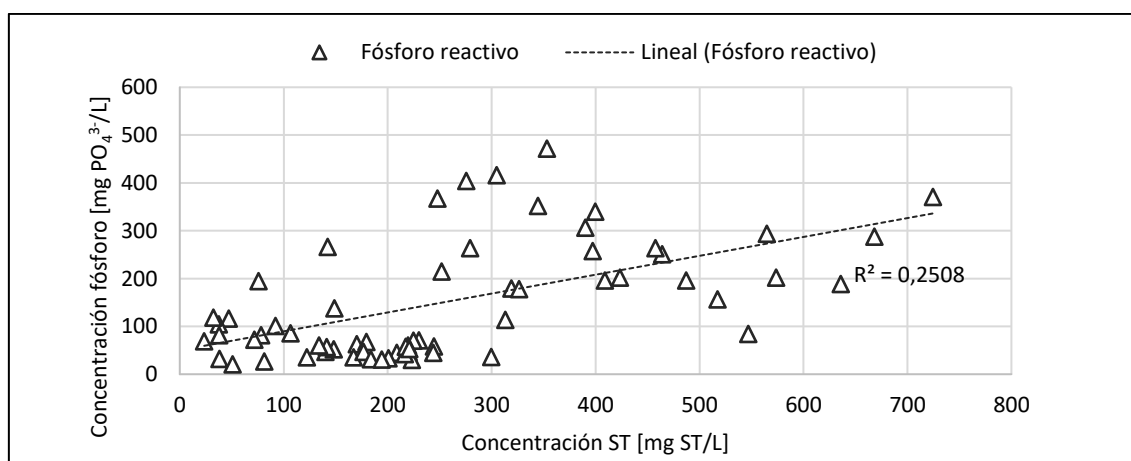


Figura 21. Representación gráfica del contenido en fósforo reactivo y sólidos totales de los fangos incluidos en el Escenario 1.

De este modo, no es posible utilizar la base de datos de materia seca del fango para determinar el contenido en fósforo de estos y, por tanto, para llevar a cabo el balance de fósforo es preciso caracterizar los fangos a tratar en la EDAR de Tudela. Por lo tanto, se analiza el fósforo total y reactivo del sobrenadante obtenido de la centrifugación del fango en el laboratorio, todo ello con el objetivo de conocer el contenido en fósforo de la fracción acuosa susceptible de recuperación a escala real. Los resultados obtenidos para las EDARs incluidas en el escenario 1 son los que se muestran en las Figuras 22 y 23 y el análisis estadístico descriptivo de los datos se encuentra en el Anexo II.

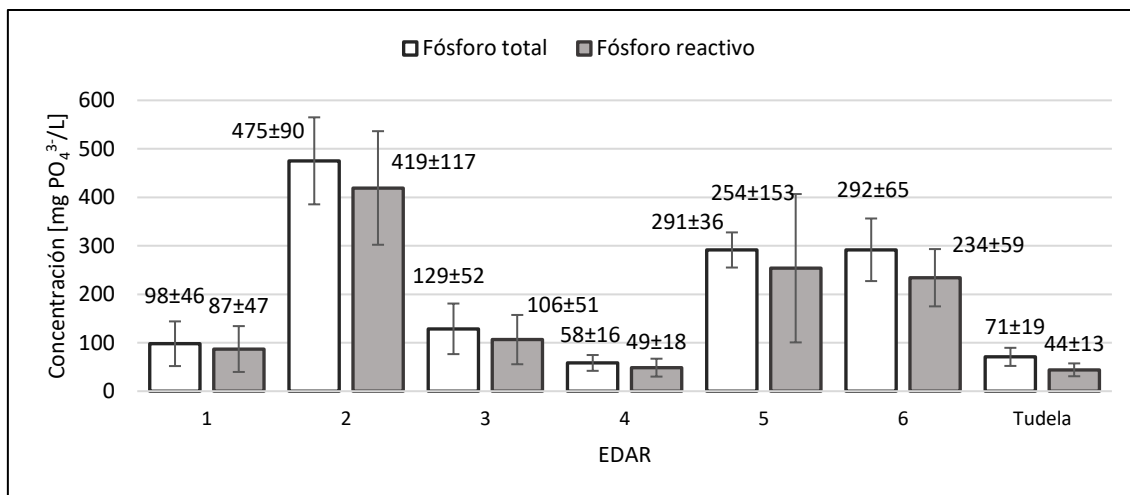


Figura 22. Concentración de fósforo total y reactivo del sobrenadante obtenido de los fangos procedentes de las EDARs incluidas en el Escenario 1 – Configuración actual de la línea de fangos.

Como se puede observar en la Figura 22, existen diferencias importantes en función del origen del fango. Por ejemplo, en la EDAR 2 se da la mayor concentración registrada, posiblemente debido a que utiliza fangos activos como tratamiento biológico. Además, cabe destacar que existen plantas como la EDAR 5 en la que se da una gran variabilidad provocada por los aportes agroindustriales en determinadas épocas del año. Por otro lado, en la Figura 23 se ve que la proporción de ortofosfatos sobre todas las demás formas en las que puede estar presente el fósforo en el rebose obtenido de la centrifugación del fango se encuentra alrededor del 80-90%, excepto en el caso de Tudela, lugar donde los tiempos de almacenamiento son altos.

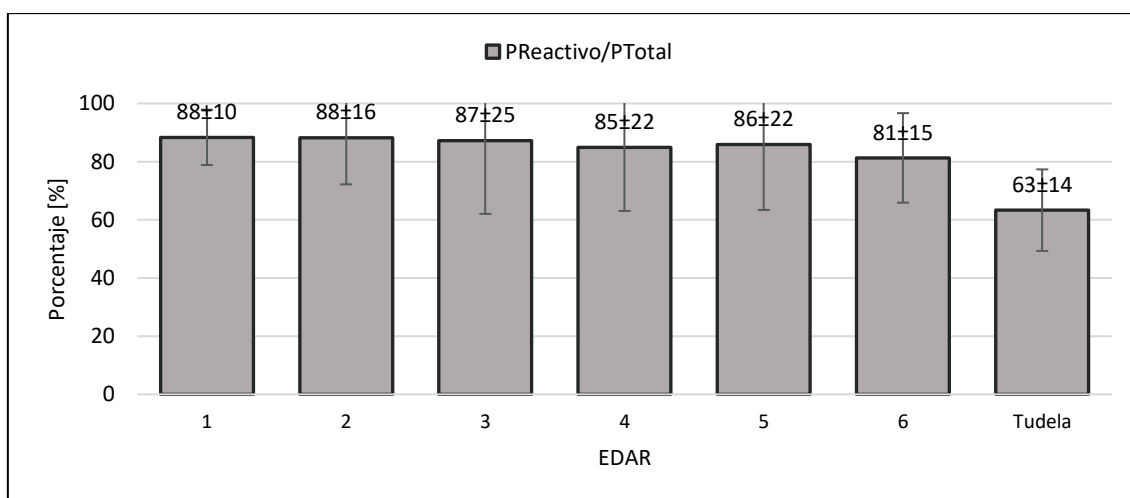


Figura 23. Proporción de fósforo reactivo sobre el fósforo total del sobrenadante obtenido de los fangos procedentes de las EDARs incluidas en el Escenario 1 – Configuración actual de la línea de fangos.

4.2.3. BALANCE DEL FÓSFORO EN LA LÍNEA DE FANGOS DEL ESCENARIO 1

Una vez conocida la concentración de fósforo de cada uno de los fangos que conforman la corriente de entrada es posible conocer la cantidad de este nutriente que recorre la línea de fangos de la EDAR de Tudela (ver Figura 24). Para ello, se aplican las ecuaciones descritas en el apartado 3.5.2.

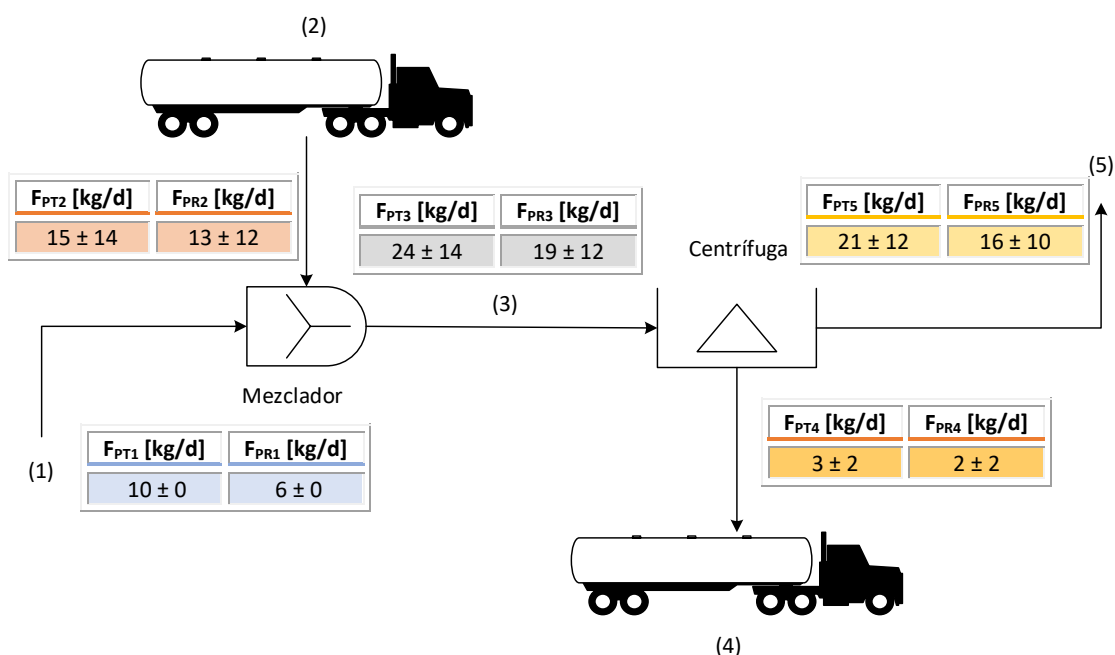


Figura 24. Diagrama de flujo del balance de fósforo del Escenario 1 – Configuración actual de la línea de fangos.

De este modo, la concentración de fósforo, tanto total como reactivo, en cada corriente se expone en la Tabla 10. Como se puede observar, los fangos externos aportan gran parte del fósforo que atraviesa la línea de fangos (63%), además de aumentar la proporción de ortofosfatos. Con todo ello, se obtiene una corriente final con una concentración suficiente de fósforo reactivo susceptible de ser recuperado mediante precipitación de diferentes complejos. En cambio, si el producto final deseable es la estruvita es preciso atender a las concentraciones, tanto de magnesio como de calcio, presentes en esta corriente para que se cumplan las relaciones molares necesarias [23]. Como se comenta en el apartado 4.1.2., *a priori* existe una concentración elevada de calcio, por lo que es posible que se una a los fosfatos antes que el magnesio, razón por la que obtener estruvita puede suponer un reto.

Tabla 10. Concentración de fósforo total y reactivo de las corrientes incluidas en la línea de fangos del Escenario 1.

Corriente	Concentración P_T [mg PO_4^{3-} /L]	Concentración P_R [mg PO_4^{3-} /L]	P_R/P_T [%]
1. Fango de Tudela	71	44	62
2. Fango externo	175	152	87
3. Mezcla de fangos	111	86	77
4. Fango deshidratado	114	88	77
5. Rebose de centrifuga	110	85	77

Como se puede observar en la Tabla 10 y en la Figura 24, aunque las concentraciones sean similares en las corrientes de fango deshidratado y rebose de la centrifuga, la cantidad de fósforo es mucho mayor en la corriente de rebose debido a que es prácticamente todo agua. De este modo, la corriente 5, que es sobre la que se plantea la recuperación de fósforo en el Escenario 1, contiene 16 ± 10 kg PO_4^{3-} /d.

4.3. ESCENARIO 2 – RESULTADOS DE LOS BALANCES

4.3.1. BALANCE DE MATERIA DE LA LÍNEA DE FANGOS DEL ESCENARIO 2

A continuación, se presentan los resultados del balance de materia global de la línea de fangos en el Escenario 2 para conocer la cantidad de fango que se trata en esta situación y, de este modo, estimar la cantidad de fósforo disponible en el futuro. Para ello, en la Tabla 11 se muestran los parámetros iniciales de las corrientes de entrada, tanto del fango de Tudela como del resto de lodos procedentes de EDARs externas. Además, en la Figura 82 del Anexo III se muestran los datos reales de producción de fangos por mes y EDAR (en materia seca).

Tal y como se puede observar en la Tabla 11, la proporción de fango que corresponde a la EDAR de Tudela ronda el 50%. En cambio, si los fangos que se deshidratan en origen no fuesen tratados esta proporción sería mucho menor. Por otro lado, la fracción volátil de los fangos generados en instalaciones que no cuentan con lecho bacteriano (fangos activos y MBBR) es mayor que en aquellas plantas con filtros percoladores.

Tabla 11. Parámetros iniciales de cada EDAR en el balance de fango del Escenario 2.

EDAR	F ₁ [Tm/d]	Proporción (P) [%]	Materia seca [%]	Materia seca [kg/m ³]	Fracción volátil [%]
Tudela	140	48	3,0	30	76
EDAR 1	6	2	3,5	35	70
EDAR 2	6	2	3,5	35	81
EDAR 3	20	7	2,8	28	67
EDAR 4	27	9	3,8	38	73
EDAR 5	16	5	2,2	22	73
EDAR 6	13	5	5,1	51	79
EDAR 7	7	2	3,1	31	53
EDAR 8	9	3	3,4	34	49
EDAR 9	7	2	25,0	250	69
EDAR 10	5	2	4,6	46	61
EDAR 11	5	2	25,0	250	68
EDAR 12	2	1	25,0	250	81
EDAR 13	8	3	21,6	216	76
EDAR 14	5	3	25,0	250	62
EDAR 15	9	3	2,7	27	76
EDAR 16	16	6	3,4	34	62
EDAR 17	3	1	25,0	250	66
EDAR 18	1	0,2	25,0	250	79

Acorde a lo expuesto en el apartado 3.5.2. se llevan a cabo los cálculos pertinentes y se obtienen los resultados expuestos en la Figura 25. Las características principales de cada una de las corrientes que componen el Escenario 2 se muestran en la Tabla 12. De este modo, mediante la Ecuación 1 se obtiene que la EDAR de Tudela en el Escenario 2 es capaz de procesar el fango de una población de 488.934 habitantes equivalentes, lo que supone un aumento de la capacidad 2,2 veces mayor que en el Escenario 1.

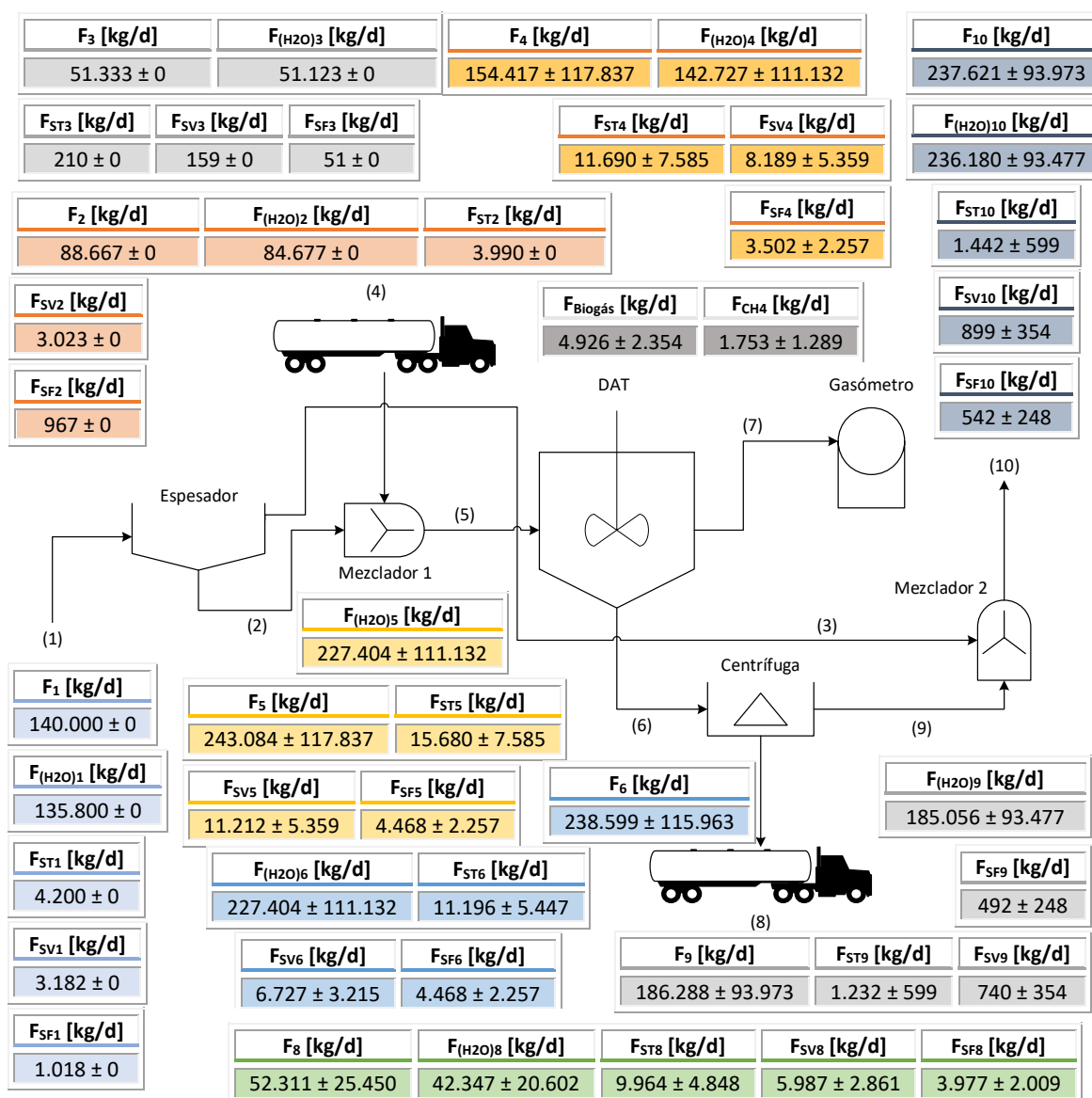


Figura 25. Diagrama de flujo del balance de fangos del Escenario 2 – Tratamiento centralizado de fangos frescos y deshidratados mediante digestión anaerobia termófila.

Tabla 12. Características principales de las corrientes que conforman la línea de fangos del Escenario 2.

Corriente	Concentración de ST [%]	Humedad [%]	Fracción volátil [%]
1. Fango de Tudela	3,0	97	75,8
2. Fango de Tudela espesado	4,5	95,5	75,8
3. Rebose de espesador	0,4	99,6	75,8
4. Fango externo	7,6	92,4	70,0
5. Mezcla de fango	6,5	93,5	71,5
6. Fango digerido	4,7	95,3	60,1
7. Biogás	-	-	-
8. Fango deshidratado	19,0	81,0	60,1
9. Rebose de centrífuga	0,7	99,3	60,1
10. Rebose final	0,6	99,4	62,4

4.3.2. CARACTERIZACIÓN DEL FÓSFORO EN LA LÍNEA DE FANGOS DEL ESCENARIO 2

En este caso también se relaciona la concentración de fósforo de cada fango con el contenido en sólidos de este (ver Figuras 26 y 27). Como en el caso anterior, no se detecta una dependencia lineal entre ambas variables, por lo que no es posible determinar la concentración de fósforo a partir del contenido en sólidos totales.

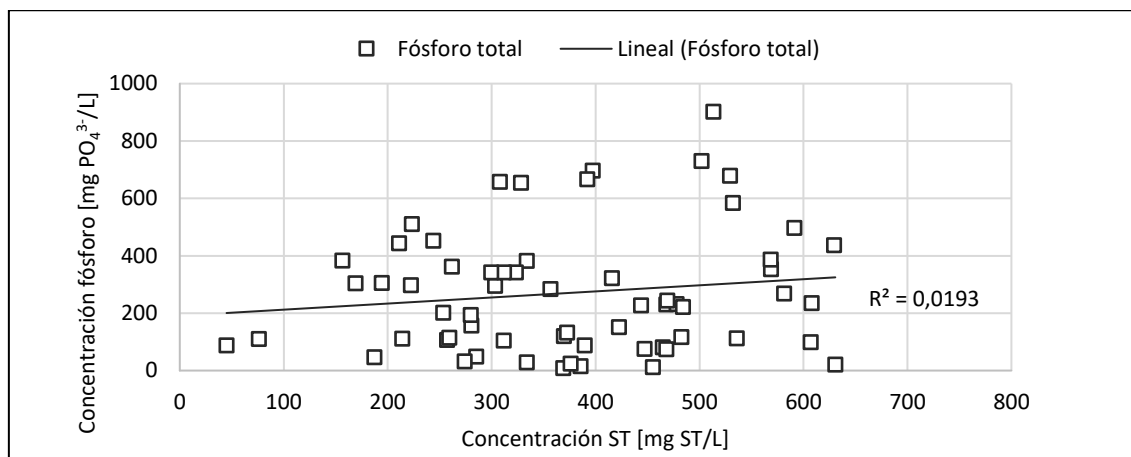


Figura 26. Representación gráfica del contenido en fósforo total y sólidos totales de los fangos incluidos en el Escenario 2.

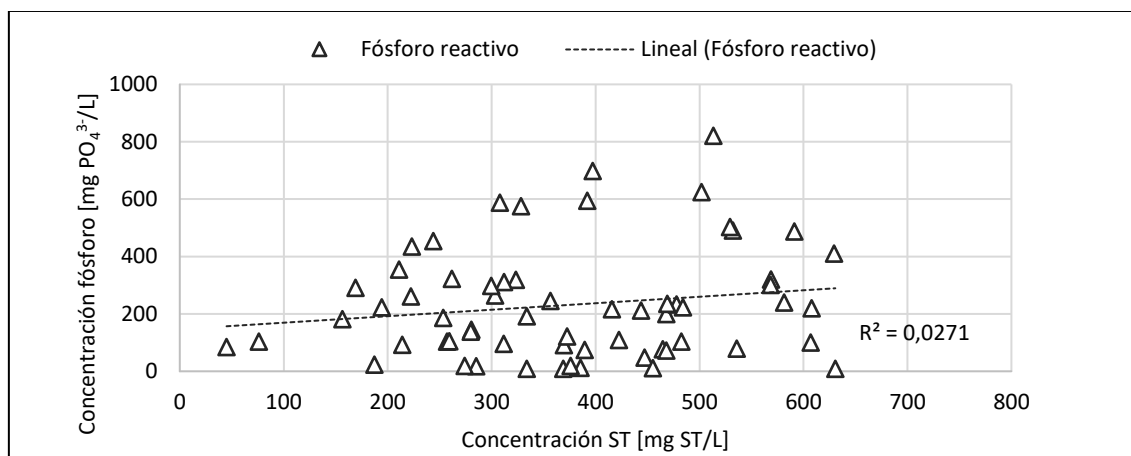


Figura 27. Representación gráfica del contenido en fósforo reactivo y sólidos totales de los fangos incluidos en el Escenario 2.

Del mismo modo que en el escenario anterior se cuantifica el fósforo total, el fósforo reactivo y la proporción de este último con respecto al primero de los fangos a tratar. Los resultados del análisis de las EDARs no incluidas en el Escenario 1 son los que se muestran en la Figuras 28-30. Como se puede observar en la Figura 28, en este escenario se encuentran varias EDARs con concentraciones de fósforo total y reactivo similares a las del Escenario 1, entre las que destaca la EDAR 11, cuyo contenido en fósforo es muy bajo. Por otro lado, en la Figura 29 se ve que también se incluyen en este escenario instalaciones con concentraciones altas por lo que, si la cantidad de fango a tratar es sustancial, su aporte sobre el total será importante. Entre estas EDARs destacan las EDARs 12, 13 y 16. Como en el caso del Escenario 1, las EDARs con aportes agroindustriales asimilables a urbanos, en este caso la EDAR 16, suelen presentar concentraciones de fósforo altas y, además, mucha variabilidad entre sus datos. Por otro lado, las EDARs 12 y 13 presentan concentraciones de fósforo altas y, como en el caso de la EDAR 2, puede deberse a que la tecnología utilizada es la de fangos activos puros, en el caso de la EDAR 12, y combinación entre filtros y fangos activos, en el caso de la EDAR 13. Se asume que las características de la EDAR 18 son las mismas que las de la EDAR 6.

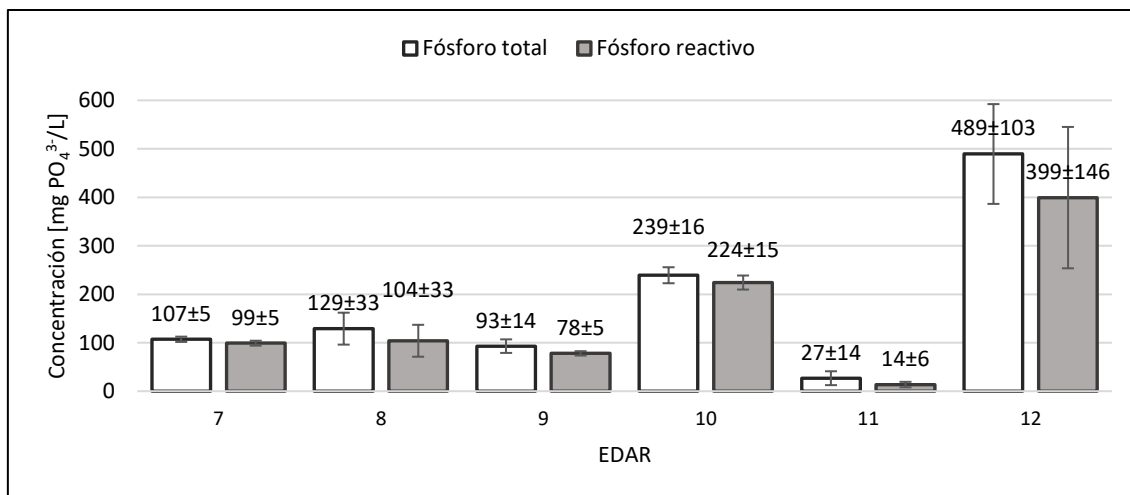


Figura 28. Concentración de fósforo total y reactivo del sobrenadante obtenido de los fangos procedentes de las EDARs 7-12 incluidas en el Escenario 2.

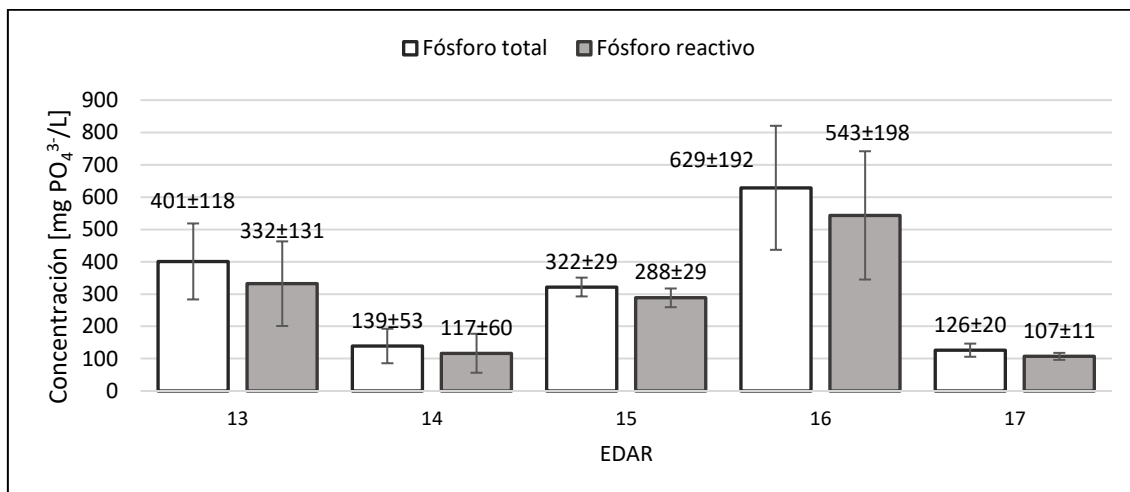


Figura 29. Concentración de fósforo total y reactivo del sobrenadante obtenido de los fangos procedentes de las EDAR 13-17 incluidas en el Escenario 2.

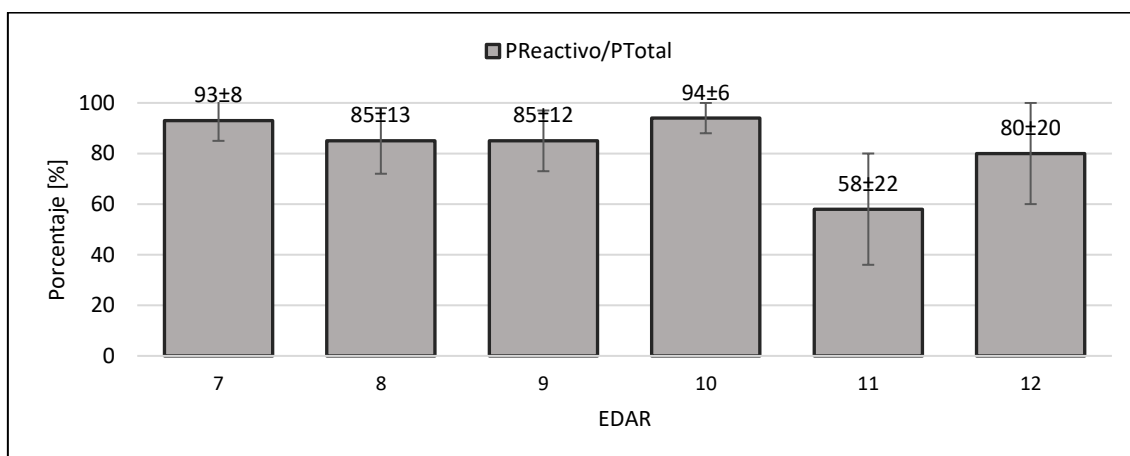


Figura 30. Proporción de fósforo reactivo sobre el fósforo total del sobrenadante obtenido de los fangos procedentes de las EDARs 7-12 incluidas en el Escenario 2.

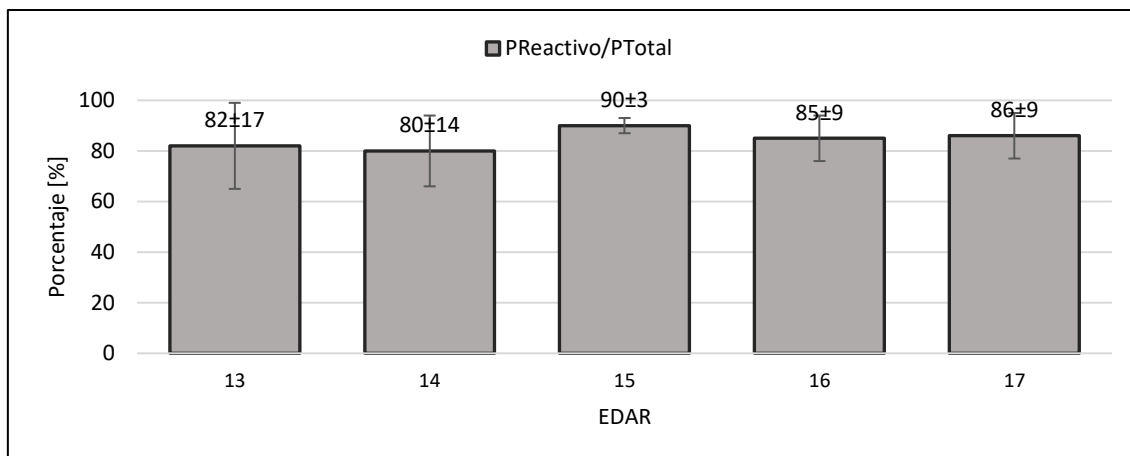


Figura 31. Proporción de fósforo reactivo sobre el fósforo total del sobrenadante obtenido de los fangos procedentes de las EDARs 13-17 incluidas en el Escenario 2.

Por último, en las Figuras 30 y 31 se puede comprobar que el contenido en ortofosfatos del fósforo total presente en cada muestra de sobrenadante obtenido del fango se encuentra alrededor del 80-90%, por lo que la mayoría del fósforo presente en este rebose se encuentra en la forma susceptible de ser recuperado.

4.3.3. BALANCE DEL FÓSFORO EN LA LÍNEA DE FANGOS DEL ESCENARIO 2

Una vez conocida la concentración de fósforo de todos los fangos originados en las EDARs incluidas en el Escenario 2 se aplican los cálculos descritos en el apartado 3.5.2. y se obtienen los siguientes resultados expuestos en la Figura 32. Con todo ello, en la Tabla 13 se expone la concentración de fósforo total y fósforo reactivo presente en cada una de las corrientes que componen el Escenario 2.

En este caso, parte del fósforo contenido en el fango generado en la EDAR de Tudela se separa inicialmente en los espesadores, de modo que se convierte en una corriente que aporta fósforo sin atravesar los digestores anaerobios termófilos. Por otro lado, los fangos externos tienen un mayor peso sobre la corriente resultante de la mezcla con el fango de Tudela (85% respecto al 63% del Escenario 1). Como se puede observar en la Tabla 13, la concentración de fósforo, tanto total como reactivo, se reduce aproximadamente a la mitad a su paso por el proceso de digestión anaerobia. De este modo y como en el caso del Escenario 1, se obtiene una corriente final con una concentración de fósforo suficiente para ser recuperado mediante precipitación de cristales de estruvita [23]. En cambio, la configuración de la línea de fangos expuesta en este escenario no parece ser la idónea para este cometido, ya que debido al pH al que opera el digestor anaerobio termófilo se podría dar la cristalización incontrolada en el interior de los digestores dando lugar a problemas de obstrucción de conducciones. Del mismo modo que en el escenario anterior, se propone la realización del estudio de las concentraciones de magnesio y calcio a lo largo de la línea de tratamiento de fangos.

Finalmente, el fósforo disponible para ser recuperado en la corriente 10 del Escenario 2 asciende a $19 \pm 10 \text{ kg PO}_4^{3-}/\text{d}$.

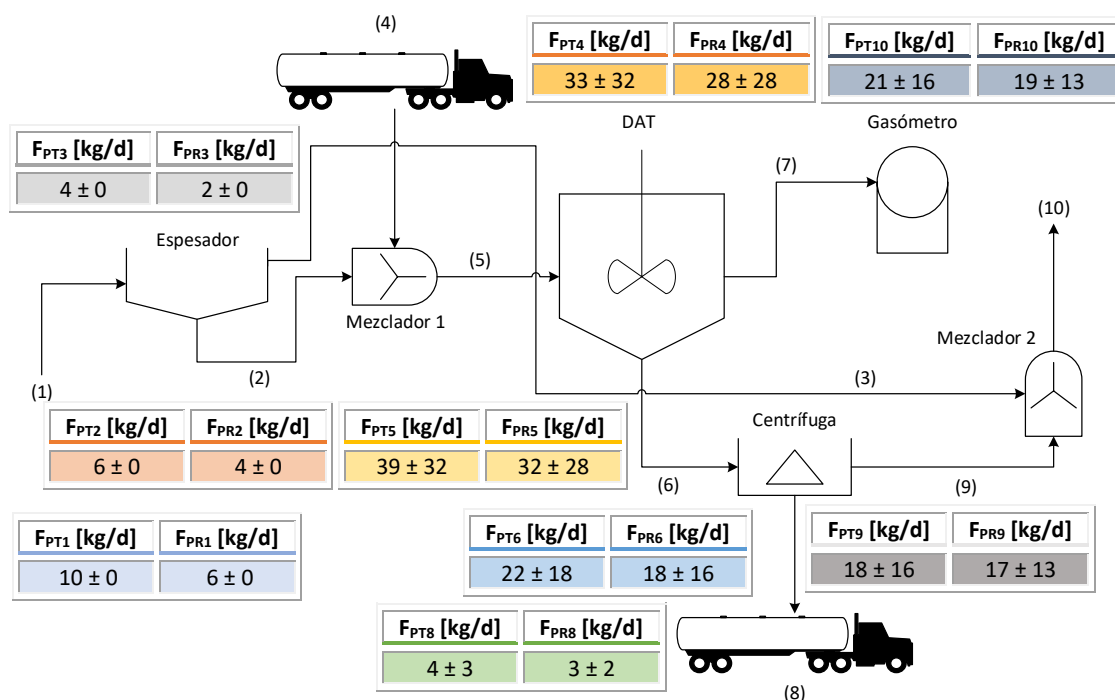


Figura 32. Diagrama de flujo del balance de fósforo del Escenario 2 – Tratamiento centralizado de fangos frescos y deshidratados mediante digestión anaerobia termófila.

Tabla 13. Concentración de fósforo total y reactivo de las corrientes incluidas en la línea de fangos del Escenario 2.

Corriente	Concentración P_T [mg PO_4^{3-}/L]	Concentración P_R [mg PO_4^{3-}/L]	P_R/P_T [%]
1. Fango de Tudela	71	44	62
2. Fango de Tudela espesado	71	44	62
3. Rebose de espesador	71	44	62
4. Fango externo	229	199	87
5. Mezcla de fango	170	142	82
6. Fango digerido	97	79	81
7. Biogás	-	-	-
8. Fango deshidratado	102	82	80
9. Rebose de centrífuga	96	91	95
10. Rebose final	90	81	90

4.4. ANÁLISIS ECONÓMICO Y AMBIENTAL DE ALTERNATIVAS

A continuación, se procede a realizar la evaluación económica y ambiental de los escenarios actual y futuro de la línea de fangos de la EDAR de Tudela. Para ello, se realizan los cálculos expuestos en el apartado 3.7. y se obtienen los resultados que muestra la Tabla 14.

Tabla 14. Resultados obtenidos de la aplicación de los indicadores en función del escenario.

Indicador	Tipo de indicador	Escenario 1	Escenario 2
Coste transporte [€/año]	Económico	187.063	326.703
Coste electricidad [€/año]	Económico	214.412	-74.975
Cantidad de P tratada [kg PO ₄ ³⁻ /Tm fango]	Ambiental	72	74
Reducción de P en efluente EDAR [%]	Ambiental	12	11
Emisión de CO ₂ eq. por transporte [Tm CO ₂ eq/año]	Ambiental	144.356	459.392
Emisión de CO ₂ eq. por electricidad [Tm CO ₂ eq/año]	Ambiental	740.696	-259.004

Cabe destacar que un aumento del 220% de la capacidad de tratamiento de fango apenas supone un incremento del 2% del fósforo susceptible de recuperación. Esto se debe a la disminución producida por las condiciones de operación de la digestión anaerobia termófila. Además, tal y como se ve en la Tabla 33, si se consigue recuperar un 90% del fósforo reactivo contenido en la corriente final de la línea de fangos se obtendría una reducción en torno al 12% en ambos escenarios. Este hecho sería suficiente para cumplir con la normativa en materia de aguas en el caso de que se decretara el río Ebro aguas debajo de Tudela como zona sensible, imponiendo un límite de vertido para el fósforo de 2 mg P/L. En el primer escenario se obtiene una concentración de 1,86 mg P/L, mientras que en el Escenario 2 la concentración es de 1,87 mg P/L. Por otro lado, los costes de transporte y, además, las emisiones de gases de efecto invernadero son superiores en el Escenario 2, ya que la cantidad de fangos y el kilometraje es mayor. En cambio, con la instalación de un modelo basado en la digestión anaerobia termófila se obtienen valores negativos en términos de coste eléctrico y emisión de CO₂ equivalente, ya que la producción de electricidad a partir del biogás generado provoca un excedente de esta y sirve para compensar los valores más altos en el transporte.

De este modo, en la Tabla 15 se muestran los resultados globales en términos económicos y ambientales del análisis realizado. Como se puede observar, implantando el Escenario 2 – Tratamiento centralizado de fangos frescos y deshidratados mediante digestión anaerobia se produce un ahorro económico de 149.746 € al año. Además, con este mismo planteamiento se dejan de emitir 684.665 Tm CO₂ equivalente cada año que se encuentre en funcionamiento la EDAR de Tudela.

Tabla 15. Resultados globales del análisis económico y ambiental.

Indicador	Escenario 1	Escenario 2
Coste total [€/año]	401.475	251.728
Emisión de CO ₂ eq. total [Tm CO ₂ eq/año]	885.052	200.388

5. CONCLUSIONES

De este modo, tras la realización de los ensayos de laboratorio previos y la evaluación técnico-económica y ambiental de la gestión de los fangos generados en la zona sur de Navarra se concluye lo siguiente:

- El tiempo de almacenamiento de un fango influye notablemente en las características iniciales de éste y en su comportamiento cuando es sometido a un choque térmico que tiene por objetivo simular las condiciones de temperatura de la digestión anaerobia termófila (55 °C).
- Un aumento de temperatura del fango hasta 55 °C provoca un aumento del pH que produce la precipitación química del calcio y del fósforo reactivo. Sin embargo, si las condiciones de partida de pH son suficientemente ácidas el incremento no basta para producir la precipitación. Además, a 55 °C se produce la ruptura de la pared celular de los microorganismos presentes en el fango, lo que provoca la liberación de materia orgánica (DQO decantada), nutrientes (nitrógeno amoniacal y fósforo) y magnesio. Este hecho no ocurre con el calcio.

- ✚ La digestión anaerobia termófila produce un aumento brusco del nitrógeno amoniacal que provoca el aumento del pH. Este incremento del pH conforma un medio propicio para que, tanto el calcio como el fósforo, precipiten. En cambio, la concentración de calcio en el fango generado en la EDAR de Tudela es elevada, por lo que puede suponer un problema a la hora de perseguir otros productos precipitados como la estruvita, ya que los iones de calcio pueden desplazar a los de magnesio.
- ✚ No existe relación lineal entre el contenido en sólidos totales de los fangos analizados y la concentración de fósforo, tanto total como reactivo, presente en estos.
- ✚ Generalmente, la proporción de fósforo reactivo sobre el total presenta valores en torno al 80%, salvo en los casos de Tudela y la EDAR 11.
- ✚ En la actualidad (Escenario 1), la EDAR de Tudela trata el fango generado en 7 EDARs, incluida Tudela, procesando una cantidad de fango semejante a una población de alrededor de 220.000 habitantes equivalentes. En el Escenario 1 – Configuración actual de la EDAR de Tudela se obtiene una corriente final sobre la que llevar a cabo la recuperación de fósforo con una concentración de fósforo total de 110 mg $\text{PO}_4^{3-}/\text{L}$ y una concentración de fósforo reactivo de 85 mg $\text{PO}_4^{3-}/\text{L}$, lo que representa el 77%. De este modo, se obtienen 21 ± 12 kg $\text{PO}_4^{3-}/\text{d}$ de fósforo total y 16 ± 10 kg $\text{PO}_4^{3-}/\text{d}$ de fósforo reactivo.
- ✚ El Escenario 2 – Tratamiento centralizado de fangos frescos y deshidratados mediante digestión anaerobia termófila lleva a cabo la gestión del fango generado en 19 EDARs constituyendo una población de casi 500.000 habitantes equivalentes, lo que supone un aumento de capacidad de tratamiento del 220%. La corriente final obtenida en este escenario presenta concentraciones de fósforo total y reactivo de 90 y 81 mg $\text{PO}_4^{3-}/\text{L}$, respectivamente. En este caso, se obtienen 21 ± 16 kg $\text{PO}_4^{3-}/\text{d}$ de fósforo total y 19 ± 13 kg $\text{PO}_4^{3-}/\text{d}$ de fósforo reactivo.
- ✚ En la digestión anaerobia termófila se reduce la concentración de fósforo, tanto total como reactivo, en casi el 50%, por lo que se elimina mucho fósforo antes de llegar a la corriente donde se plantea su recuperación.
- ✚ Por otro lado, en el Escenario 2 la digestión anaerobia termófila produce 4.926 ± 2.354 kg/d de biogás de los cuales 1.753 ± 1.289 kg/d son de biometano.
- ✚ Aunque existe un aumento importante de la capacidad de tratamiento de fango, la cantidad de fósforo por tonelada de fango tratado que finalmente atraviesa la línea de fangos es semejante en todos los escenarios debido a la reducción producida en la digestión anaerobia termófila (72 y 74 kg $\text{PO}_4^{3-}/\text{Tm}$ fango, respectivamente). Además, en ambos casos se produciría una reducción de fósforo reactivo en el efluente de alrededor del 12% que implicaría el cumplimiento de la normativa en el caso de que el cauce receptor fuera declarado zona sensible (1,86 y 1,87 mg P/L).
- ✚ En términos económicos, el Escenario 1 cuenta con un menor gasto en transporte, pero los costes en electricidad son mayores debido a que en el Escenario 2 se produce biogás con el que, mediante cogeneración, se produce calor y electricidad. En el Escenario 2 se produce un excedente de electricidad y, por esta razón, se considera el gasto negativo.
- ✚ En términos de emisiones de gases de efecto invernadero ocurre algo similar, el Escenario 1 presenta emisiones de CO_2 equivalente asociadas al transporte mucho menores, pero como el gasto en electricidad de la EDAR en el Escenario 2 es negativo las emisiones asociadas a este son mayores en el Escenario 1.
- ✚ De este modo, mediante la implantación del Escenario 2 se genera un ahorro económico de alrededor de 150.000 €/año y, además, se dejan de emitir en torno a 700.000 Tm CO_2 eq/año.

Por todo ello, se concluye que el escenario que supone la ampliación de la línea de fangos y la centralización de la gestión de estos en la EDAR de Tudela es la mejor opción, tanto en términos económicos como ambientales, para realizar el tratamiento de los fangos generados en la región sur de Navarra.

6. REFERENCIAS

- [1] R. Vilanova, I. Santín y C. Pedret, «Control y operación de estaciones depuradoras de aguas residuales: Modelado y simulación,» *Revista iberoamericana de automática e informática industrial*, vol. 14, nº 3, pp. 217-233, 2017.
- [2] M. A. Montes-Morán y J. A. Menéndez, «El problema de la gestión de lodos en EDARs,» de *Nuevos materiales y tecnologías para el tratamiento del agua*, Sevilla, Universidad Internacional de Andalucía, 2010, pp. 101-138.
- [3] A. Raheem, V. S. Sikarwar, J. He, W. Dastyar, D. D. Dionysiou, W. Wang y M. Zhao, «Opportunities and challenges in sustainable treatment and resource reuse of sewage sludge: A review,» *Chemical Engineering Journal*, nº 337, pp. 616-641, 2018.
- [4] A. Ghergel, C. Teodosiu y S. De Gisi, «A review on wastewater sludge valorisation and its challenges in the context of circular economy,» *Journal of Cleaner Production*, nº 228, pp. 244-263, 2019.
- [5] M. Sanz Valencia, *Estudio de la recuperación de fósforo en la EDAR de Arazuri-Pamplona*, Valencia: Universitat Politècnica de València, 2014.
- [6] L. Pastor Alcañiz, *Estudio de la precipitación y recuperación del fósforo presente en las aguas residuales en forma de estruvita (MgNH₄PO₄·6H₂O)*, Valencia: Universitat Politècnica de València, 2008.
- [7] Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente, *Plan estatal marco de gestión de residuos (PEMAR) 2016-2022*, Madrid: Gobierno de España, 2015.
- [8] V. Ruiz Álvarez, *Estudio experimental de la gasificación de char de pirólisis de lodos de EDAR*, Zaragoza: Universidad de Zaragoza, 2013.
- [9] A. Hernández Lehmann, *Manual de diseño de estaciones depuradoras de aguas residuales*, Madrid: IBERGARCETA PUBLICACIONES, S.L., 2015.
- [10] A. López Martín, *Evaluación de tecnologías en el tratamiento de aguas y fangos en EDARs, para la reducción de microorganismos con riesgo sanitario y ambiental*, Zaragoza: Universidad de Zaragoza, 2018.
- [11] Instituto Nacional de Estadística, *Estadísticas sobre el suministro y saneamiento del agua. Serie 2000-2018. Recogida y tratamiento de las aguas residuales por comunidades y ciudades autónomas, tipo de indicador y periodo*, 2018.
- [12] I. C. González Granados, *Generación, caracterización y tratamiento de lodos de EDAR*, Córdoba: Universidad de Córdoba, 2015.
- [13] Metcalf & Eddy, *Ingeniería de las aguas residuales*, 3ª Edición, McGraw Hill/Interamericana de España, 2002.
- [14] Navarra de Infraestructuras Locales, S.A. ; Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, *Estudio de distintos procesos de estabilización de fangos generados en un proceso de filtros percoladores y su influencia en la higienización de los mismos*, Pamplona, 2008.
- [15] S. Daneshgar, A. Callegari, A. G. Capodaglio y D. Vaccari, «The potential phosphorus crisis: Resource conservation and possible escape technologies: A review,» *Resources*, vol. 7, nº 37, pp. 1-22, 2018.
- [16] M. Martí Gómez-Aldaraví, *Modificación de la configuración de la EDAR de Calahorra para la recuperación de fósforo en la línea de fangos*, Valencia: Universitat Politècnica de València, 2014.
- [17] D. León Osta, *Estudio de recuperación de fósforo del agua de retorno de la deshidratación de fangos en la estación depuradora de aguas residuales de Tudela*, Huesca: Universidad de Zaragoza, 2018.

- [18] LIFE PHORWater, «Antecedentes,» 2017. [En línea]. Available: <https://phorwater.eu/antecedentes/>. [Último acceso: 6 Junio 2021].
- [19] P. Balmér, «Phosphorus recovery - an overview of potentials and possibilities,» *Water Science and Technology*, vol. 10, nº 49, pp. 185-190, 2004.
- [20] L. Peng, H. Dai, Y. Wu y X. Lu, «A comprehensive review of phosphorus recovery from wastewater by crystallization processes,» *CHEMOSPHERE*, nº 197, pp. 768-781, 2018.
- [21] Navarra de Infraestructuras Locales, S.A. (NILSA), «Depuradoras,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.nilsa.com/es/que-hacemos/saneamiento-y-depuracion/depuradoras/>. [Último acceso: 6 Junio 2021].
- [22] M. Henze, W. Gujer, T. Mino y M. van Loosdrecht, Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and AMS3. Scientific and technical report No. 9, Londres: IWA Publishing, 2000.
- [23] A. B. R. Bouzas, J. Ribes, L. Borrás, N. Martí, J. Ferrer, D. Mangin, C. Cogné, S. Labouret, E. Morales, S. Doñate, S. Grau, L. Pastor y A. Seco, «Implementación de un sistema de recuperación de fósforo en la EDAR de Calahorra,» *Aguasresiduales.info*, 2017.
- [24] Instituto Nacional de Estadística, *Estadísticas sobre recogida y tratamiento de residuos. Tratamiento de residuos: Serie 2010-2018. Cantidad de residuos no peligrosos y peligrosos gestionados, por tipo de residuo, tipo de tratamiento y clase de peligrosidad*, 2018.

7. ANEXOS

7.1. ANEXO I – LOCALIZACIÓN DE LAS EDAR DE ESTUDIO

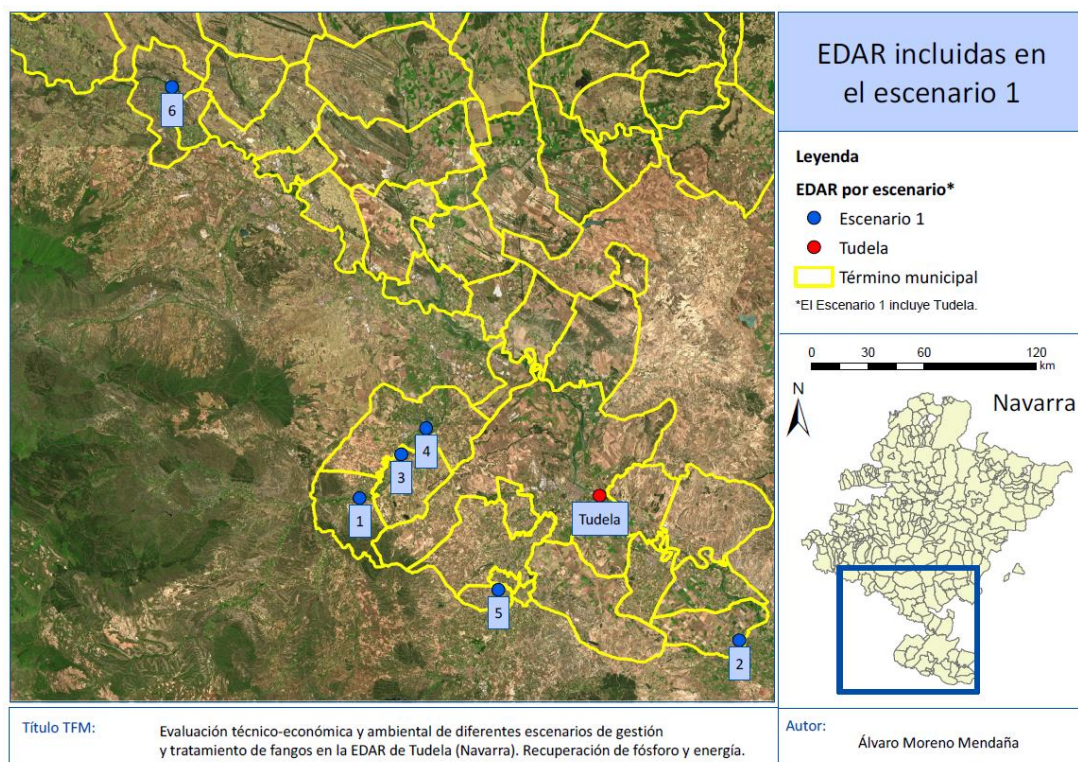


Figura 33. Localización de las EDARs incluidas en el Escenario 1.

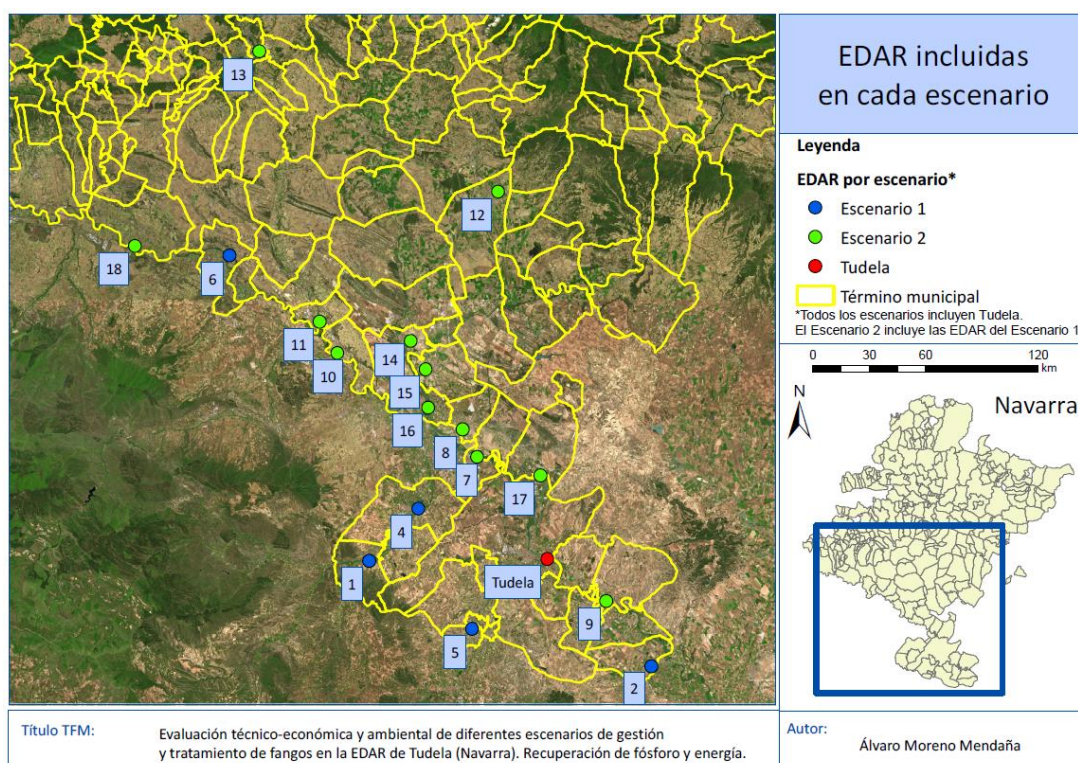


Figura 34. Localización de las EDARs incluidas en el Escenario 2.

7.2. ANEXO II – ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS

7.2.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DESCRIPTIVO DE LOS ENSAYOS DE CALENTAMIENTO

Tabla 16. Análisis estadístico descriptivo de la DQO decantada antes de calentar la muestra.

Fango	Promedio [mg O ₂ /L]	d.e. [mg O ₂ /L]	c.v. [%]	Máx. [mg O ₂ /L]	Mín. [mg O ₂ /L]	I.C. [mg O ₂ /L]	n
Fresco Filtro	368	56	15	430	320	[425, 312]	3
Fresco Decantador	5.962	2.584	43	10.440	3.760	[8.546, 3.378]	5
Alimentación	3.004	1.147	38	4.115	1.190	[4.151, 1.857]	5
DAT	1.640	225	14	1.920	1.350	[1.865, 1.415]	5

Tabla 17. Análisis estadístico descriptivo del nitrógeno amoniacal antes de calentar la muestra.

Fango	Promedio [mg N/L]	d.e. [mg N/L]	c.v. [%]	Máx. [mg N/L]	Mín. [mg N/L]	I.C. [mg N/L]	n
Fresco Filtro	24	1	3	25	23	[25, 23]	3
Fresco Decantador	220	115	52	330	75	[335, 105]	5
Alimentación	191	30	16	228	145	[221, 161]	5
DAT	659	16	2	678	635	[675, 643]	5

Tabla 18. Análisis estadístico descriptivo del calcio antes de calentar la muestra.

Fango	Promedio [mg Ca ²⁺ /L]	d.e. [mg Ca ²⁺ /L]	c.v. [%]	Máx. [mg Ca ²⁺ /L]	Mín. [mg Ca ²⁺ /L]	I.C. [mg Ca ²⁺ /L]	n
Fresco Filtro	349	13	4	364	338	[363, 336]	3
Fresco Decantador	1.254	598	48	2.220	780	[1.852, 656]	5
Alimentación	696	120	17	786	522	[815, 576]	5
DAT	358	42	12	396	294	[399, 316]	5

Tabla 19. Análisis estadístico descriptivo del fósforo total antes de calentar la muestra.

Fango	Promedio [mg PO ₄ ³⁻ /L]	d.e. [mg PO ₄ ³⁻ /L]	c.v. [%]	Máx. [mg PO ₄ ³⁻ /L]	Mín. [mg PO ₄ ³⁻ /L]	I.C. [mg PO ₄ ³⁻ /L]	n
Fresco Decantador	279	75	27	350	158	[354, 204]	5
Alimentación	77	23	30	110	46	[100, 54]	5
DAT	44	4	10	49	38	[48, 40]	5

Tabla 20. Análisis estadístico descriptivo del fósforo reactivo antes de calentar la muestra.

Fango	Promedio [mg PO ₄ ³⁻ /L]	d.e. [mg PO ₄ ³⁻ /L]	c.v. [%]	Máx. [mg PO ₄ ³⁻ /L]	Mín. [mg PO ₄ ³⁻ /L]	I.C. [mg PO ₄ ³⁻ /L]	n
Fresco Filtro	27,7	0,4	1,3	28,2	27,5	[28,1, 27,4]	3
Fresco Decantador	240	75	31	315	124	[315, 165]	5
Alimentación	52	23	44	84	20	[75, 29]	5
DAT	29	2	6	31	28	[31, 27]	5

Tabla 21. Análisis estadístico descriptivo de la DQO decantada después de calentar la muestra.

Fango	Promedio [mg O ₂ /L]	d.e. [mg O ₂ /L]	c.v. [%]	Máx. [mg O ₂ /L]	Mín. [mg O ₂ /L]	I.C. [mg O ₂ /L]	n
Fresco Filtro	5.175	-	-	5.175	5.175	-	1
Fresco Decantador	9.636	2.573	27	13.330	6.780	[12.209, 7.063]	5
Alimentación	3.922	1.310	33	5.400	1.985	[5.231, 2.612]	5
DAT	1.619	82	5	1.740	1.525	[1.701, 1.537]	5

Tabla 22. Análisis estadístico descriptivo del nitrógeno amoniacal después de calentar la muestra.

Fango	Promedio [mg N/L]	d.e. [mg N/L]	c.v. [%]	Máx. [mg N/L]	Mín. [mg N/L]	I.C. [mg N/L]	n
Fresco Filtro	71	10	14	82	64	[81, 61]	3
Fresco Decantador	270	111	41	374	120	[381, 159]	5
Alimentación	237	33	14	278	190	[270, 204]	5
DAT	697	62	9	740	590	[758, 635]	5

Tabla 23. Análisis estadístico descriptivo del calcio después de calentar la muestra.

Fango	Promedio [mg Ca ²⁺ /L]	d.e. [mg Ca ²⁺ /L]	c.v. [%]	Máx. [mg Ca ²⁺ /L]	Mín. [mg Ca ²⁺ /L]	I.C. [mg Ca ²⁺ /L]	n
Fresco Filtro	375	18	5	558	354	[393, 357]	3
Fresco Decantador	940	321	34	1494	708	[1.261, 618]	5
Alimentación	536	86	16	622	408	[621, 450]	5
DAT	264	20	7	290	236	[284, 244]	5

Tabla 24. Análisis estadístico descriptivo del fósforo total después de calentar la muestra.

Fango	Promedio [mg PO ₄ ³⁻ /L]	d.e. [mg PO ₄ ³⁻ /L]	c.v. [%]	Máx. [mg PO ₄ ³⁻ /L]	Mín. [mg PO ₄ ³⁻ /L]	I.C. [mg PO ₄ ³⁻ /L]	n
Fresco Decantador	296	71	24	393	205	[367, 225]	5
Alimentación	39	10	26	52	24	[49, 28]	5
DAT	29	1	3,7	31	28	[30, 28]	5

Tabla 25. Análisis estadístico descriptivo del fósforo reactivo después de calentar la muestra.

Fango	Promedio [mg PO ₄ ³⁻ /L]	d.e. [mg PO ₄ ³⁻ /L]	c.v. [%]	Máx. [mg PO ₄ ³⁻ /L]	Mín. [mg PO ₄ ³⁻ /L]	I.C. [mg PO ₄ ³⁻ /L]	n
Fresco Filtro	110	2	1	111	109	[111, 108]	2
Fresco Decantador	201	61	30	303	144	[262, 140]	5
Alimentación	16	2	14,6	19	13	[18, 14]	5
DAT	18	2	12,7	20	14	[20, 15]	5

7.2.2. ANÁLISIS DE VARIANZA DE LOS ENSAYOS DE CALENTAMIENTO

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	1	17328033	17328033	5486,45	0,000
Error	2	6317	3158		
Total	3	17334350			

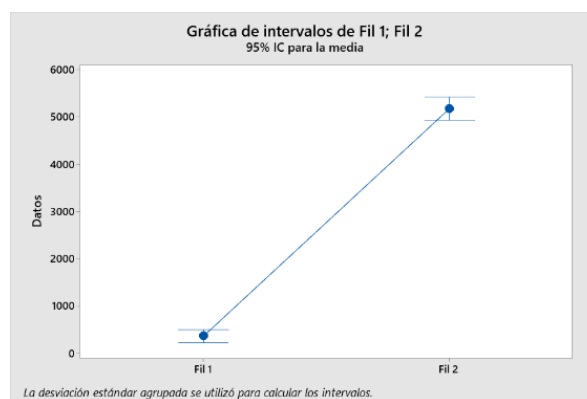


Figura 35. Análisis de varianza de la DQO del fango fresco producido en un filtro percolador antes y después de ser sometido al calentamiento.

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	1,01	0,994

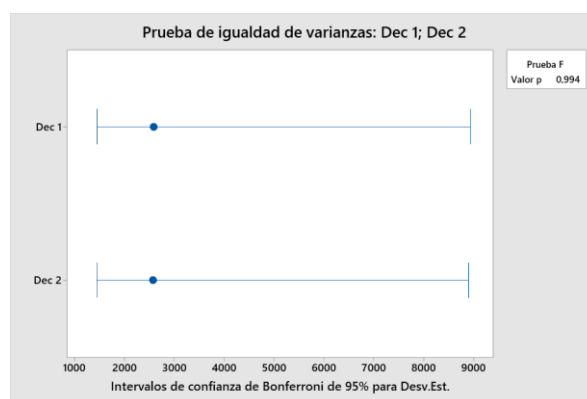


Figura 36. Prueba de igualdad de varianzas de la DQO del fango fresco procedente del decantador antes y después de ser sometido al calentamiento.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	1	33745690	33745690	5,08	0,054
Error	8	53171800	6646475		
Total	9	86917490			

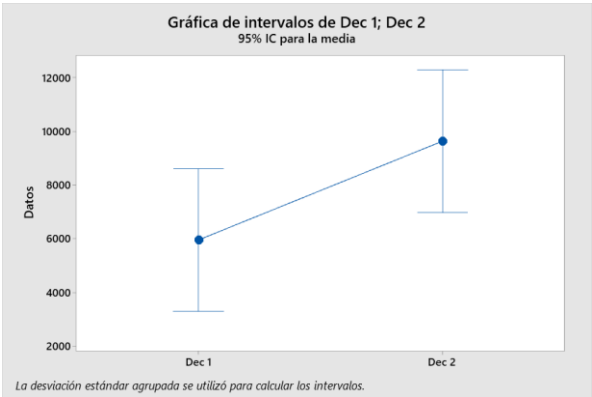


Figura 37. Análisis de varianza de la DQO del fango fresco producido en el decantador antes y después de ser sometido al calentamiento.

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	0,77	0,804

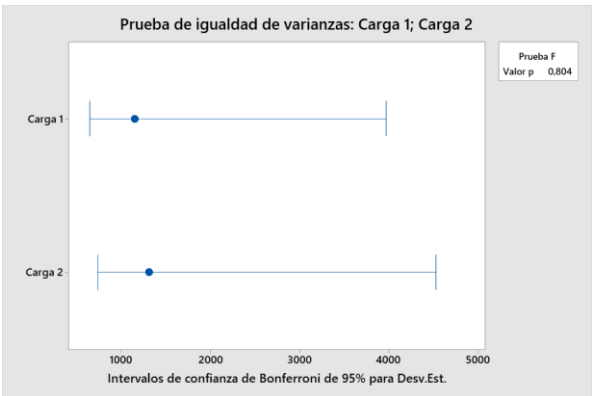


Figura 38. Prueba de igualdad de varianzas de la DQO del fango fresco procedente de alimentación a la planta piloto antes y después de ser sometido al calentamiento.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	1	3469210	3469210	2,29	0,169
Error	8	12125950	1515744		
Total	9	15595160			

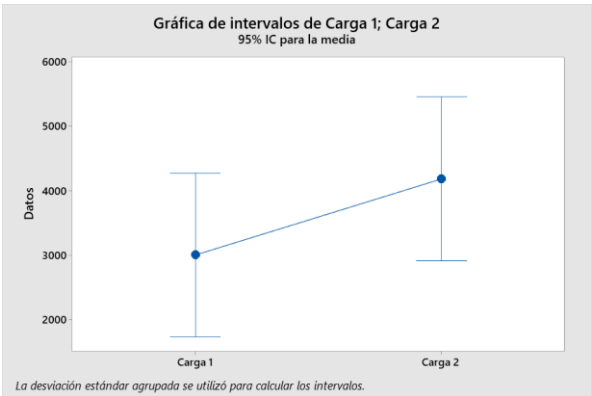


Figura 39. Análisis de varianza de la DQO del fango fresco de alimentación antes y después de ser sometido al calentamiento.

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	7,51	0,076

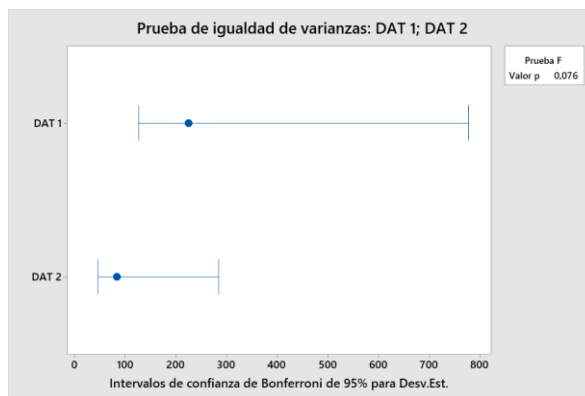


Figura 40. Prueba de igualdad de varianzas de la DQO del fango digerido en el DAT antes y después de ser sometido al calentamiento.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	1	1102	1102	0,04	0,849
Error	8	229070	28634		
Total	9	230172			

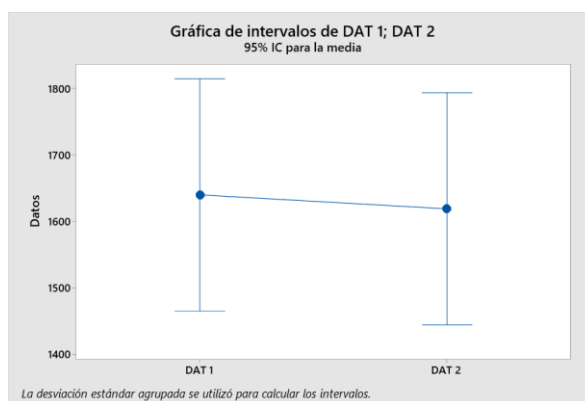


Figura 41. Análisis de varianza de la DQO del fango digerido en el DAT antes y después de ser sometido al calentamiento.

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	0,00	0,009

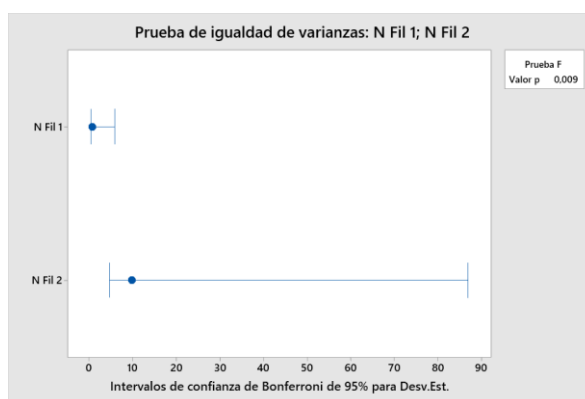


Figura 42. Prueba de igualdad de varianzas del nitrógeno amoniacal del fango fresco procedente del filtro percolador antes y después de ser sometido al calentamiento.

Fuente	GL Num	GL Den	Valor F	Valor p
Factor	1	2,01781	68,99	0,014

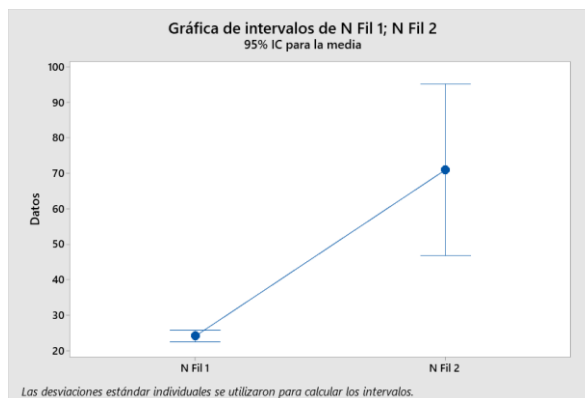


Figura 43. Prueba de Welch para el nitrógeno amoniacal del fango producido en el filtro percolador antes y después de ser sometido al calentamiento.

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	1,07	0,951

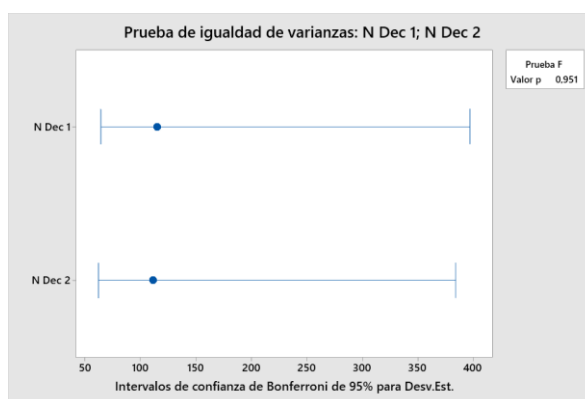


Figura 44. Prueba de igualdad de varianzas del nitrógeno amoniacal del fango fresco procedente del decantador antes y después de ser sometido al calentamiento.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	1	6200	6200	0,49	0,505
Error	8	101991	12749		
Total	9	108191			

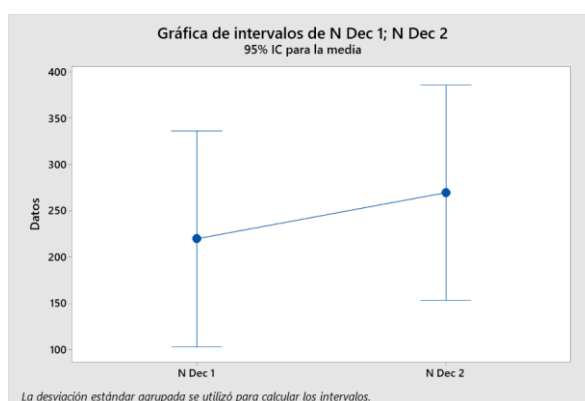


Figura 45. Análisis de varianza del nitrógeno amoniacal del fango fresco producido en el decantador antes y después de ser sometido al calentamiento.

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	0,82	0,854

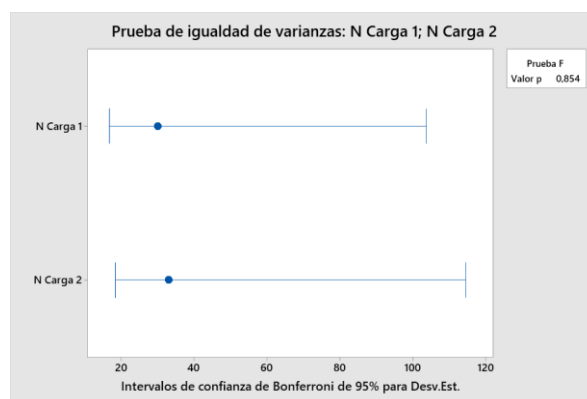


Figura 46. Prueba de igualdad de varianzas del nitrógeno amoniacal del fango fresco de alimentación antes y después de ser sometido al calentamiento.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	1	5336	5336,1	5,35	0,049
Error	8	7980	997,5		
Total	9	13316			

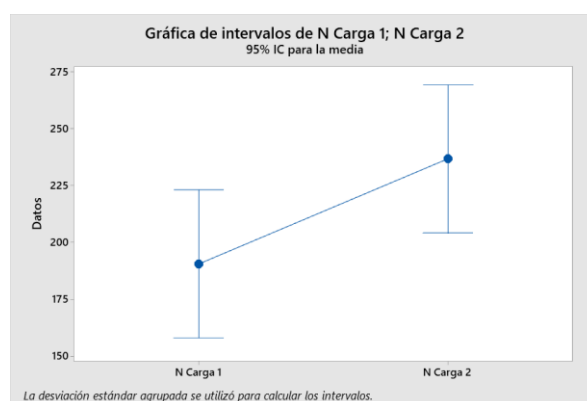


Figura 47. Análisis de varianza del nitrógeno amoniacal del fango fresco de alimentación antes y después de ser sometido al calentamiento.

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	0,07	0,022

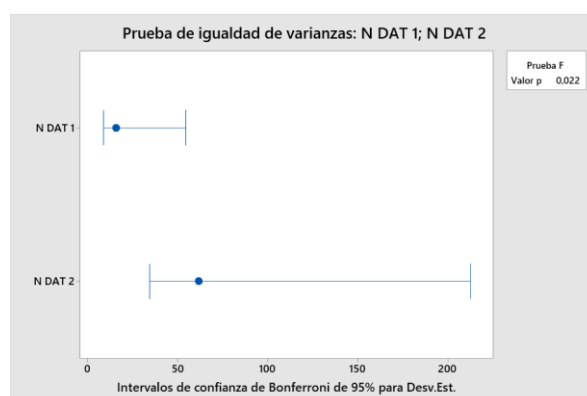


Figura 48. Prueba de igualdad de varianzas del nitrógeno amoniacal del fango digerido en el DAT antes y después de ser sometido al calentamiento.

Fuente	GL Num	GL Den	Valor F	Valor p
Factor	1	4,52427	1,77	0,246

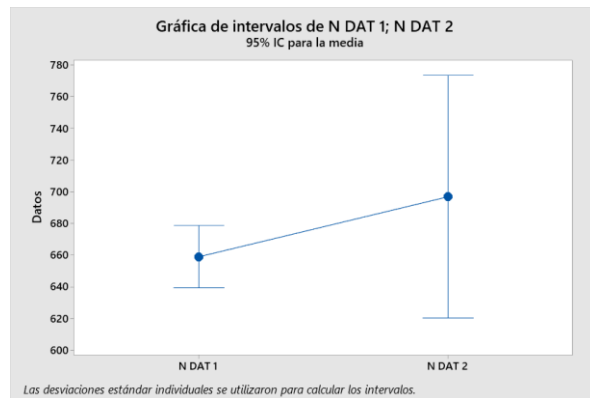


Figura 49. Análisis de varianza del nitrógeno amoniacal del fango digerido en el DAT antes y después de ser sometido al calentamiento.

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	0,55	0,711

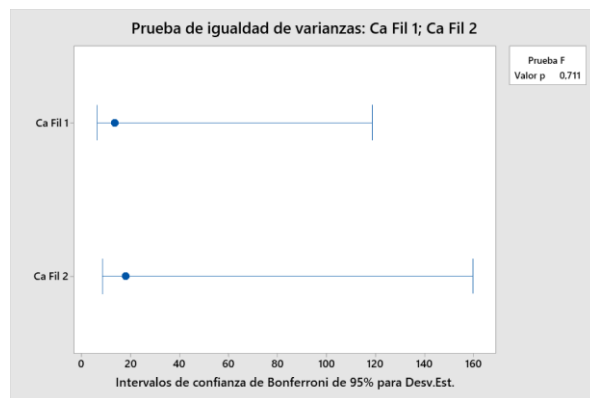


Figura 50. Prueba de igualdad de varianzas del calcio del fango fresco procedente del filtro percolador antes y después de ser sometido al calentamiento.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	1	962,7	962,7	3,86	0,121
Error	4	997,3	249,3		
Total	5	1960,0			

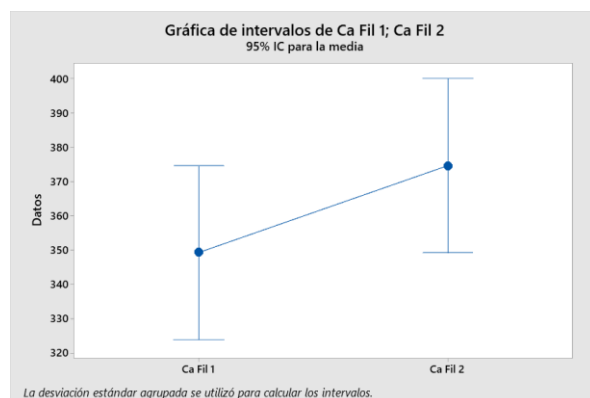


Figura 51. Análisis de varianza del calcio del fango fresco producido en el filtro percolador antes y después de ser sometido al calentamiento.

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	3,46	0,256

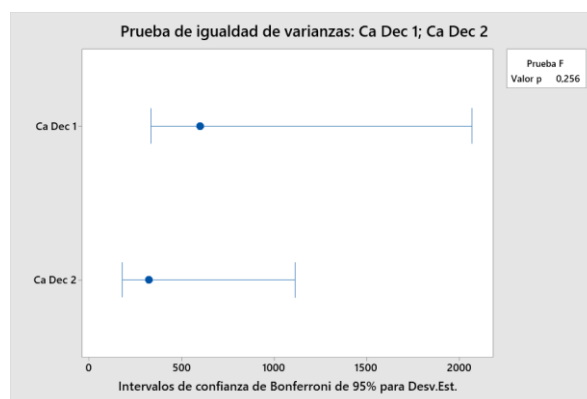


Figura 52. Prueba de igualdad de varianzas del calcio del fango fresco procedente del decantador antes y después de ser sometido al calentamiento.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	1	247118	247118	1,07	0,331
Error	8	1843459	230432		
Total	9	2090578			

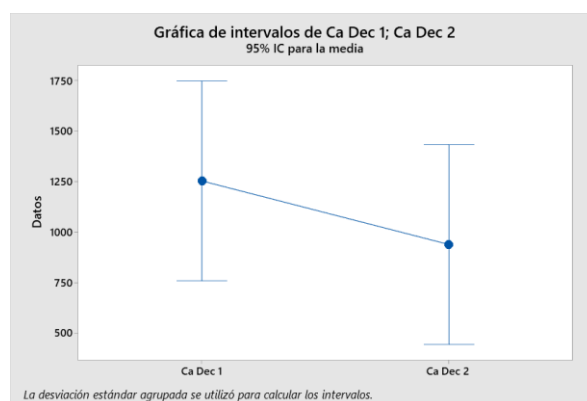


Figura 53. Análisis de varianza del calcio del fango fresco producido en el decantador antes y después de ser sometido al calentamiento.

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	1,95	0,532

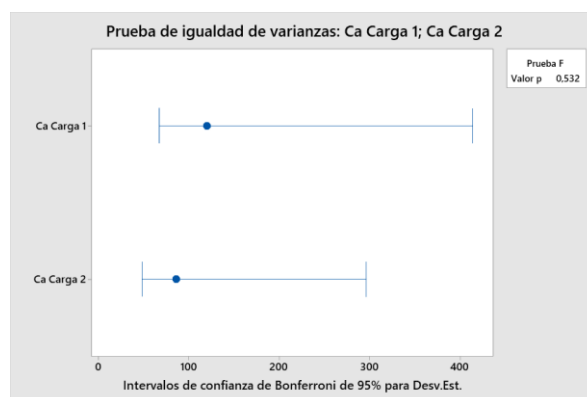


Figura 54. Prueba de igualdad de varianzas del calcio del fango fresco de alimentación antes y después de ser sometido al calentamiento.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	1	64000	64000	5,90	0,041
Error	8	86742	10843		
Total	9	150742			

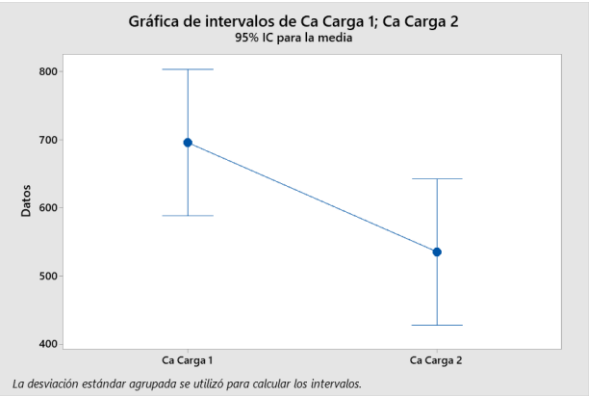


Figura 55. Análisis de varianza del calcio del fango fresco de alimentación antes y después de ser sometido al calentamiento.

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	4,50	0,174

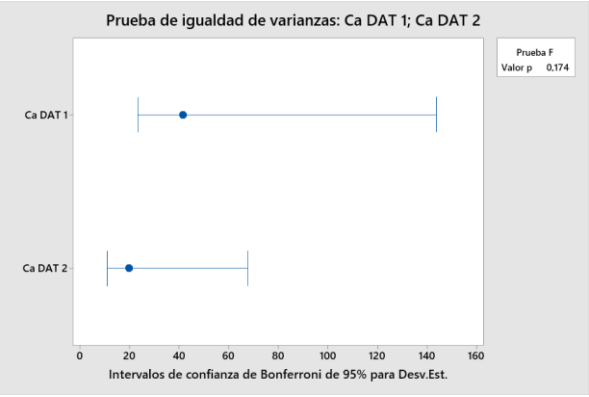


Figura 56. Prueba de igualdad de varianzas del calcio del fango digerido en el DAT antes y después de ser sometido al calentamiento.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	1	21902	21902	20,75	0,002
Error	8	8443	1055		
Total	9	30346			

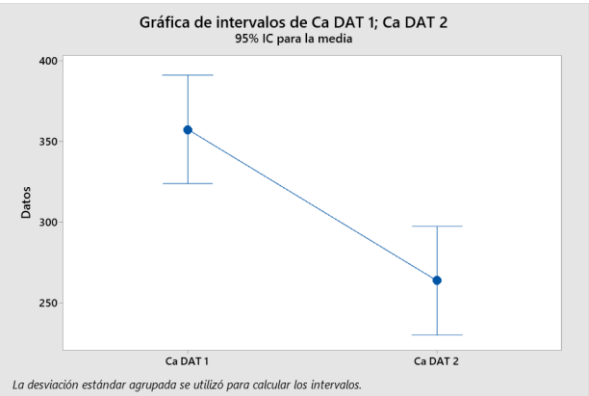


Figura 57. Análisis de varianza del calcio del fango digerido en el DAT antes y después de ser sometido al calentamiento.

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	1,11	0,923

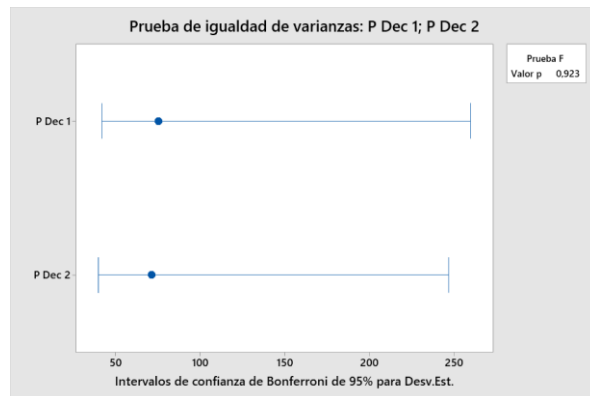


Figura 58. Prueba de igualdad de varianzas del fósforo total del fango fresco procedente del decantador antes y después de ser sometido al calentamiento.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	1	682,6	682,6	0,13	0,730
Error	8	42853,5	5356,7		
Total	9	43536,1			

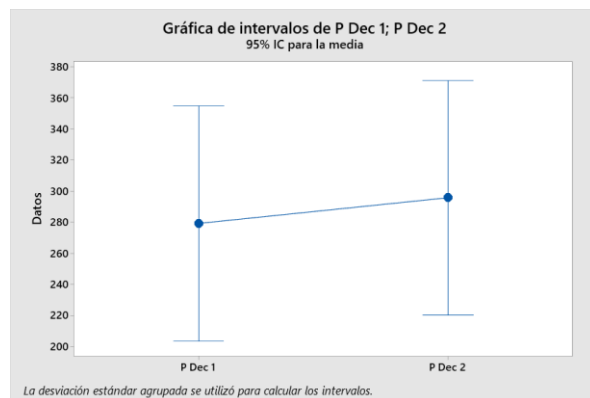


Figura 59. Análisis de varianza del fósforo total del fango fresco producido en el decantador antes y después de ser sometido al calentamiento.

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	5,26	0,137

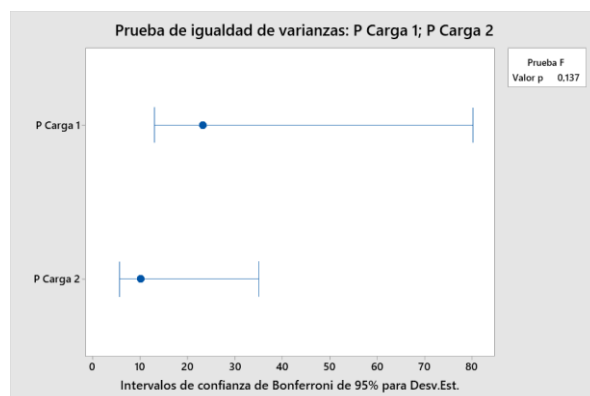


Figura 60. Prueba de igualdad de varianzas del fósforo total del fango fresco de alimentación antes y después de ser sometido al calentamiento.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	1	3658	3657,7	11,43	0,010
Error	8	2560	320,0		
Total	9	6218			

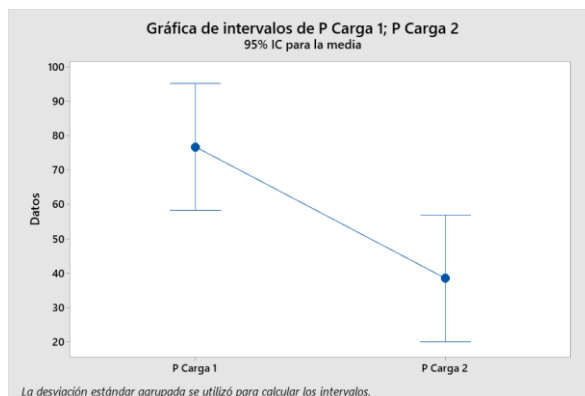


Figura 61. Análisis de varianza del fósforo total del fango fresco de alimentación antes y después de ser sometido al calentamiento.

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	15,40	0,021

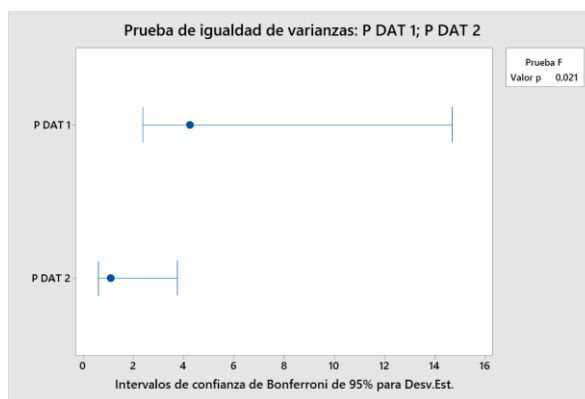


Figura 62. Prueba de igualdad de varianzas del fósforo total del fango digerido en el DAT antes y después de ser sometido al calentamiento.

Fuente	GL Num	GL Den	Valor F	Valor p
Factor	1	4,51730	58,56	0,001

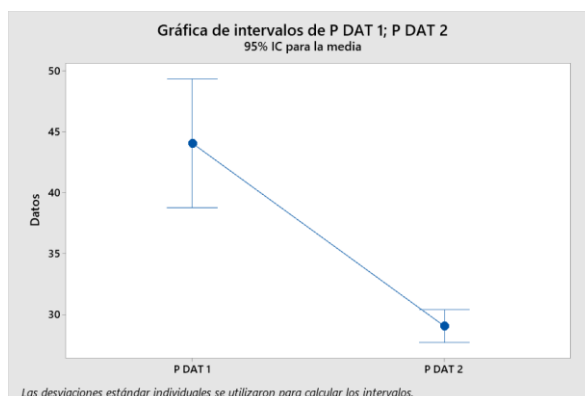


Figura 63. Prueba de Welch del fósforo total del fango digerido en el DAT antes y después de ser sometido al calentamiento.

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	0,05	0,101

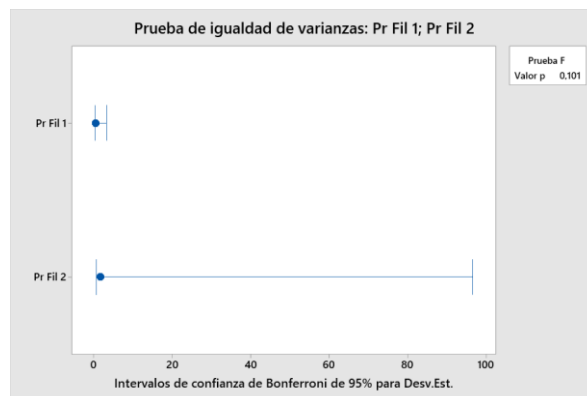


Figura 64. Prueba de igualdad de varianzas del fósforo reactivo del fango fresco procedente del filtro percolador antes y después de ser sometido al calentamiento.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	1	8060,34	8060,34	9505,95	0,000
Error	3	2,54	0,85		
Total	4	8062,88			

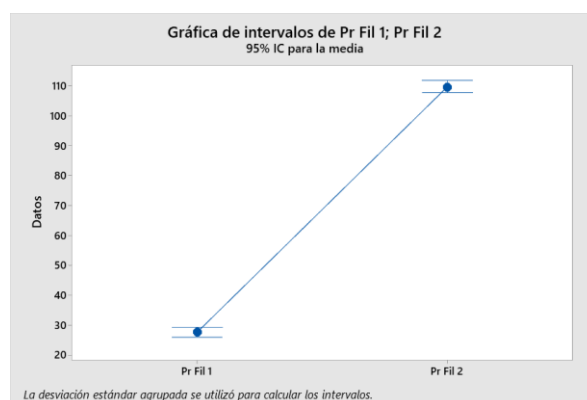


Figura 65. Análisis de varianza del fósforo reactivo del fango fresco producido en el filtro percolador antes y después de ser sometido al calentamiento.

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	1,50	0,703

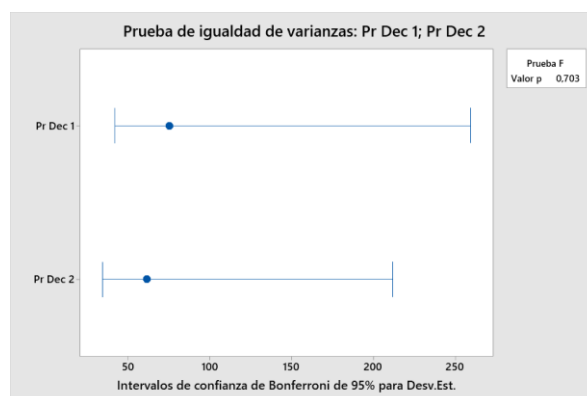


Figura 66. Prueba de igualdad de varianzas del fósforo reactivo del fango fresco procedente del decantador antes y después de ser sometido al calentamiento.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	1	3835	3835	0,82	0,392
Error	8	37495	4687		
Total	9	41330			

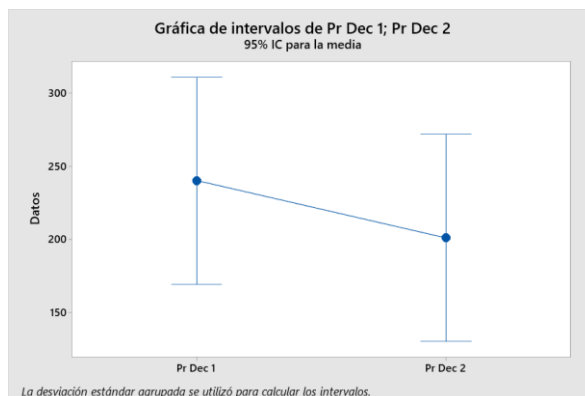


Figura 67. Análisis de varianza del fósforo reactivo del fango fresco producido en el decantador antes y después de ser sometido al calentamiento.

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	95,64	0,001

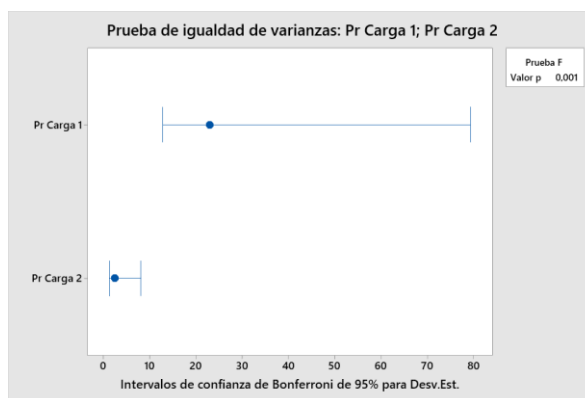


Figura 68. Prueba de igualdad de varianzas del fósforo reactivo del fango fresco de alimentación antes y después de ser sometido al calentamiento.

Fuente	GL Num	GL Den	Valor F	Valor p
Factor	1	4,08363	12,04	0,025

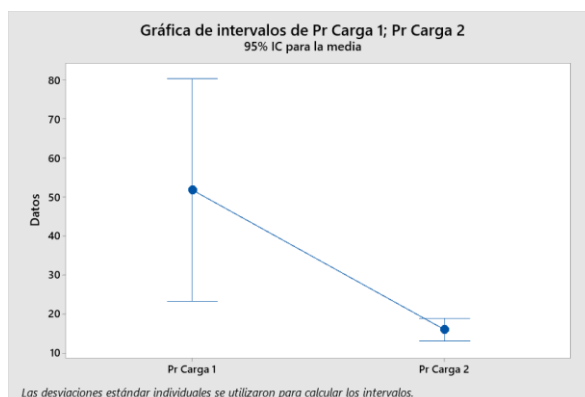


Figura 69. Prueba de Welch del fósforo reactivo del fango fresco de alimentación antes y después de ser sometido al calentamiento.

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	0,52	0,536

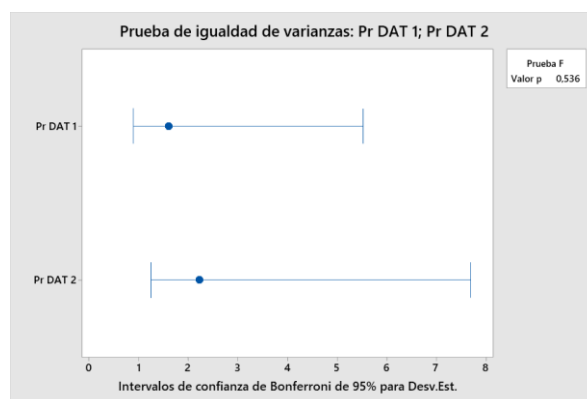


Figura 70. Prueba de igualdad de varianzas del fósforo reactivo del fango digerido en el DAT antes y después de ser sometido al calentamiento.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	1	327,44	327,436	87,42	0,000
Error	8	29,96	3,745		
Total	9	357,40			

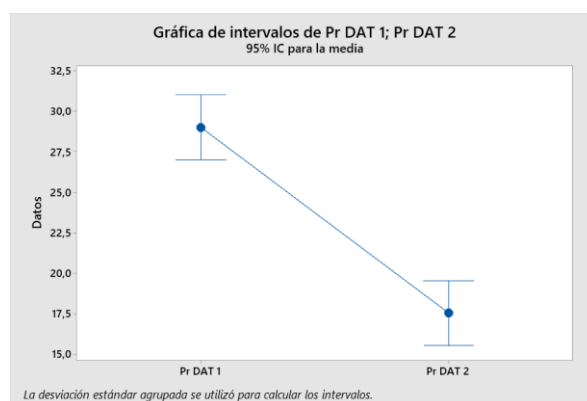


Figura 71. Análisis de varianza del fósforo reactivo del fango digerido en el DAT antes y después de ser sometido al calentamiento.

7.2.3. ANÁLISIS DE VARIANZA DE LOS ENSAYOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA TERMÓFILA

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	26,05	0,008

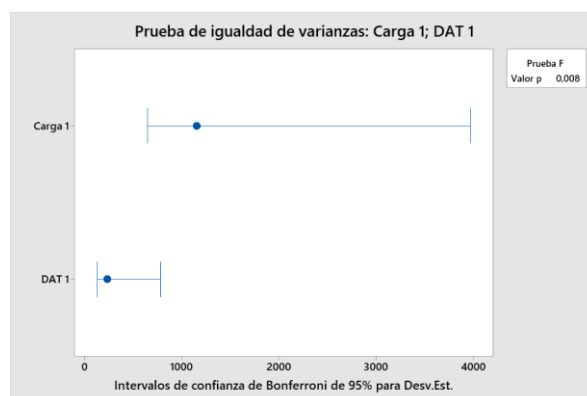


Figura 72. Prueba de igualdad de varianzas de la DQO del fango fresco antes y después de la digestión anaerobia termófila.

Fuente	GL Num	GL Den	Valor F	Valor p
Factor	1	4,30669	6,81	0,055

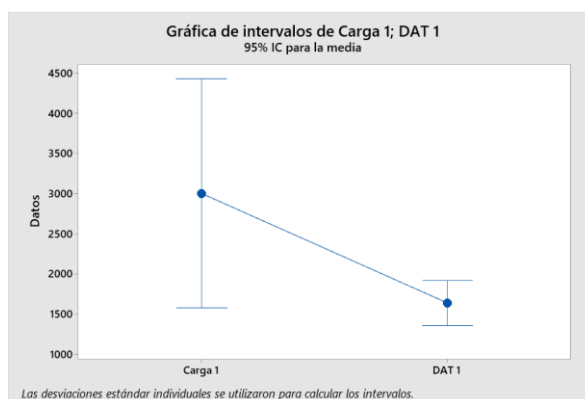


Figura 73. Prueba de Welch de la DQO del fango fresco antes y después de la digestión anaerobia termófila.

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	3,61	0,241

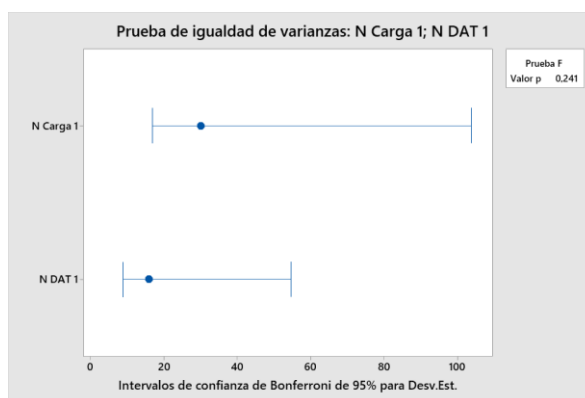


Figura 74. Prueba de igualdad de varianzas del nitrógeno amoniacal del fango fresco antes y después de la digestión anaerobia termófila.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	1	548496	548496	954,90	0,000
Error	8	4595	574		
Total	9	553092			

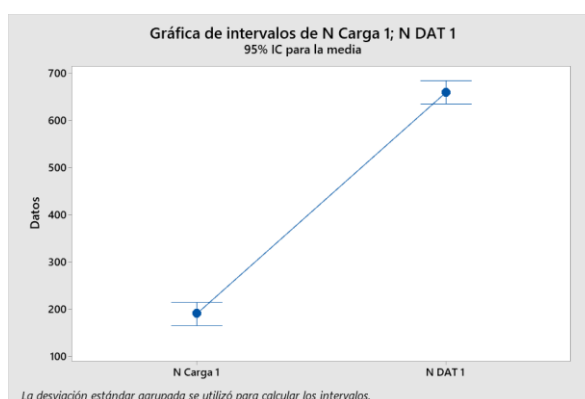


Figura 75. Análisis de varianza del nitrógeno amoniacal del fango fresco antes y después de la digestión anaerobia termófila.

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	8,31	0,064

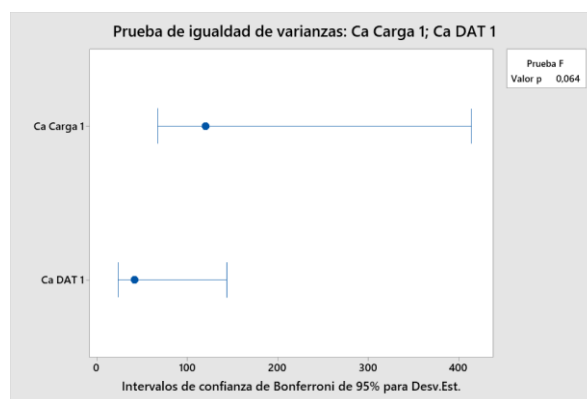


Figura 76. Prueba de igualdad de varianzas del calcio del fango fresco antes y después de la digestión anaerobia termófila.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	1	285610	285610	35,54	0,000
Error	8	64294	8037		
Total	9	349904			

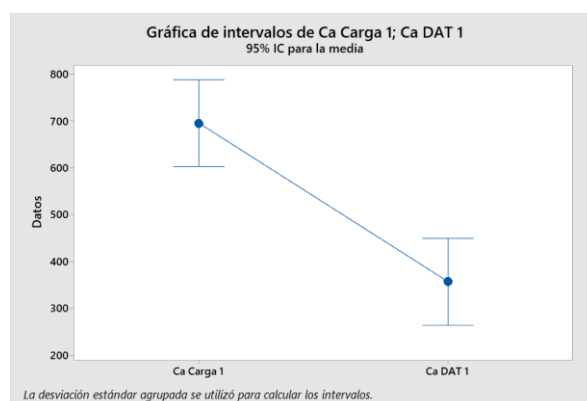


Figura 77. Análisis de varianza del calcio del fango fresco antes y después de la digestión anaerobia termófila.

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	29,83	0,006

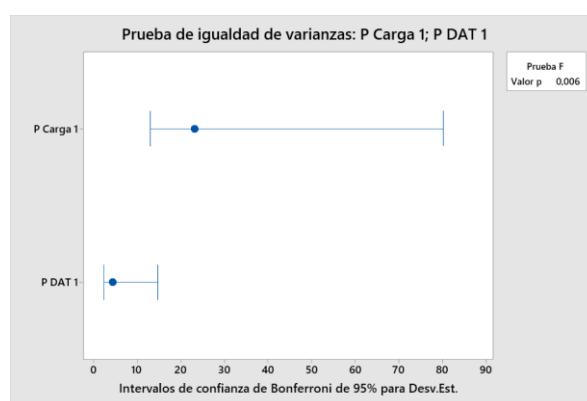


Figura 78. Prueba de igualdad de varianzas del fósforo total del fango fresco antes y después de la digestión anaerobia termófila.

Fuente	GL Num	GL Den	Valor F	Valor p
Factor	1	4,26787	9,65	0,033

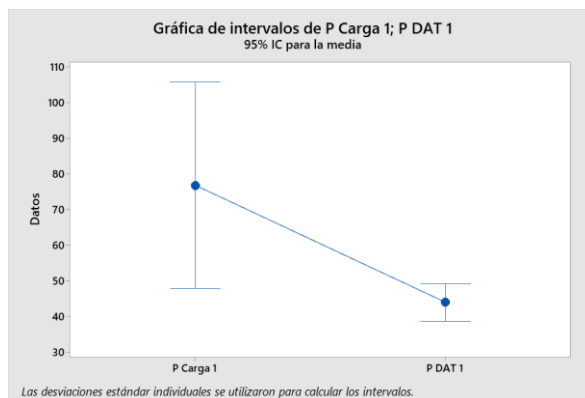


Figura 79. Prueba de Welch del fósforo total del fango fresco antes y después de la digestión anaerobia termófila.

Método	Estadística de prueba	Valor p
F	206,65	0,000

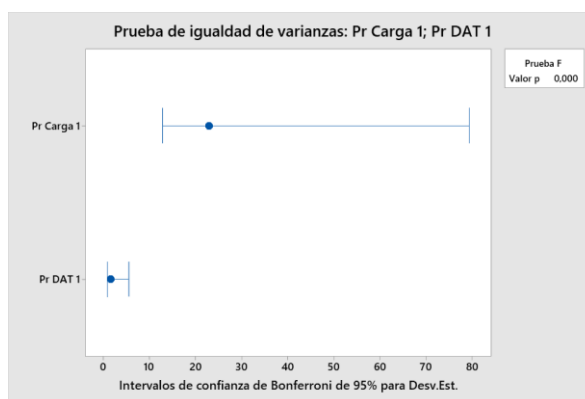


Figura 80. Prueba de igualdad de varianzas del fósforo reactivo del fango fresco antes y después de la digestión anaerobia termófila.

Fuente	GL Num	GL Den	Valor F	Valor p
Factor	1	4,03871	4,93	0,090

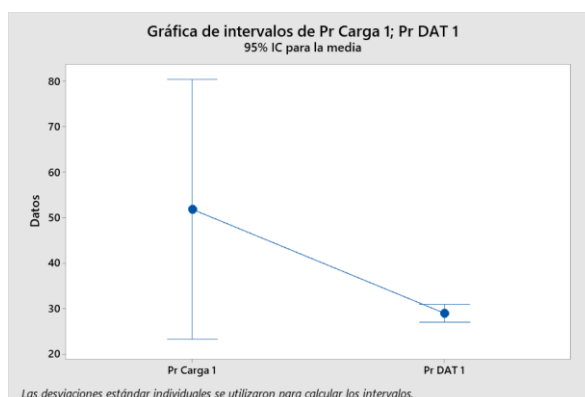


Figura 81. Prueba de Welch del fósforo reactivo del fango fresco antes y después de la digestión anaerobia termófila.

7.2.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DESCRIPTIVO DE LOS DATOS DEL ESCENARIO 1

Tabla 26. Análisis estadístico descriptivo del fósforo total contenido en los fangos de las EDARs incluidas en el Escenario 1.

EDAR	Promedio [mg PO ₄ ³⁻ /L]	d.e. [mg PO ₄ ³⁻ /L]	c.v. [%]	Máx. [mg PO ₄ ³⁻ /L]	Mín. [mg PO ₄ ³⁻ /L]	I.C. [mg PO ₄ ³⁻ /L]	n
Tudela	71	19	26	106	31	[90, 52]	15
EDAR 1	98	46	47	179	32	[144, 52]	7
EDAR 2	475	90	19	643	375	[565, 385]	7
EDAR 3	129	52	41	210	70	[181, 77]	11
EDAR 4	58	16	28	179	32	[75, 42]	9
EDAR 5	291	36	12	346	257	[328, 255]	5
EDAR 6	292	65	22	402	196	[356, 227]	12

Tabla 27. Análisis estadístico descriptivo del fósforo reactivo contenido en los fangos de las EDAR incluidas en el Escenario 1.

EDAR	Promedio [mg PO ₄ ³⁻ /L]	d.e. [mg PO ₄ ³⁻ /L]	c.v. [%]	Máx. [mg PO ₄ ³⁻ /L]	Mín. [mg PO ₄ ³⁻ /L]	I.C. [mg PO ₄ ³⁻ /L]	n
Tudela	44	13	30	70	25	[57, 31]	15
EDAR 1	87	47	54	179	32	[134, 40]	7
EDAR 2	419	117	28	643	263	[536, 302]	7
EDAR 3	106	51	48	194	26	[157, 56]	11
EDAR 4	49	18	38	179	32	[67, 30]	9
EDAR 5	254	153	60	340	118	[407, 101]	5
EDAR 6	234	59	25	352	156	[293, 175]	12

Tabla 28. Análisis estadístico descriptivo del porcentaje de ortofosfatos contenidos en el fósforo total de los fangos de las EDARs incluidas en el Escenario 1.

EDAR	Promedio [%]	d.e. [%]	c.v. [%]	Máx. [%]	Mín. [%]	I.C. [%]	n
Tudela	63	14	22	100	40	[77, 49]	15
EDAR 1	88	10	11	100	75	[98, 79]	7
EDAR 2	88	16	18	100	54	[100, 72]	7
EDAR 3	87	25	29	100	13	[100, 62]	11
EDAR 4	85	22	26	100	75	[100, 63]	9
EDAR 5	86	22	26	98	46	[100, 63]	5
EDAR 6	81	15	19	100	55	[97, 66]	12

7.2.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DESCRIPTIVO DE LOS DATOS DEL ESCENARIO 2

Tabla 29. Análisis estadístico descriptivo del fósforo total contenido en los fangos de las EDARs incluidas en el Escenario 2.

EDAR	Promedio [mg PO ₄ ³⁻ /L]	d.e. [mg PO ₄ ³⁻ /L]	c.v. [%]	Máx. [mg PO ₄ ³⁻ /L]	Mín. [mg PO ₄ ³⁻ /L]	I.C. [mg PO ₄ ³⁻ /L]	n
EDAR 7	107	5	5	112	99	[113, 102]	4
EDAR 8	129	33	26	194	75	[162, 96]	3
EDAR 9	93	14	15	113	81	[107, 79]	4
EDAR 10	239	16	7	269	222	[256, 223]	6
EDAR 11	27	14	53	49	9	[41, 12]	9
EDAR 12	489	103	21	655	384	[592, 386]	5
EDAR 13	401	118	29	584	228	[518, 283]	7
EDAR 14	139	53	38	202	77	[193, 86]	4
EDAR 15	322	29	9	363	285	[351, 293]	8
EDAR 16	629	192	31	903	306	[821, 437]	8
EDAR 17	126	20	16	151	106	[147, 106]	4

Tabla 30. Análisis estadístico descriptivo del fósforo reactivo contenido en los fangos de las EDARs incluidas en el Escenario 1.

EDAR	Promedio [mg PO ₄ ³⁻ /L]	d.e. [mg PO ₄ ³⁻ /L]	c.v. [%]	Máx. [mg PO ₄ ³⁻ /L]	Mín. [mg PO ₄ ³⁻ /L]	I.C. [mg PO ₄ ³⁻ /L]	n
EDAR 7	99	5	5	103	92	[104, 94]	4
EDAR 8	104	33	32	138	72	[137, 71]	3
EDAR 9	78	5	6	84	73	[83, 74]	4
EDAR 10	224	15	6	239	199	[239, 210]	6
EDAR 11	14	6	42	23	8	[19, 8]	9
EDAR 12	399	146	37	575	181	[545, 254]	5
EDAR 13	332	131	39	490	191	[463, 201]	7
EDAR 14	117	60	52	185	47	[177, 56]	4
EDAR 15	288	29	10	321	245	[317, 259]	8
EDAR 16	543	198	37	820	222	[742, 345]	8
EDAR 17	107	11	10	121	95	[118, 96]	4

Tabla 31. Análisis estadístico descriptivo del porcentaje de ortofosfatos contenidos en el fósforo total de los fangos de las EDARs incluidas en el Escenario 2.

EDAR	Promedio [%]	d.e. [%]	c.v. [%]	Máx. [%]	Mín. [%]	I.C. [%]	n
EDAR 7	93	8	8	100	82	[100, 85]	4
EDAR 8	85	13	15	96	71	[97, 72]	3
EDAR 9	85	12	14	95	69	[97, 73]	4
EDAR 10	94	6	6	100	86	[100, 88]	6
EDAR 11	58	22	38	89	29	[80, 36]	9
EDAR 12	80	20	25	100	47	[100, 60]	5
EDAR 13	82	17	21	98	50	[100, 65]	7
EDAR 14	80	14	18	92	62	[94, 66]	4
EDAR 15	90	3	4	95	86	[93, 86]	8
EDAR 16	85	9	11	100	73	[94, 75]	8
EDAR 17	86	9	11	91	72	[95, 76]	4

7.3. ANEXO III – DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE LA CARGA SÓLIDA A TRATAR

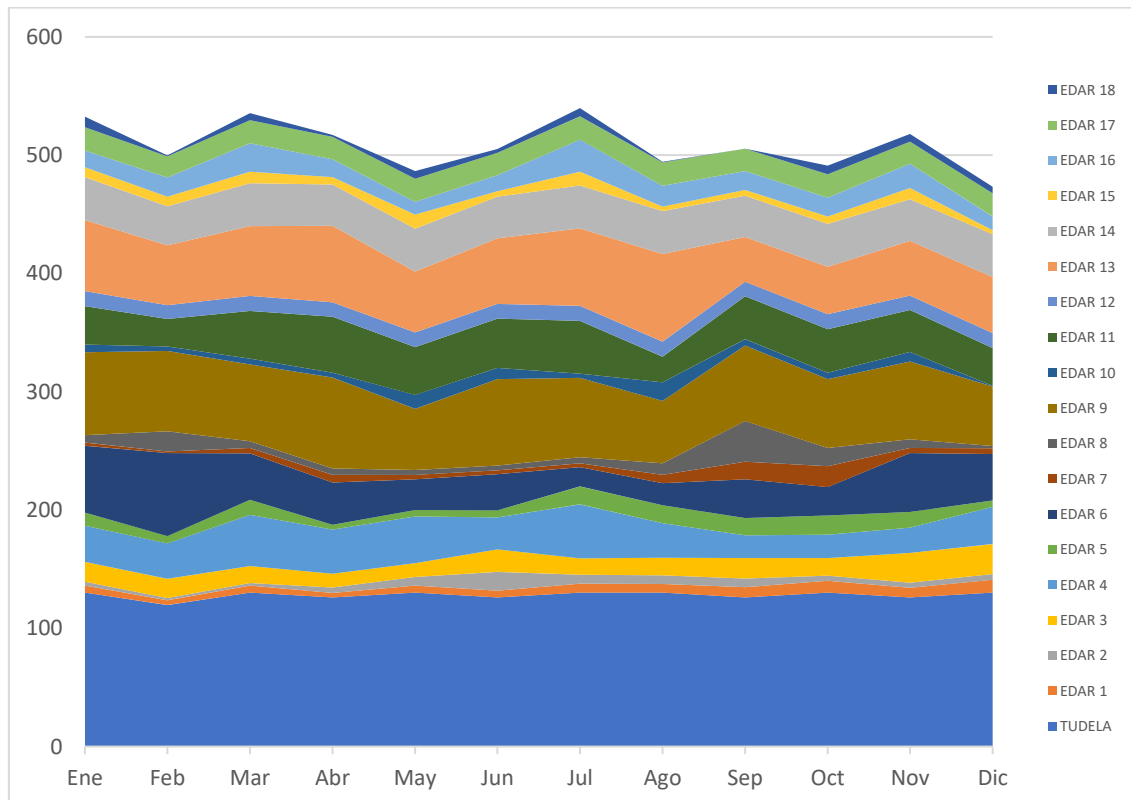


Figura 82. Distribución mensual de la carga sólida contenida en los fangos a tratar en el Escenario 2.