



Gobierno de Navarra
Nafarroako Gobernua



Mancomunidad
Comarca de Pamplona
Iruñerriko
Mankomunitatea



MEMBER OF
BASQUE RESEARCH
& TECHNOLOGY ALLIANCE

INFORME FINAL DE PROYECTO

Estudio por simulación de potenciales nuevos escenarios en la EDAR de Arazuri.

Cód. Documento: MT / 03-000187 / R 00

CONFIDENCIAL

Donostia-San Sebastián

ELABORADO

Eduardo Ayesa

Sofía Jaray

Fecha: 01/03/2024

ÍNDICE

RESUMEN	3
ABSTRACT	4
1. INTRODUCCIÓN y ANTECEDENTES.....	5
2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO.....	6
3. PLAN DE TRABAJO	6
4. RESULTADOS y DISCUSIONES	7
4.1. Análisis por simulación de la configuración de planta	7
4.1.1. Construcción del modelo matemático en la plataforma de simulación WEST.	7
4.2. Características del retorno de digestión anaerobia	7
4.2.1. Calibración y validación del modelo matemático de la EDAR de Arazuri	8
4.2.1.1. Escenario de operación 2014 - 2015	8
4.2.1.2. Escenario de operación 2022	11
4.3. Análisis por simulación de escenarios de operación.....	13
4.3.1. Características de los escenarios de operación	13
4.3.1.1. Efecto del control de purga	15
4.3.1.2. Efecto del control de OD	15
4.3.1.3. Efecto de la dosificación de MO	16
4.3.1.1. Efecto de la precipitación de estruvita de MO.....	17
5. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO	18
6. BIBLIOGRAFÍA.....	19
ANEXO I. VALORES MEDIOS DE CONCENTRACIÓN EFLUENTE	20
ANEXO II. CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DE UN AGUA BRUTA	24

RESUMEN

En los últimos años, se está produciendo un creciente impulso en el desarrollo y aplicación de herramientas de simulación dinámica como apoyo al diseño, el dimensionamiento y la operación de las Estaciones Depuradoras de Agua Residual (EDAR). Este desarrollo responde a la necesidad de nuevas tecnologías y configuraciones de planta cada vez más complejas, así como a la aplicación de una legislación europea cada vez más estricta que exige estándares de eficiencia y sostenibilidad más rigurosos. Los modelos matemáticos y herramientas de simulación permiten analizar con fiabilidad el comportamiento dinámico de la EDAR en su globalidad de forma precisa. Sin embargo, la adecuada utilización de estas herramientas para predecir el comportamiento dinámico de las EDAR requiere una metodología de trabajo sistemática y rigurosa que garantice la validez de los resultados.

NILSA y Ceit colaboran en el marco del Proyecto LIFE16 IPC/ES/000001: “LIFE IP NADAPTA-CC - Towards an integrated, coherent and inclusive implementation of Climate Change Adaptation policy in a region: Navarre”, en una línea de proyectos de I+D+i orientados a conocer en profundidad los mecanismos de funcionamiento de una larga lista de tecnologías de tratamiento de aguas residuales, utilizando para ello herramientas de modelado matemático.

Para analizar el comportamiento de la EDAR de Arazuri considerando factores que podrían comprometer el rendimiento del tratamiento de la planta, este trabajo ha permitido construir una primera versión del modelo matemático de la EDAR. Este modelo, a pesar, de no incluir las unidades de digestión anaerobia ha permitido analizar el efecto de las características del retorno de digestión en el rendimiento del tratamiento biológico de la EDAR, y evaluar alternativas operacionales para cumplir con requerimiento 6 mg/L de nitrógeno total efluente.

ABSTRACT

Nowadays, there has been increasing interest on the development and application of dynamic simulation tools to support the design, sizing, and operation of Wastewater Treatment Plants (WWTP). This trend is driven by the need of applying new technologies and increasingly complex plant configurations, to respond to a stricter European legislation that demands higher standards of efficiency and sustainability. Mathematical models and simulation tools enable a reliable analysis of the overall dynamic behaviour of the WWTP with precision. However, the proper use of these tools to predict the dynamic behaviour of WWTPs requires a systematic and rigorous methodology to ensure the validity of the results.

NILSA and Ceit are collaborating within the framework of the Project LIFE16 IPC/ES/000001: "LIFE IP NADAPTA-CC - Towards an integrated, coherent, and inclusive implementation of Climate Change Adaptation policy in a region: Navarre." on a line of R&D projects aimed to thoroughly understanding the mechanisms of a wide range of wastewater treatment technologies using advanced mathematical modelling tools.

To analyse the behaviour of the Arazuri WWTP considering factors that could compromise the plant's treatment performance, this work has enabled the construction of a first version of the mathematical model of the plant. Despite not including the anaerobic digestion units, this model has allowed for the analysis of the effect of digestion return characteristics on the biological treatment performance of the WWTP and the evaluation of operational alternatives to meet the requirement of 6 mg/L of total effluent nitrogen.

1. INTRODUCCIÓN y ANTECEDENTES

En los últimos años se está produciendo un creciente impulso en el desarrollo y aplicación de herramientas de simulación dinámica como apoyo al diseño, el dimensionamiento y la operación de las EDAR. Los simuladores integrales de la EDAR son una herramienta de gran utilidad para predecir los efectos interrelacionados de cada variable operacional y seleccionar los puntos de operación más adecuados a cada escenario de trabajo. Sin embargo, su adecuada utilización requiere de una metodología de trabajo sistemática y rigurosa que garantice la validez de los resultados. El centro tecnológico Ceit es una entidad de referencia en la realización de proyectos de I+D+i y estudios de simulación orientados a optimizar el diseño, la operación y el control automático de EDARs avanzadas (Apartado 6 de este documento).

En el marco del Proyecto LIFE16 IPC/ES/000001: "LIFE IP NADAPTA-CC - Towards an integrated, coherent and inclusive implementation of Climate Change Adaptation policy in a region: Navarre", NILSA y Ceit están colaborando en una línea de proyectos de I+D+i orientados a conocer en profundidad los mecanismos de funcionamiento de una larga lista de tecnologías de tratamiento de aguas residuales, convencionales y novedosas, y a optimizar su diseño y operación, utilizando para ello herramientas avanzadas de modelado matemático y simulación dinámica.

Para analizar el comportamiento de la EDAR de Arazuri considerando factores que podrían comprometer el rendimiento del tratamiento de la planta (variación de las características del agua de entrada, incorporación de nuevas tecnologías al tratamiento de lodos...), y como respuesta a una legislación europea cada vez más estricta, Ceit y NILSA plantean el desarrollo y aplicación de un nuevo modelo integral de la EDAR para analizar alternativas de operación de la planta a partir de índices de rendimiento de depuración y coste operacional (calidad efluente, aireación, producción de lodos y producción de biogás...). En este proyecto se construirá una primera versión del modelo matemático de la EDAR sin unidades de digestión anaerobia, que permitirá analizar el efecto de las características del retorno de digestión en el rendimiento del tratamiento biológico de la EDAR, y evaluar alternativas operacionales para cumplir con requerimiento 6 mg/L de nitrógeno total efluente.

2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

El estudio propuesto tiene como objetivo analizar mediante simulaciones el comportamiento de la EDAR de Arazuri para los siguientes escenarios:

- Análisis por simulación del efecto producido en la línea de aguas por la posible modificación de condiciones mesófilas a termófilas en los digestores anaerobios de lodos de la EDAR. Efecto en los costes de aireación de los reactores biológicos.
- Análisis por simulación de la viabilidad de posibles alternativas operacionales encaminadas a reducir la concentración efluente de nitrógeno total. Posibilidades de la EDAR para alcanzar una concentración de 6.0 mgN/l de Nitrógeno Total.

3. PLAN DE TRABAJO

Para el estudio se partirá de los modelos y resultados de simulación obtenidos en anteriores trabajos de simulación realizados por el Ceit en la EDAR de Arazuri. Sin embargo, será necesario un trabajo previo de actualización del modelo matemático de la EDAR para su posterior utilización en la versión actual de la plataforma de simulación WEST.

El estudio tendrá una duración total de 4 semanas.

4. RESULTADOS y DISCUSIONES

4.1. Análisis por simulación de la configuración de planta

4.1.1. Construcción del modelo matemático en la plataforma de simulación WEST.

La configuración de planta construida en la plataforma de simulación WEST® (www.mikebydhi.com) para la EDAR de Arazuri se muestra en la Figura 4.1. Para preparar el modelo y describir el funcionamiento de la EDAR de Arazuri se ha utilizado un modelo matemático propio de Ceit basado en el modelo ASM2d (Henze *et al.*, 2000) de la asociación internacional del agua (IWA).

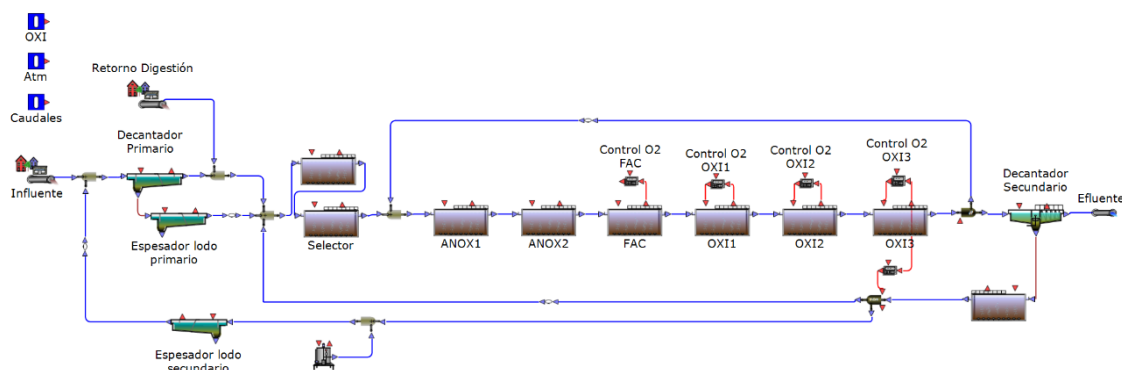


Figura 4.1 Diagrama esquemático de la configuración de la línea de aguas del modelo de la EDAR de Arazuri

Como se ve en la Figura 4.1, está simulada conjuntamente la línea de aguas y la línea de lodos sin digestores. Con el fin de cumplir con uno de los principales objetivos del estudio, evaluar el efecto producido en la línea de aguas por la posible modificación de condiciones mesófilas a termófilas en los digestores, se ha establecido una entrada externa de retornos de digestión. No se ha simulado el pretratamiento por considerar, en general, su efecto en los resultados finales mínimo o no representativo. Se ha simulado una única línea que considerará el volumen total. De esta manera, el tratamiento secundario estará formado por dos selectores anaerobios, dos reactores anóxicos, uno facultativo y tres óxicos, un decantador primario y un decantador secundario. En cuanto a la línea de lodos, se han simulado un espesador de lodo, y una unidad de deshidratación.

4.2. Características del retorno de digestión anaerobia

Como se ha mencionado previamente en este informe, el modelo matemático construido en el estudio no incluye los digestores anaerobios de la EDAR de Arazuri. Para reproducir el efecto de retorno se ha definido una entrada de externa de los mismos. Las características del agua de retorno de la digestión anaerobia fueron aportadas por NILSA y se encuentra recogida en la Tabla .

Tabla 1 Características de fango de Arazuri, fresco y tratado con digestión anaerobio mesófila y termófila, utilizado para la elaboración del perfil de entrada de retorno.

<i>Parámetro</i>	<i>Unidad</i>	<i>Fango fresco</i>	<i>Mesófilo</i>	<i>Termófilo</i>	<i>Rebose Mesófilo</i>	<i>Rebose Termófilo</i>
<i>pH</i>		---	7.8	8.0		
<i>ST</i>	<i>g/ℓ</i>	40.92	29.49	28.83	7	7
<i>SV</i>	<i>g/ℓ</i>	28.35	16.22	15.83		
<i>FV</i>	<i>%</i>	69.28	55.05	54.90	54.90	54.90
<i>DQO_F</i>	<i>mg/ℓ</i>	14200	3464	8833		
<i>N-NH₄⁺</i>	<i>mg N/ℓ</i>	447	447	456		
<i>DQO/SV</i>					1.7	1.7
<i>DQO_{F,bio}/DQO_F</i>					0.9	0.9
<i>Alc. Bicarbonatos</i>	<i>mgCaCO₃/ℓ</i>	395	4320	3559		
<i>Alc. Total</i>	<i>mgCaCO₃/ℓ</i>	2755	1833	5832		
<i>Alc. AGVs</i>	<i>mgCaCO₃/ℓ</i>	3160	6164	2273		
<i>Carga Orgánica Alimentada</i>	<i>kg/m³·d</i>		1.33	1.80		
<i>Carga Orgánica Eliminada</i>	<i>kg/m³·d</i>		0.61	0.83		
<i>TRH</i>	<i>Días</i>		20	15		
<i>Rendimiento eliminación SV</i>	<i>%</i>		45.69	46.02		

4.2.1. Calibración y validación del modelo matemático de la EDAR de Arazuri

Una vez construido y programado el modelo matemático de la EDAR, se contrastó su capacidad predictiva comparando los resultados experimentales históricos de los años 2014-2015 y 2020 con las predicciones del modelo con retorno mesófilo (azul), y se comparan los resultados con los obtenidos para retorno termófilo (rojo). Para reproducir las condiciones operacionales de los periodos anuales evaluados, se ha fijado la concentración de oxígeno disuelto (OD) de las zonas aerobias en el valor medio anual y purga regulado con el perfil de sólidos en el licor mezcla (SSLM) real de planta.

El modelo matemático propuesto ha descrito el funcionamiento de la EDAR de Arazuri usando los parámetros cinéticos y estequiométricos propuestos por la comunidad científica.

4.2.1.1. Escenario de operación 2014 - 2015

El modelo matemático utilizado también es capaz de reproducir correctamente la eliminación de nutrientes, materia orgánica y sólidos de los años 2014 y 2015 (Figura 4.2 - Figura 4.7).

Los resultados de las simulaciones muestran que el incremento de DQO asociado al retorno de digestión anaerobia termófila (DAT) produce un aumento del rendimiento de desnitrificación que se traduce en una reducción en la concentración de salida de nitratos (NO₃). Este aumento en el rendimiento de desnitrificación es debido a un incremento de la población de heterótrofas que desplazan de la población de nitrificantes, y tiene un efecto negativo en el proceso de nitrificación. El impacto del desplazamiento de bacterias autótrofas es especialmente importante en los meses de invierno, en el que disminuye la temperatura.

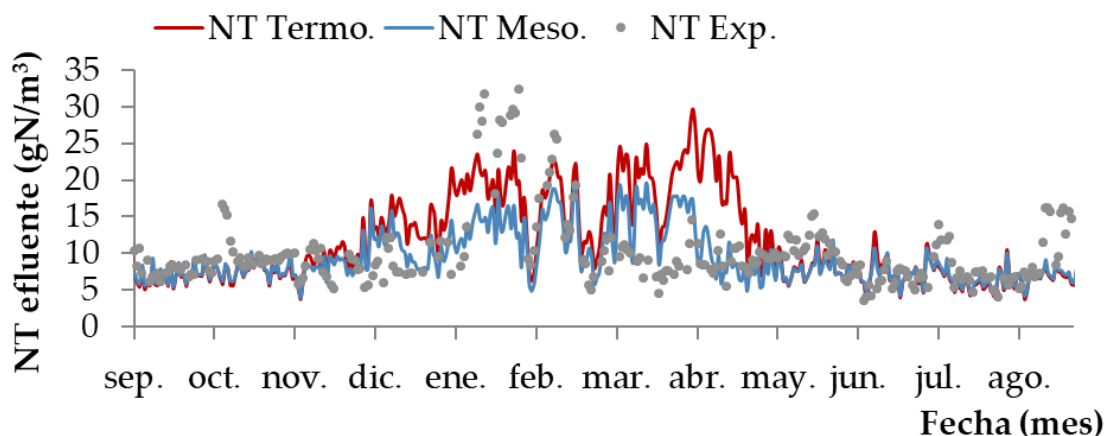


Figura 4.2 Concentración de N_T a la salida de la decantación secundaria (experimental vs. simulación)

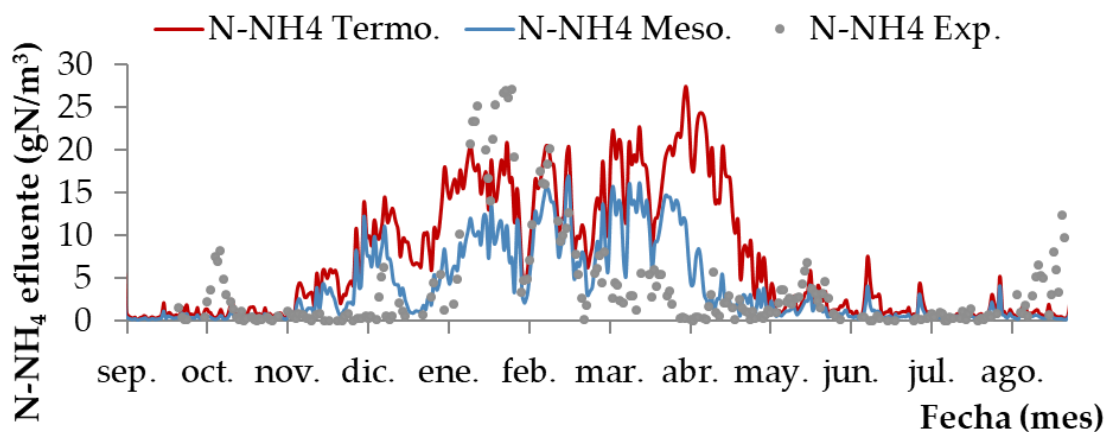


Figura 4.3 Concentración de N_T a la salida de la decantación secundaria (experimental vs. simulación)

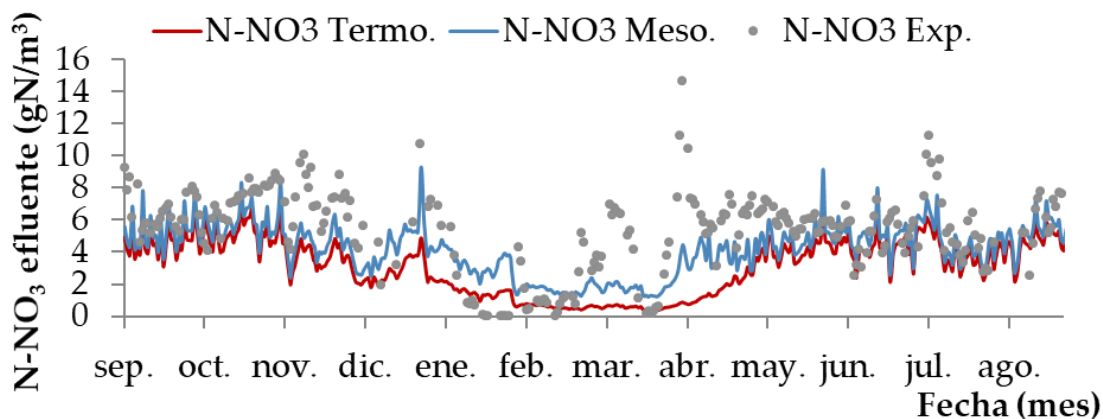


Figura 4.4 Concentración de N_T a la salida de la decantación secundaria (experimental vs. simulación)

El rendimiento de extracción de fósforo también incrementa con retorno de DAT, ya que el aporte extra de DQO permite incrementar la población de bacterias PAO.

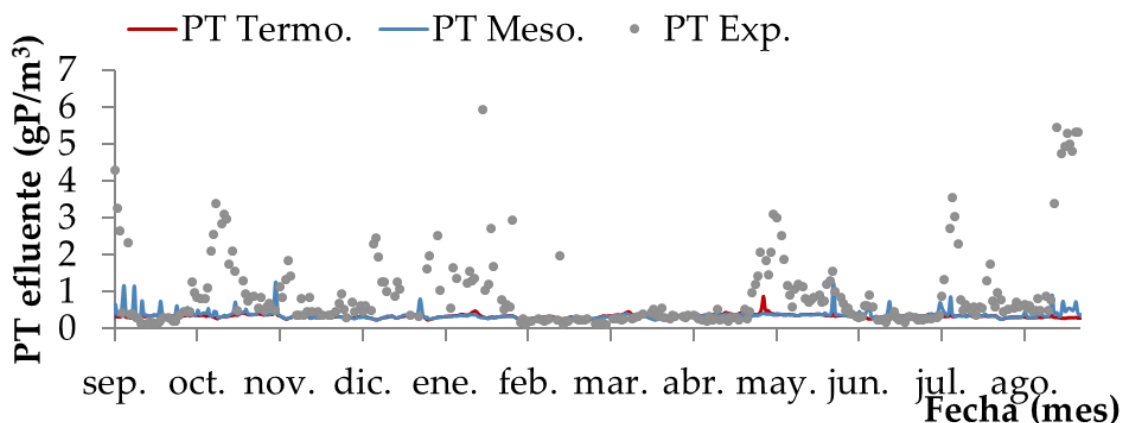


Figura 4.5 Concentración de P_T a la salida de la decantación secundaria (experimental vs. simulación)

En lo referente a las variables DQO_T y SS_T , la concentración de salida en la EDAR de Arazuri no se ve afectada con las características del retorno de la digestión anaerobia.

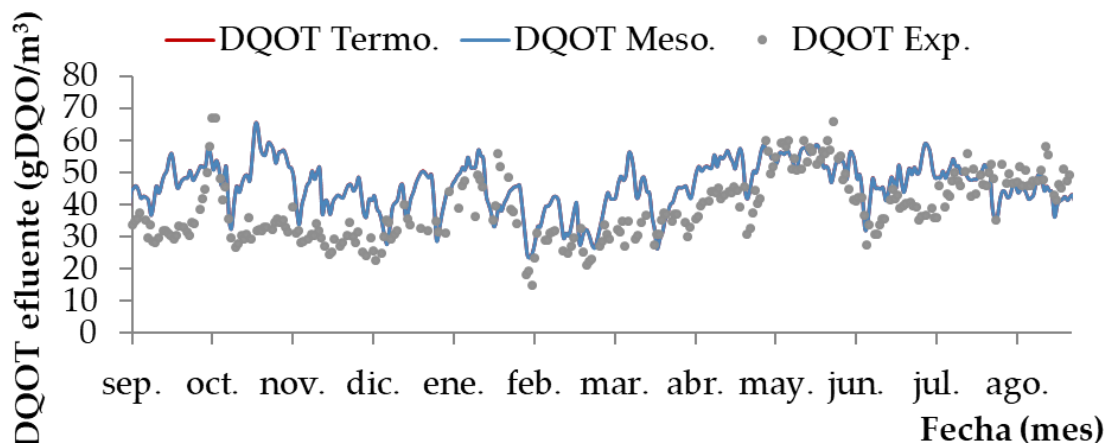


Figura 4.6 Concentración de DQO_T a la salida de la decantación secundaria (experimental vs. simulación)

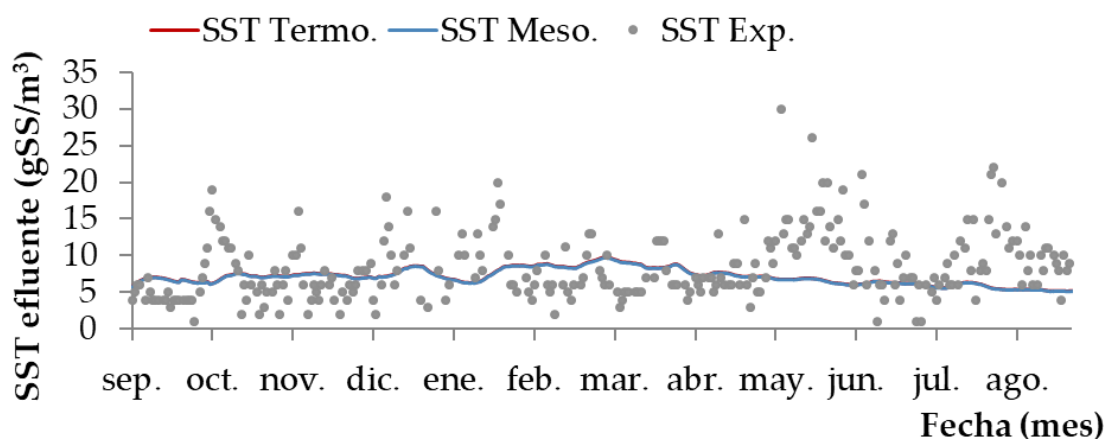


Figura 4.7 Concentración de SS_T a la salida de la decantación secundaria (experimental vs. simulación)

4.2.1.2. Escenario de operación 2022

El modelo matemático utilizado reproduce correctamente la eliminación de nutrientes, materia orgánica y sólidos (Figura 4.8 - Figura 4.13) en el tratamiento secundario. Igual que ocurría en el caso anterior, se observa que el retorno DAT aumenta significativamente la capacidad de desnitrificación y extracción de fósforo de la planta, pero tiene un efecto negativo en la concentración de salida de amonio. No se observa efecto las variables SS_T y DQO_T .

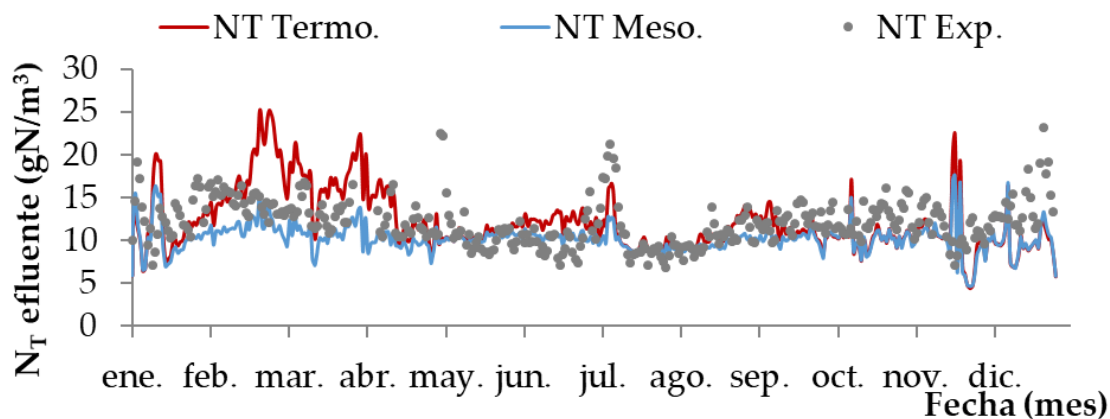


Figura 4.8 Concentración de N_T a la salida de la decantación secundaria (experimental vs. simulación)

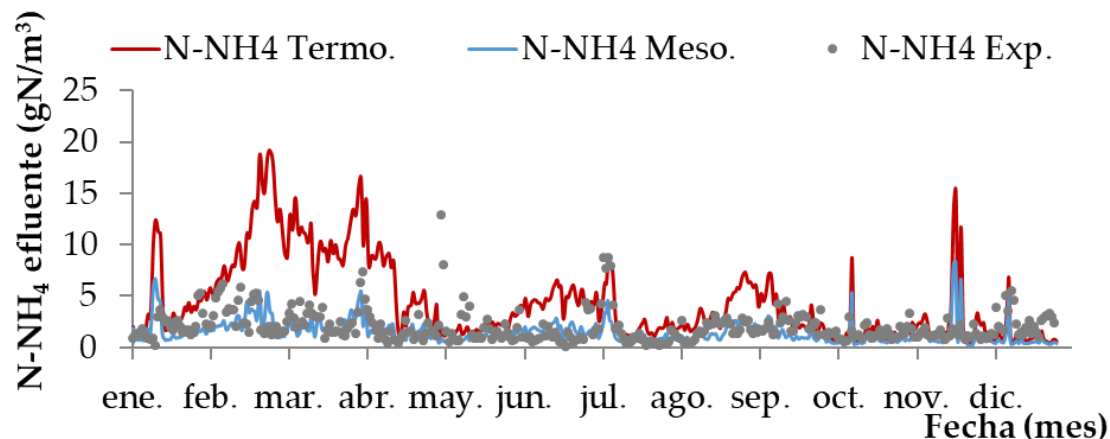


Figura 4.9 Concentración de N_T a la salida de la decantación secundaria (experimental vs. simulación)

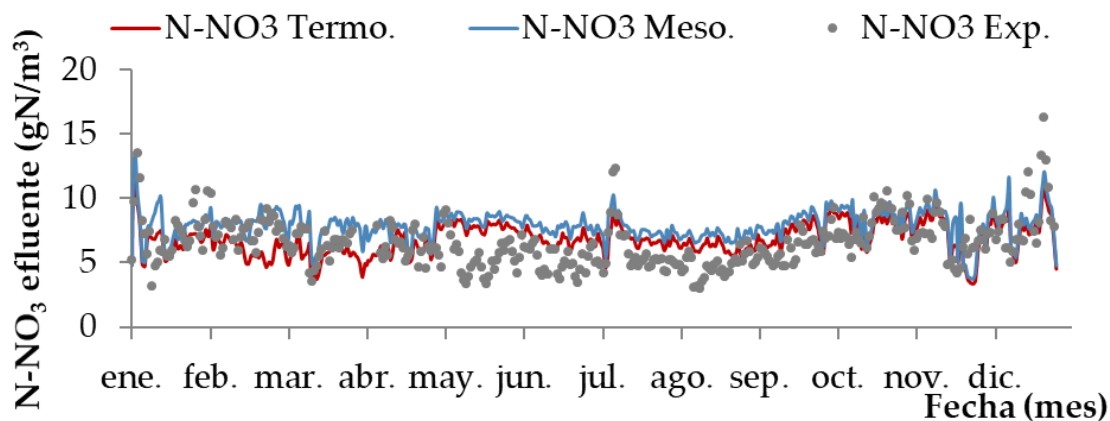


Figura 4.10 Concentración de N_T a la salida de la decantación secundaria (experimental vs. simulación)

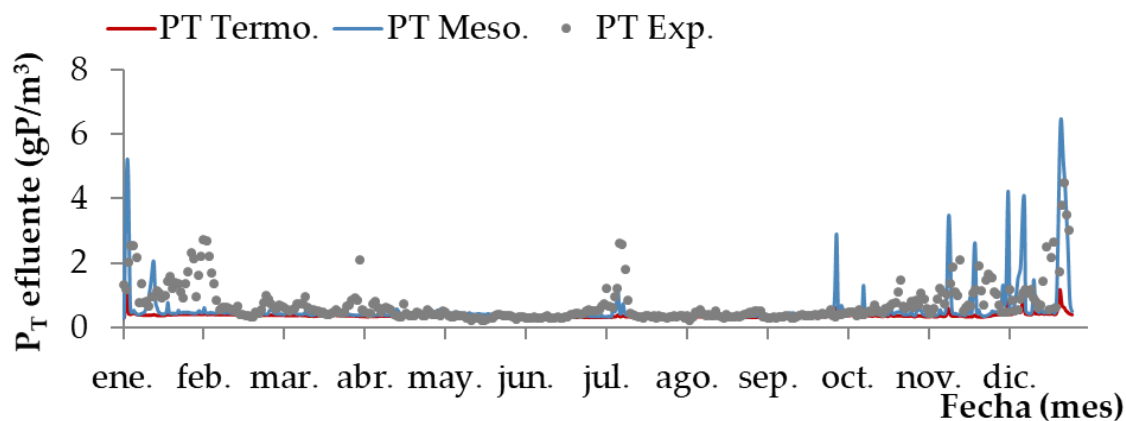


Figura 4.11 Concentración de P_T a la salida de la decantación secundaria (experimental vs. simulación)

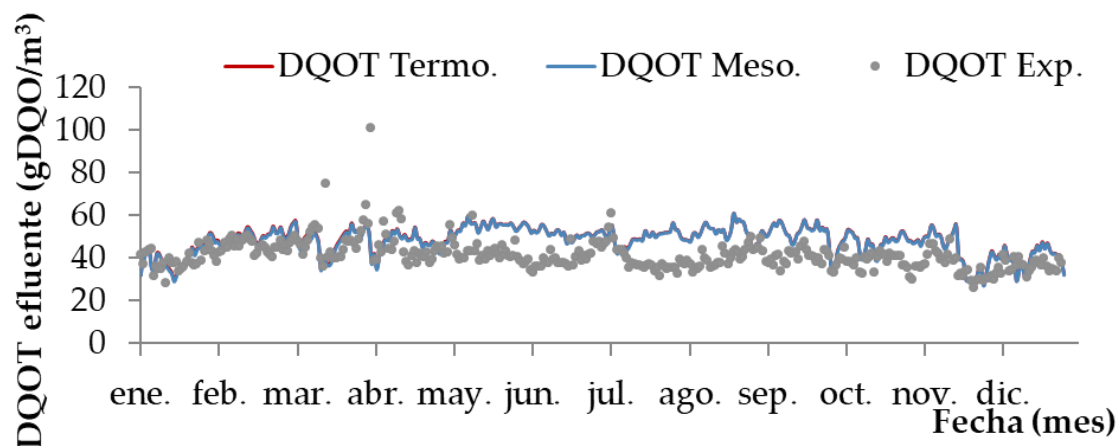


Figura 4.12 Concentración de DQO_T a la salida de la decantación secundaria (experimental vs. simulación)

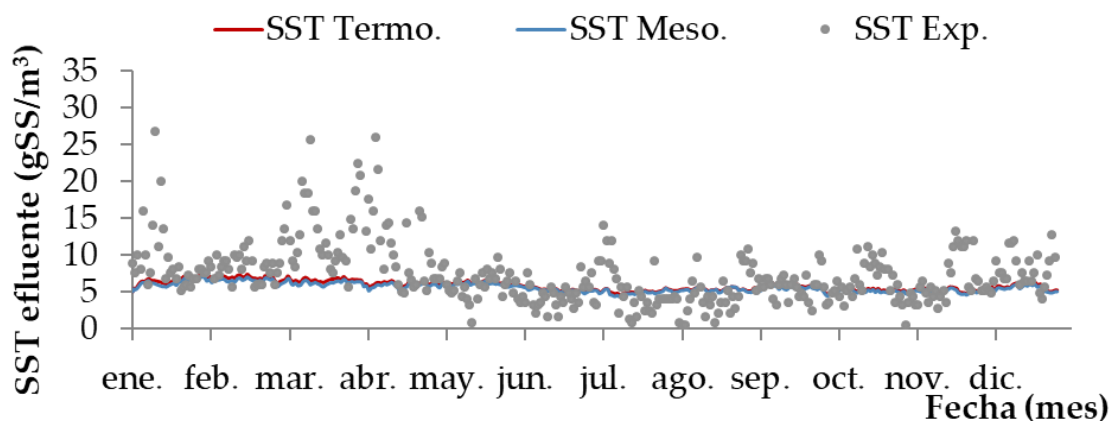


Figura 4.13 Concentración de SS_T a la salida de la decantación secundaria (experimental vs. simulación)

4.3. Análisis por simulación de escenarios de operación

4.3.1. Características de los escenarios de operación

La simulación de los escenarios de operación planteados en el estudio se ha realizado utilizando la configuración de planta construida en WEST® (www.mikebydhi.com), y capaz de describir el funcionamiento de la EDAR de Arazuri.

Para analizar el comportamiento de planta desacoplando el efecto de un periodo temporal concreto se ha generado un perfil de agua afluente basado en los datos históricos proporcionados por NILSA y la Mancomunidad de la Comarca de Pamplona.

A modo de ejemplo, las siguientes figuras muestran el perfil de entrada de caudal (Figura 4.14) y amonio (Figura 4.15), generado para la simulación de los escenarios de operación. El perfil (línea continua roja) pese a reproducir la tendencia de los datos históricos (puntos), no los persigue.

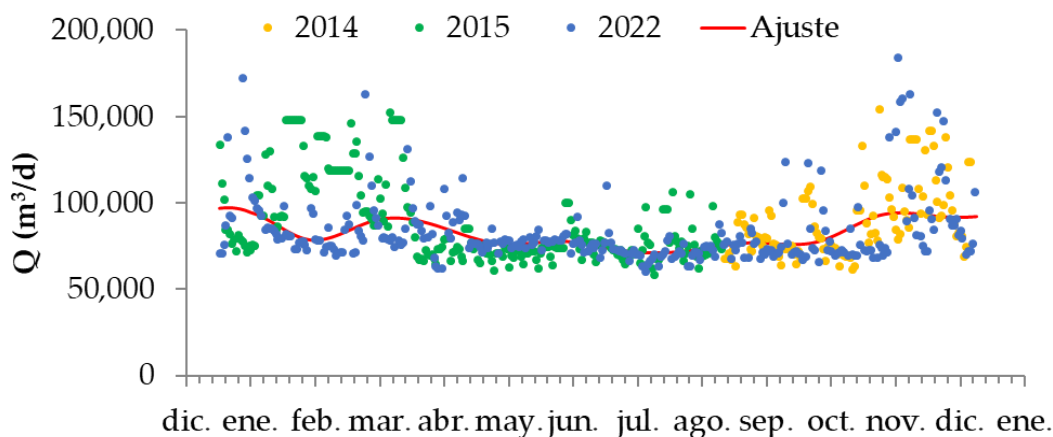


Figura 4.14 Caudal (m^3/d) afluente a EDAR de Arazuri (experimental vs. perfil)

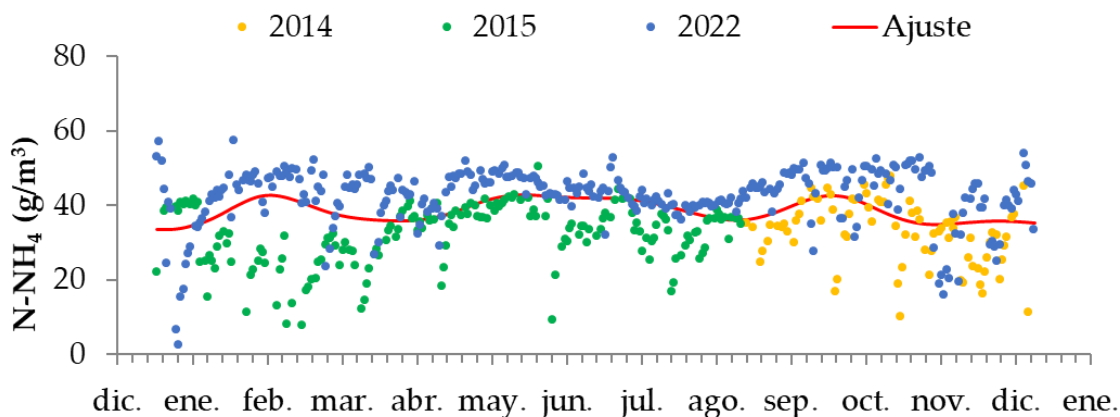


Figura 4.15 Concentración de NH_4 (g/m^3) afluente a EDAR de Arazuri (experimental vs. perfil)

La Tabla 2 recoge los escenarios analizados en el estudio. Estos escenarios se definieron para evaluar el comportamiento de la planta bajo diferentes condiciones de oxígeno y sólidos en la balsa biológica.

Control de aireación		OD = 3 g/m ³	OD = 2 g/m ³	OD = 1 g/m ³	OD = 0.5 g/m ³
Control de caudal purga	SSLM = 3500 g/m ³				
	SSLM = 3000 g/m ³				
	SSLM = 2500 g/m ³				
Dosificación Materia Orgánica	SSLM = 5000 kg/d				
Precipitación fósforo					

El proyecto original en la plataforma de simulación ha sido modificado para reproducir las condiciones establecidas. Por un lado, se ha regulado el caudal de purga de la planta en función de los 4 setpoints de concentración de SSLM (g/m³). Por otro lado, se han establecidos controles para regular la aireación en base a los setpoints de OD fijados. Además, se ha establecido dos escenarios más que incluyen la dosificación externa de materia orgánica (MO) y una unidad de precipitar estruvita.

Se analizan 4 sets de escenarios optimizados, comparando la calidad del efluente y costes operacionales (producción de lodo secundario y caudal teórico de aireación). Los valores medios obtenidos para cada uno de los casos están recogidos en el ANEXO I de este informe. A modo de ejemplo a continuación se muestran los valores de NT (g/m³) efluente en los casos evaluados.

4.3.1.1. Efecto del control de purga

En el primer grupo de escenarios analizado se evaluó el efecto trabajar a concentraciones de sólidos en el licor mezcla de 3500, 3000 y 2500 g/m³. En todos los casos La salida total de nitrógeno (NT) es ligeramente menor en condiciones termófilas (figura 4.16), por una reducción de nitratos asociada a un aumento de materia orgánica a la entrada en esos casos que permite aumentar el rendimiento de desnitrificación.

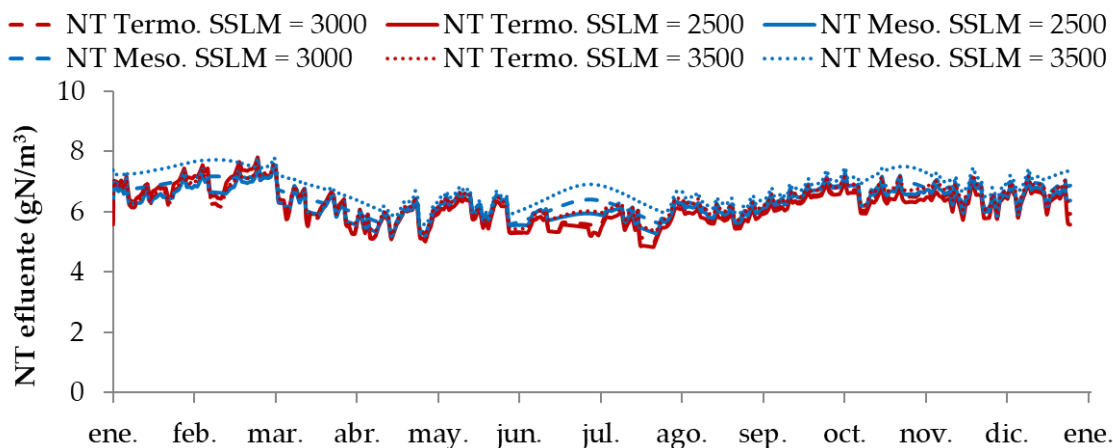


Figura 4.16 Concentración de NT (g/m³) afluente a EDAR de Arazuri

4.3.1.2. Efecto del control de OD

La salida total de nitrógeno (NT) es ligeramente menor en condiciones termófilas. El valor medio de nitrógeno total es algo mayor si se opera con oxígeno disuelto alto 2 gO/m³ (Figura 4.17) porque disminuye el rendimiento de desnitrificación.

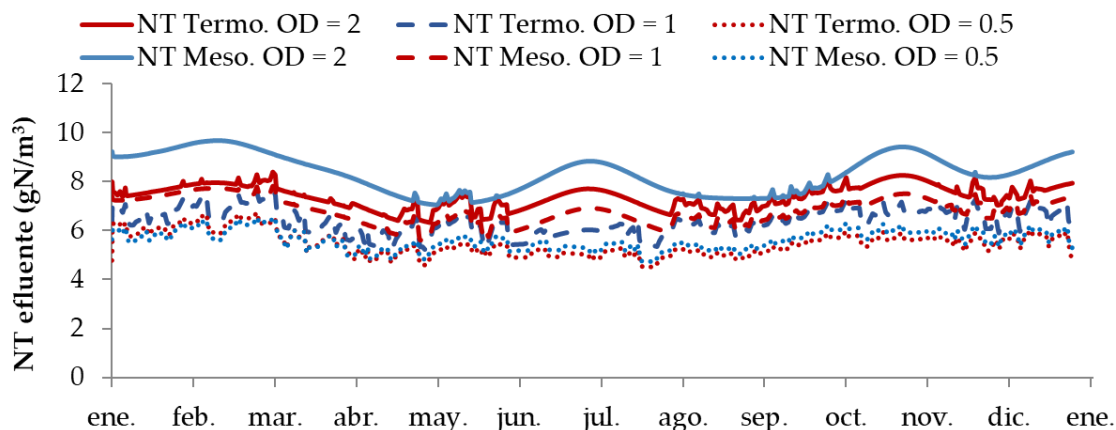


Figura 4.17 Concentración de NT (g/m³) afluente a EDAR de Arazuri

4.3.1.3. Efecto de la dosificación de MO

Para evaluar los límites reales de planta para eliminar nutrientes se evaluó los valores que se alcanzarían dosificando materia orgánica (Figura 4.18). La salida nitratos (N-NO_3) es significativamente menor al añadir materia orgánica (línea continua), como efecto colateral el las características del lodo digerido tienen escasa influencia.

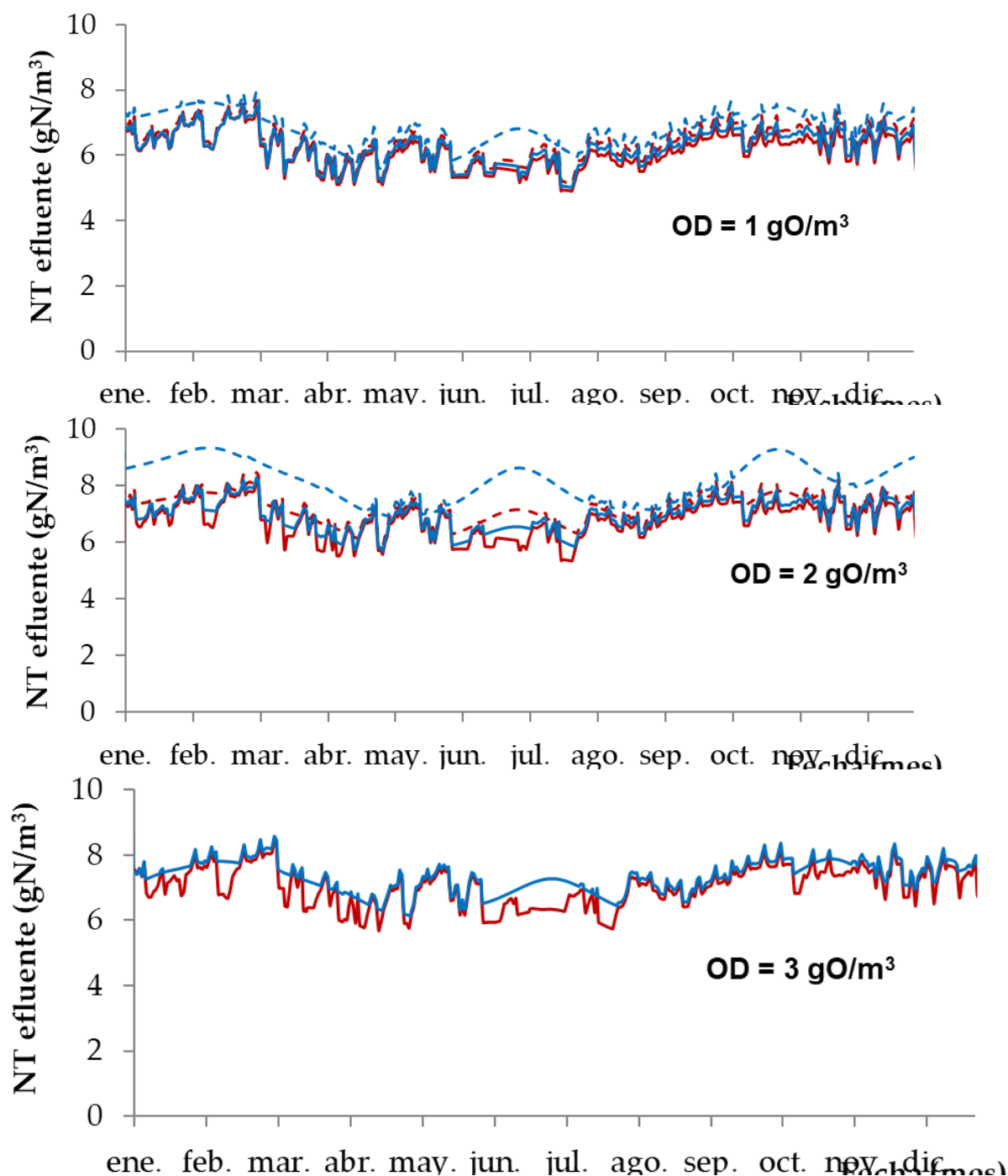


Figura 4.18 Concentración de NT (g/m^3) afluente a EDAR de Arazuri

4.3.1.1. Efecto de la precipitación de estruvita de MO

En el último caso se evaluó el efecto de incorporar una unidad de precipitación de estruvita para tratar el sobrenadante de la digestión anaerobia.

La concentración de salida de NT apenas se ve afectada por la precipitación de estruvita, pero igual que en casos anteriores es significativamente menor con retorno termófilo gracias al aporte extra de materia orgánica (Figura 4.19).

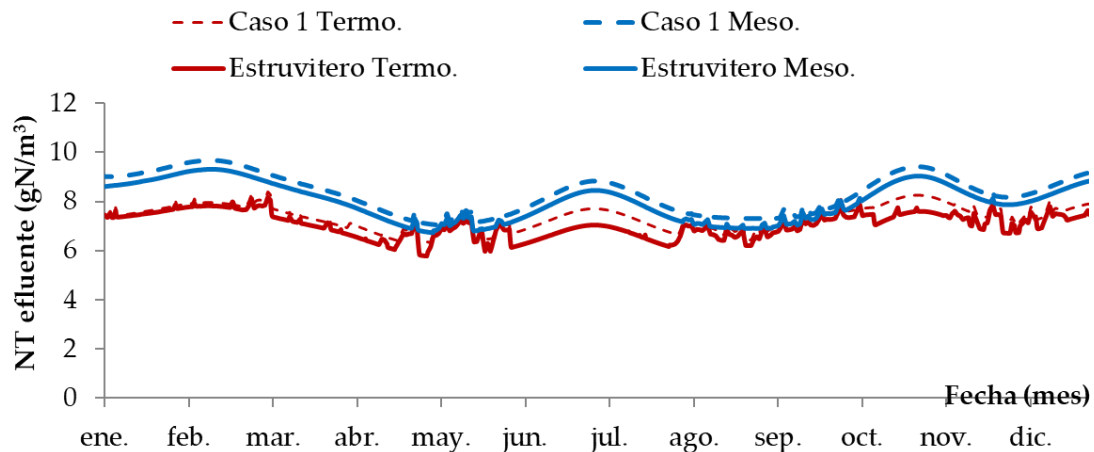


Figura 4.18 Concentración de NT (g/m³) afluente a EDAR de Arazuri

La salida de fósforo total (PT) disminuye significativamente con la unidad de precipitación en el caso de retorno mesófilo (Figura 4.19).

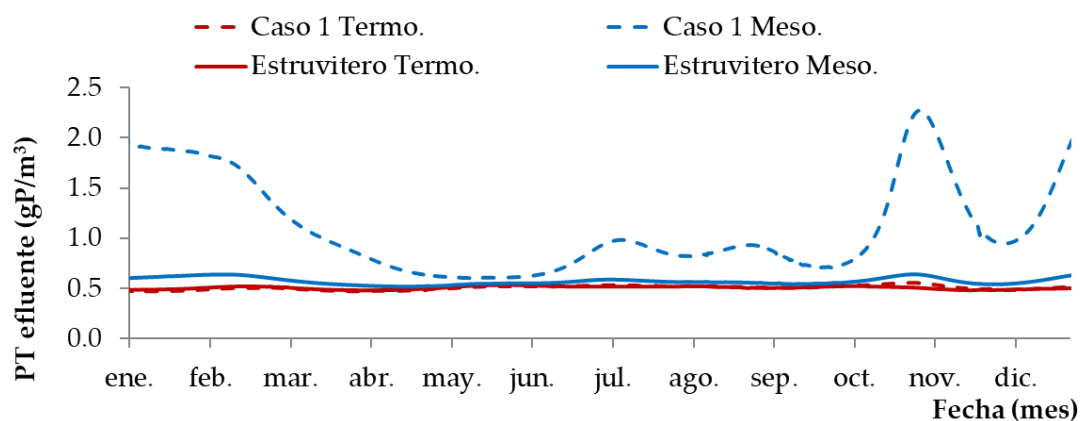


Figura 4.19 Concentración de PT (g/m³) afluente a EDAR de Arazuri

5. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO

El resumen de las principales conclusiones del estudio realizado se indica a continuación:

Calibración del modelo de la planta actual

El modelo matemático propuesto ha descrito el funcionamiento de la EDAR de Arazuri usando los parámetros cinéticos y estequiométricos propuestos por la comunidad científica, utilizando coeficientes cinéticos y estequiométricos estándar y sin modificar sus valores por defecto. Es por ello, que se presenta como una herramienta muy útil para el análisis del efecto de incorporar la tecnología de digestión anaerobia termófila.

Escenarios de operación

Los resultados obtenidos por simulación muestran que:

- La concentración de NT y NO_3 (g/m^3) del agua efluente disminuye de forma muy significativa al trabajar a concentraciones de salida de NH_4 más altas, que se alcanza con valores de OD menores. El caudal de aireación también disminuye si se establecen valores inferiores de setpoint de concentración de OD en balsa.
- La concentración de SSLM en balsa es el único parámetro operacional, evaluado, con efecto significativo en la producción de lodos. Aumentando al disminuir el setpoint de SSLM establecido.
- Las condiciones de operación (SSLM y OD) tienen un efecto importante en la distribución de las poblaciones bacterianas, y por tanto en el rendimiento de eliminación de nutrientes.
- La precipitación de estruvita no tiene efecto significativo en la salida de nitrógeno.
- El aumento de materia orgánica en el influente, bien por el retorno de digestión termófila o la dosificación de la misma permite alcanzar valores inferiores de nitrógeno y fósforo total a la salida.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Ayesa E., de la Sota A., Grau P., Sagarra J.M., Salterain A. and Suescun J. (2006). Supervisory control strategies for the new WWTP of Galindo-Bilbao: The long run from the conceptual design to the full-scale experimental validation. *Water Science and Technology*, 53, 4-5, pp.193-201, 2006.
- Fernández-Arévalo T., Lizarralde I., Fdz-Polanco F., Pérez-Elvira S.I., Garrido J.M., Puig S., Poch M., Grau P. and Ayesa E. (2017). Quantitative assessment of energy and resource recovery in wastewater treatment plants based on plant-wide simulations. *Water Research* Vol 118 (2017), pp. 272-288.
- Fernández-Arévalo T., Lizarralde I., Maiza M., Beltrán S., Grau P., Ayesa E., 2016. Diagnosis and optimization of WWTPs using the PWM library: Full-scale experiences. *Water Science and Technology* 75(3), pp. 518-529.
- Fernández-Arévalo T., Lizarralde I., Maiza M., Grau P., Ayesa E., 2016. Global optimization and resource recovery analysis in WWTPs using PWM simulations: Full-scale experiences. 3rd IWA Specialized International Conference "Ecotechnologies for Wastewater Treatment" (EcoSTP16), 27-30 June 2016, Cambridge, UK.
- Galarza, E. Ayesa, M.T. Linaza, A. Rivas, A. Salterain (2001). Application of mathematical tools to improve the design and operation of activated sludge plants. Case study: the new WWTP of Galindo-Bilbao. Part II: Selection of operational strategies and automatic controllers. *Water Science and Technology*, 43, 7, 167-174, 2001.
- Henze M., Gujer W., Mino T., van Loosdrecht M., 2000. *Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3*. Scientific and Technical Report nº9, IWA Publishing, London.
- Henze, M., van Loosdrecht, M.C.M., Ekama, G.A., Brdjanovic, D., 2008. IWA Publishing, London, UK.
- Lizarralde I., Fernández-Arévalo T., Maiza M., Grau P., Ayesa E., 2014. Plant-Wide Model simulations for studying phosphorous recovery and energy costs in WWTPs. 2nd IWA Specialist Conference on EcoTechnologies for Sewage Treatment Plants (EcoSTP), Verona (Italy), 23-25 June, 2014.
- Lizarralde, T. Fernández-Arévalo, C. Brouckaert, P. Vanrolleghem, D.S. Ikumi, G. A. Ekama, E. Ayesa and P. Grau (2015). A new general methodology for incorporating physico-chemical transformations into multi-phase wastewater treatment process models. *Water Research* Vol 74 (2015), pp. 239-256.
- Metcalf & Eddy, 2003. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. Fourth Edition, revised by George Tchobanoglous, Franklin L. Burton, and H. David Stensel. McGraw Hill.
- Rivas, E. Ayesa, A. Galarza, A. Salterain (2001). Application of mathematical tools to improve the design and operation of activated sludge plants. Case study: the new WWTP of Galindo-Bilbao. Part I: Selection of optimum design. *Water Science and Technology*, 43, 7, 157-166, 2001.

ANEXO I. VALORES MEDIOS DE CONCENTRACIÓN EFLUENTE

En este apartado se recogen los valores medios de concentración efluente, para las variables analizadas, y las diferencias medias entre los valores obtenidos para las características del retorno.

Escenario de operación 2014-2015

Tabla I.I Valor medio anual y diferencia de la concentración efluente de NT, NH₄, NO₃ y PT (g/m³), caudal de aireación (m³/d) y producción de lodo secundario (kg/d) obtenido por simulación para retorno mesófilo y termófilo.

	Mesófilo	Termófilo	Diferencia
NT (g/m³)	9.4	11.6	19 %
NH₄ (g/m³)	3.8	7.1	46 %
NO₃ (g/m³)	4.2	3.1	- 34 %
PT (g/m³)	0.4	0.3	-9 %
Q aireación (m³/d)	504,351	508,936	0.9 %
Producción de Lodo secundario (kg/d)	18,670	20,137	7.3 %

Escenario de operación 2022

Tabla I.II Valor medio anual y diferencia de la concentración efluente de NT, NH₄, NO₃ y PT (g/m³), caudal de aireación (m³/d) y producción de lodo secundario (kg/d) obtenido por simulación para retorno mesófilo y termófilo.

	Mesófilo	Termófilo	Diferencia
NT (g/m³)	10.2	12.1	16 %
NH₄ (g/m³)	1.5	4.4	67 %
NO₃ (g/m³)	7.9	6.9	- 15 %
PT (g/m³)	0.6	0.4	- 49 %
Q aireación (m³/d)	692,905	683,813	- 1.3 %
Producción de Lodo secundario (kg/d)	29,608	31,554	6.2 %

Escenario de operación optimizado – Efecto SSLM

Tabla I.III Valor medio anual y diferencia de la concentración efluente de NT, NH₄, NO₃ y PT (g/m³), caudal de aireación (m³/d) y producción de lodo secundario (kg/d) obtenido por simulación para retorno mesófilo y termófilo.

	SSLM (g/m³)	Mesófilo	Termófilo	Diferencia
NT (g/m³)	2500	6.3	6.2	- 2.0 %
	3000	6.5	6.2	- 4.8 %
	3500	6.8	6.4	- 7.1 %
NH₄ (g/m³)	2500	0.5	0.7	26 %
	3000	0.3	0.4	22 %
	3500	0.2	0.3	21 %
NO₃ (g/m³)	2500	4.1	3.8	- 8 %
	3000	4.3	3.9	- 10 %
	3500	4.6	4.1	- 13 %
PT (g/m³)	2500	0.5	0.4	- 23 %
	3000	0.6	0.5	- 39 %
	3500	0.9	0.5	- 68 %
Q aireación (m³/d)	2500	614,965	643,017	4.4 %
	3000	648,198	680,031	4.7 %
	3500	676,877	712,157	5.0 %
Producción de Lodo secundario (kg/d)	2500	19,983	21,014	4.9 %
	3000	19,140	20,014	4.4 %
	3500	17,846	19,130	6.7 %

Escenario de operación optimizado – Efecto OD

Tabla I.IV Valor medio anual y diferencia de la concentración efluente de NT, NH₄, NO₃ y PT (g/m³), caudal de aireación (m³/d) y producción de lodo secundario (kg/d) obtenido por simulación para retorno mesófilo y termófilo.

	OD (g/m³)	Mesófilo	Termófilo	Diferencia
NT (g/m³)	2	8.3	7.4	- 12.7 %
	1	6.8	6.4	- 7.1 %
	0.5	5.6	5.5	- 2.8 %
NH₄ (g/m³)	2	0.1	0.2	22 %
	1	0.2	0.3	21 %
	0.5	0.5	0.6	14 %
NO₃ (g/m³)	2	6.2	5.2	- 19 %
	1	4.6	4.1	- 13 %
	0.5	3.1	2.8	- 9 %
PT (g/m³)	2	1.1	0.5	- 116 %
	1	0.9	0.5	- 68 %
	0.5	0.8	0.5	- 59 %
Q aireación (m³/d)	2	828,213	870,645	4.9 %
	1	676,877	712,157	5.0 %
	0.5	601,096	628,499	4.4 %
Producción de Lodo secundario (kg/d)	2	17,505	18,726	6.5 %
	1	17,846	19,130	6.7 %
	0.5	18,822	19,783	4.9 %

Escenario de operación optimizado – Dosificación MO

Tabla I.V Valor medio anual y diferencia de la concentración efluente de NT, NH₄, NO₃ y PT (g/m³), caudal de aireación (m³/d) y producción de lodo secundario (kg/d) obtenido por simulación para retorno mesófilo y termófilo.

	OD (g/m ³)	Mesófilo	Termófilo	Diferencia
NT (g/m³)	3	7.5	7.0	- 7.3 %
	2	7.0	6.7	- 4.8 %
	1	6.1	6.0	- 2.3 %
NH₄ (g/m³)	3	0.2	0.2	27 %
	2	0.2	0.3	27 %
	1	0.3	0.4	23 %
NO₃ (g/m³)	3	5.3	4.7	- 12%
	2	4.7	4.4	- 9 %
	1	3.7	3.5	- 7 %
PT (g/m³)	3	0.6	0.5	- 15 %
	2	0.5	0.5	- 3 %
	1	0.5	0.5	- 3 %
Q aireación (m³/d)	3	1,083,460	1,136,155	4.6 %
	2	881,145	924,723	4.7 %
	1	720,481	754,857	4.6 %
Producción de Lodo secundario (kg/d)	3	18,920	20,191	6.3 %
	2	19,096	20,396	6.4 %
	1	19,518	20,852	6.4 %

Escenario de operación optimizado – Precipitación P

Tabla I.VI Valor medio anual y diferencia de la concentración efluente de NT, y PT (g/m³), obtenido por simulación para retorno mesófilo y termófilo.

	Mesófilo	Termófilo	Diferencia
NT (g/m³)	8.0	7.1	- 13.5 %
PT (g/m³)	0.6	0.5	- 12 %

ANEXO II. CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DE UN AGUA BRUTA

En este apartado se detallan las características y ratios típicos de un agua residual bruta con baja contribución de aguas industriales recogidas en bibliografía.

Tabla II.I Características típicas de un agua residual bruta con baja contribución de aguas industriales (Metcalf & Eddy, 2003)

Contaminantes	Unidades	Concentración baja	Concentración media	Concentración alta
Sólidos Totales (ST)	gSS/m ³	390	720	1230
Sólidos disueltos totales (SDT)	gSS/m ³	270	500	860
Fijos	gSS/m ³	160	300	520
Volátiles	gSS/m ³	110	200	340
Sólidos Suspendidos totales (SST)	gSS/m ³	120	210	400
Fijos	gSS/m ³	25	50	85
Volátiles (SSV)	gSS/m ³	95	160	315
DBO ₅	gDBO/m ³	110	190	350
COT	g/m ³	80	140	260
DQO	gDQO/m ³	250	430	800
Nitrógeno total (como N)	gN/m ³	20	40	70
Orgánico	gN/m ³	8	15	25
N-NH ₄	gN/m ³	12	25	45
Nitritos	gN/m ³	0	0	0
Nitratos	gN/m ³	0	0	0
Fósforo total (como P)	gP/m ³	4	7	12
Orgánico	gP/m ³	1	2	4
Inorgánico	gP/m ³	3	5	10
Cloruros	g/m ³	30	50	90
Sulfatos	g/m ³	20	30	50
Alcalinidad (como CaCO ₃)	gCaCO ₃ /m ³	50	100	200
Grasas	g/m ³	50	90	100
Coliformes Totales	no/100ml	10 ⁶ -10 ⁸	10 ⁷ -10 ⁹	10 ⁷ -10 ¹⁰
Compuestos Orgánicos Volátiles	mg/L	<100	100-400	>400

Tabla II.II Características típicas de un agua residual bruta con baja contribución de aguas industriales (Henze *et al.*, 2008)

Contaminantes	Unidades	Concentración baja	Concentración media	Concentración alta
Sólidos Suspendidos Totales (SS _T)	gSS/m ³	250	400	600
Fijos	gSS/m ³	50	80	120
Volátiles (SS _V)	gSS/m ³	200	320	480
DBO ₅	gDBO/m ³	230	350	560
DQO	gDQO/m ³	500	750	1200
Particulada	gDQO/m ³	300	450	720
Biodegradable	gDQO/m ³	-	300	-
Inerte	gDQO/m ³	-	150	-
Soluble	gDQO/m ³	200	300	480
Biodegradable	gDQO/m ³	-	270	-
Inerte	gDQO/m ³	-	30	-
AGV (como acetato)	g/m ³	10	30	80
Nitrógeno total (como N)	gN/m ³	30	60	100
Orgánico	gN/m ³	10	15	25
Biodegradable	gN/m ³	-	13	-
Inerte	gN/m ³	-	2	-
N-NH ₄	gN/m ³	20	45	75
Nitritos / Nitratos	gN/m ³	0.1	0.2	0.5
Fósforo total (como P)	gP/m ³	6	15	25
Orgánico	gP/m ³	2	5	10
Inorgánico	gP/m ³	4	10	15

Tabla I.III Ratios típicos de un agua residual bruta con baja contribución de aguas industriales (Henze *et al.*, 2008)

Ratios	Unidades	Concentración baja	Concentración media	Concentración alta
DQO/DBO	gDQO/gDBO	1,5-2,0	2,0-2,5	2,5-3,5
AGV/DQO	g/gDQO	0,04-0,02	0,08-0,04	0,12-0,08
DQO/N _T	gDQO/gN	6,0-8,0	8,0-12,0	12,0-16,0
DQO/P _T	gDQO/gP	20,0-35,0	35,0-45,0	45,0-60,0
DBO/N _T	gDBO/gN	3,0-4,0	4,0-6,0	6,0-8,0
DBO/P _T	gDBO/gP	10,0-15,0	15,0-20,0	20,0-30,0
DQO/SS _V	gDQO/gSS	1,2-1,4	1,4-1,6	1,6-2,0
SS _V /SS _T	gSS/gSS	0,4-0,6	0,6-0,8	0,8-0,9
DQO/CO _T	gDQO/g	2,0-2,5	2,5-3,0	3,0-3,5