

# Trabajo Fin de Grado

Evaluación del proceso de post-desnitrificación tras  
filtros percoladores a escala piloto

Evaluation of the post-desnitrification process after  
tricking filter at pilot scale

**ANEXOS**

Autor/es

Ángela Marco Salcedo

Director/es

Rosa Mosteo Abad  
Itsaso Ilzarbe Senosiain

Grado en Ingeniería Química

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

2022



## ÍNDICE

1.	Anexo A. Datos de partida.....	1
2.	Anexo B. Fotografías de cada elemento de la planta piloto.....	3
3.	Anexo C. Calibración de las bombas.....	6
4.	Anexo D. Cálculo de caudales de las bombas automatizadas. ....	9
5.	Anexo E. Cálculo de adición de acético real y teórico .....	10
6.	Anexo F. Valores de los parámetros obtenidos en el periodo estable de funcionamiento de la planta piloto.....	11

## ÍNDICE ILUSTRACIONES:

Ilustración 1.. Plano del depósito vertical. ....	1
Ilustración 2. Plano del decantador de fangos. ....	1
Ilustración 3. Plano de interconexión de equipos. ....	2
Ilustración 4. Tanque GRG.....	3
Ilustración 5. Reactor biológico.....	3
Ilustración 6. Decantador final .....	3
Ilustración 7. Controlador .....	3
Ilustración 8. Exterior del cuadro eléctrico .....	4
Ilustración 9. Interior del cuadro eléctrico .....	4
Ilustración 10. Bomba para impulsar el agua residual .....	4
Ilustración 11. Garrafa de ácido acético al 80% .....	4
Ilustración 12. Temporizador para el acético dentro del controlador .....	5
Ilustración 13. Bomba dosificadora de ácido acético.....	5
Ilustración 14. Recta calibración bomba de entrada al reactor. ....	7
Ilustración 15. Recta de calibración bomba de recirculación.....	7
Ilustración 16. Recta de calibración bomba de adición de acético. ....	8

## ÍNDICE TABLAS:

Tabla 1. Parámetros de calibración para la bomba de entrada al reactor (bomba 1).....	6
Tabla 2. Parámetros de calibración para la bomba de recirculación (bomba 2).....	6
Tabla 3. Parámetros de calibración para la bomba de adición de acético. ....	7
Tabla 4. Valores teóricos y reales de adición de acético en la puesta en marcha. ....	10
Tabla 5. Caudal y TRH en los periodos estables de tratamiento. ....	11
Tabla 6. Análisis de nitratos en el periodo estable de tratamiento. ....	12
Tabla 7. Nitratos eliminados y rendimiento. ....	13

1. Anexo A. Datos de partida

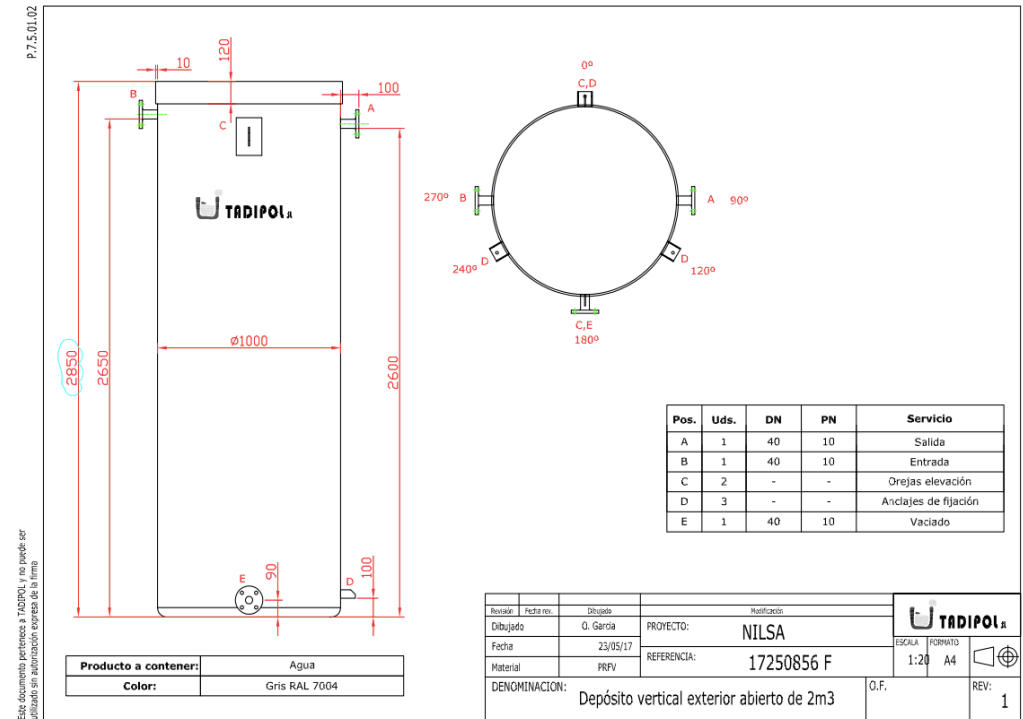


Ilustración 1.. Plano del depósito vertical.

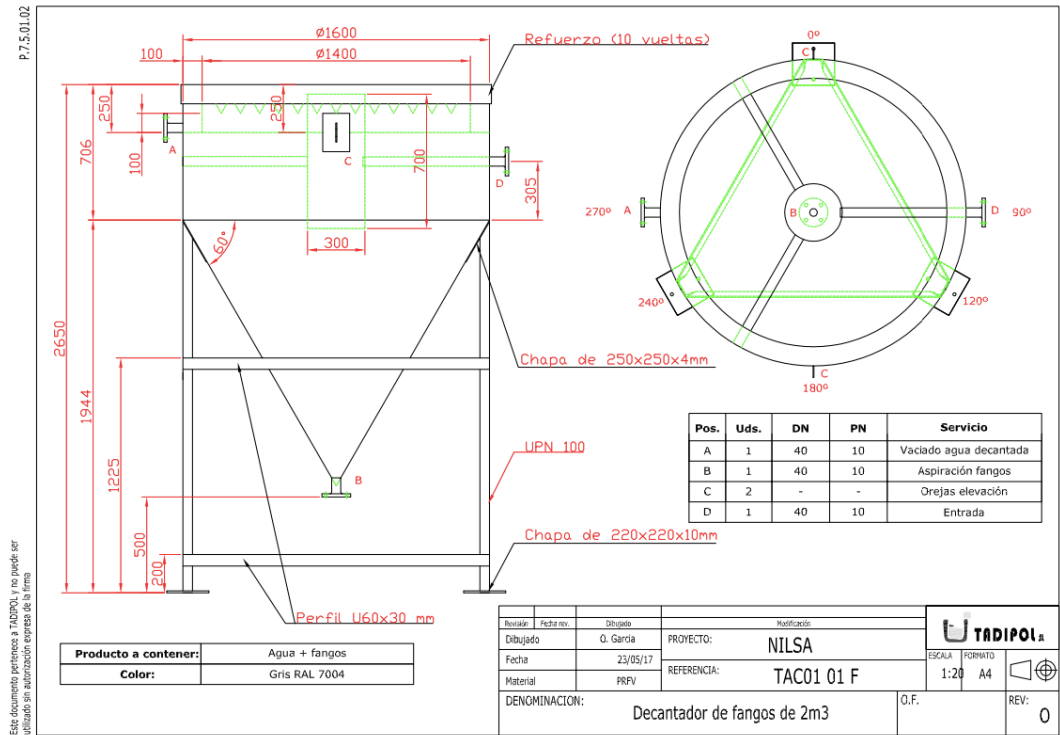


Ilustración 2. Plano del decantador de fangos.

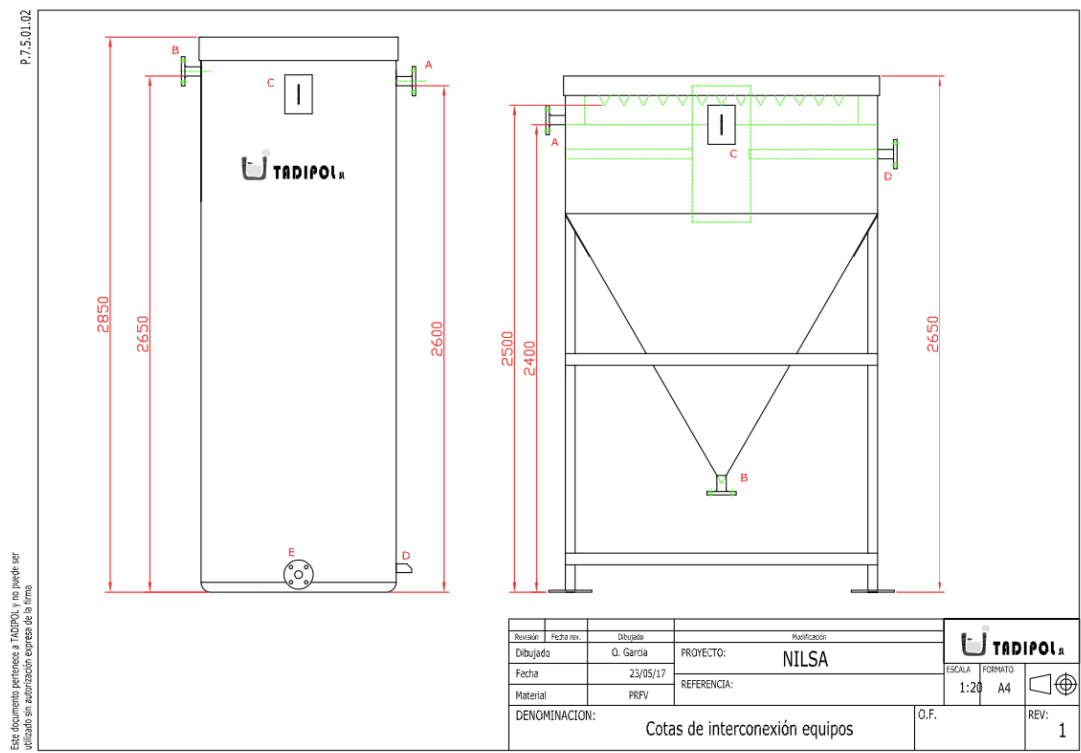


Ilustración 3. Plano de interconexión de equipos.

2. Anexo B. Fotografías de cada elemento de la planta piloto.



*Ilustración 4. Tanque GRG*



*Ilustración 5. Reactor biológico*



*Ilustración 6. Decantador final*



*Ilustración 7. Controlador*





Ilustración 8. Exterior del cuadro eléctrico



Ilustración 9. Interior del cuadro eléctrico



Ilustración 10. Bomba para impulsar el agua residual



Ilustración 11. Garrafa de ácido acético al 80%



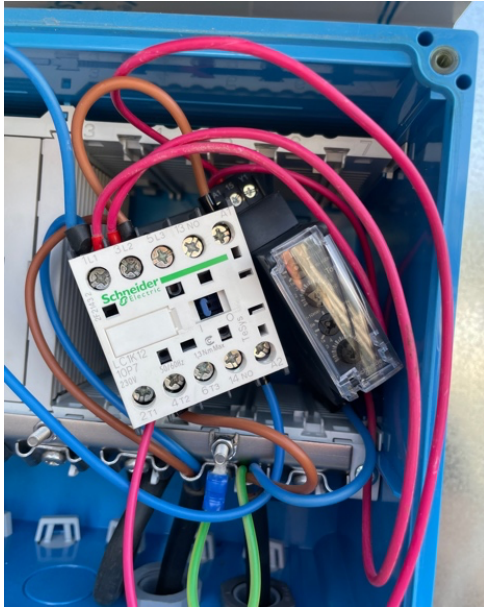


Ilustración 12. Temporizador para el acético dentro del controlador



Ilustración 13. Bomba dosificadora de ácido acético

### 3. Anexo C. Calibración de las bombas

Por un lado, para la calibración de la bomba 1 hay que dejar esta encendida y la bomba 2 apagada. A continuación, se seleccionan diferentes frecuencias dentro de un intervalo de [15,50] Hz y se miden las alturas iniciales ( $h_o$ ) y finales ( $h_f$ ) tras un tiempo determinado ( $t$ ) en minutos. Después hay que calcular el caudal ( $Q$ ) en  $m^3/día$  de la siguiente forma:

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{\pi * r^2 * (h_o - h_f)}{t} \text{ (Ecuación 1)}$$

Conocido el diámetro del reactor, (ver anexo A). Finalmente, se representa el caudal ( $Q$ ) frente a la frecuencia ( $f$ ) y se obtiene la recta de calibración. De esta misma forma se consigue la calibración del caudal de recirculación, pero con la bomba 2 encendida y la bomba 1 apagada.

Por otro lado, para obtener la calibración de la bomba dosificadora de acético se escogen unos porcentajes de bomba entre [0,100] y se cronometra el tiempo que tarda en llenar un determinado volumen. Así se obtiene el caudal ( $Q$ ) en  $mL/min$  con la misma ecuación usada anteriormente, se representa frente al porcentaje de apertura de la bomba (%) y se hace la regresión lineal obteniendo su respectiva ecuación que posteriormente se usa para saber cuánta cantidad de materia orgánica se está adicionando al reactor.

Tabla 1. Parámetros de calibración para la bomba de entrada al reactor (bomba 1).

Frecuencia (Hz)	$h_o$ (cm)	$h_f$ (cm)	t(min)	Q (cm <sup>3</sup> /min)	Q(m <sup>3</sup> /día)
15	27	23	3	10471,98	15,08
25	29,5	24,5	2	19634,95	28,27
35	36	28,5	2	29452,43	42,41
50	32,5	22	2	41233,40	59,38

Tabla 2. Parámetros de calibración para la bomba de recirculación (bomba 2).

Frecuencia (Hz)	$h_o$ (cm)	$h_f$ (cm)	t(min)	Q (cm <sup>3</sup> /min)	Q(m <sup>3</sup> /día)
15	30	25	3	13089,97	18,85
25	29,5	23,5	2	23561,94	33,93
35	32,5	24,5	2	31415,93	45,24
50	37	26	2	43196,90	62,20

Tabla 3. Parámetros de calibración para la bomba de adición de acético.

BOMBA (%)	t(min)	Volumen (mL)	Q (mL/min)
10	2	6	3
20	2	16,5	8,25
40	1	19	19
60	0,5	15	30
80	0,5	21,5	43
100	0,5	26,5	53

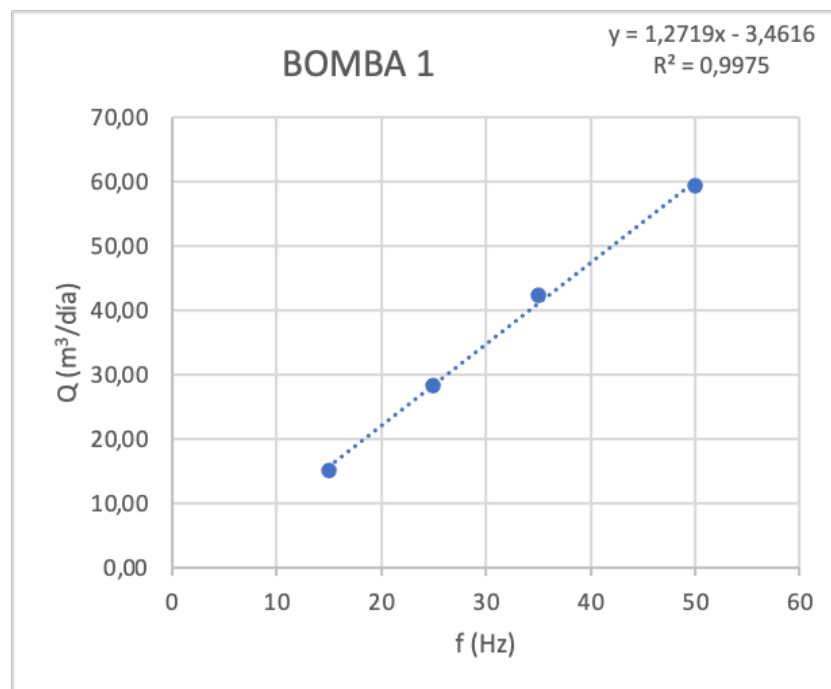


Ilustración 14. Recta calibración bomba de entrada al reactor.

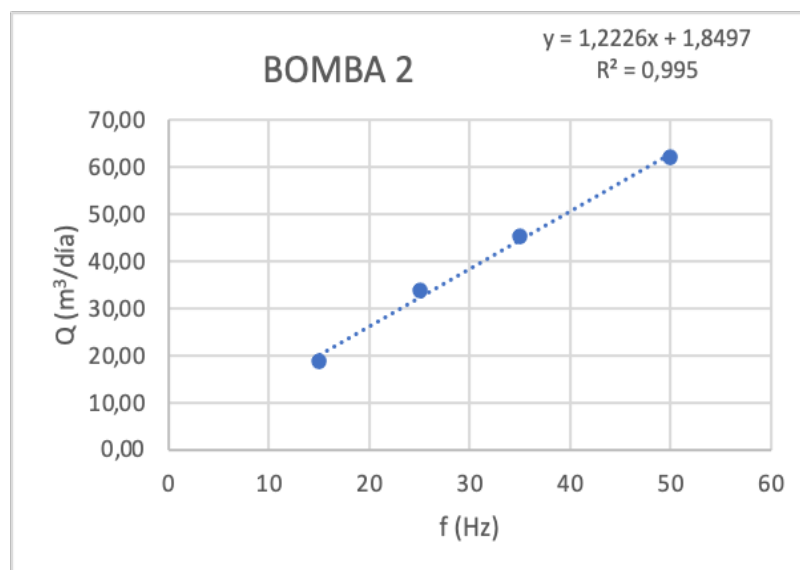
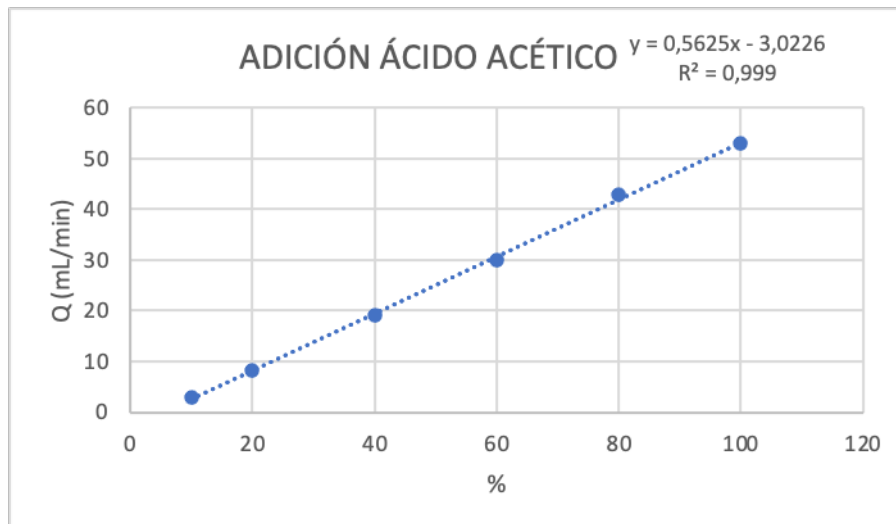


Ilustración 15. Recta de calibración bomba de recirculación.



*Ilustración 16. Recta de calibración bomba de adición de acético.*

#### 4. Anexo D. Cálculo de caudales de las bombas automatizadas.

Al principio de la experimentación las bombas se dejaban funcionando en continuo. A lo largo de la puesta en marcha se decidió dejarlas temporizadas funcionando 30 segundos ON, 30 segundos OFF.

En primer lugar, se calcula el caudal de cada bomba en continuo con su respectiva recta de regresión:

Recta de regresión para la Bomba 1:  $Q_{B1} \left( \frac{m^3}{día} \right) = 1,2719 \cdot f(Hz) - 3,4616$  (Ecuación 2)

Recta de regresión para la Bomba 2:  $Q_{B2} \left( \frac{m^3}{día} \right) = 1,2226 \cdot f(Hz) + 1,8497$  (Ecuación 3)

A continuación, se lleva a cabo el cálculo de temporización de las bombas funcionando la bomba 30 segundos ON, 30 segundos OFF durante 24 horas.

$$Q \left( \frac{m^3}{30segundos} \right) = Q_{B1, en continuo} \left( \frac{m^3}{día} \right) \cdot \frac{1min}{60 seg} \cdot \frac{1h}{60 min} \cdot \frac{1día}{24 h} \cdot 30 segundos \text{ (Ecuación 4)}$$

Como en 1 hora la bomba estaría funcionando (ON) 60 veces, se puede calcular el caudal durante un día que proporcionaría cada bomba cuando está en funcionamiento.

$$Q_{B1} \text{ durante 1 día} = Q \left( \frac{m^3}{30segundos} \right) \cdot 60 \text{ veces ON en 1 hora} \cdot 24 \text{ horas} \text{ (Ecuación 5)}$$

De la misma forma para el caudal de la bomba 2.

## 5. Anexo E. Cálculo de adición de acético real y teórico

Por un lado, para obtener el caudal real de fuente de carbono que se está adicionando se utiliza la recta de calibración de adicción de acético:

$$Q \left( \frac{mL}{min} \right) = 0,5625 \cdot \%bomba\ de\ adicción - 3,0226 \text{ (Ecuación 6)}$$

Sustituyendo en la fórmula anterior el porcentaje de adicción de acético correspondiente se obtiene el caudal de acético que se está adicionando real en continuo, primera columna de la tabla 4.

Por otro lado, para hallar la cantidad de ácido acético teórico se necesita saber la carga de nitratos (g) de entrada al reactor para poder convertirlo a  $CH_3-COOH$  (L) a través de los factores de conversión que los relaciona (tabla 10 de la memoria) y finalmente obtener la adición de acético teórica al 80%, última columna de la tabla 4. Este cálculo está en el apartado 3.4 de la memoria junto con las ecuaciones necesarias. (Ecuaciones 9-10-11, de la memoria).

Tabla 4. Valores teóricos y reales de adición de acético en la puesta en marcha.

	<b>L/DÍA ADICIONAMOS REALES</b>	<b>CARGA ENTRADA (g)</b>	<b>CH<sub>3</sub>-COOH (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>CH<sub>3</sub>-COOH (L)</b>	<b>CH<sub>3</sub>-COOH al 80% TEÓRICOS</b>
13-may	11,84	1183,92	5026,51	5,03	6,28
18-may	11,84	501,28	2128,26	2,13	2,66
19-may	11,84	292,04	1239,89	1,24	1,55
23-may	11,84	1152,94	4894,99	4,89	6,12
25-may	11,84	822,86	3493,57	3,49	4,37
31-may	11,84	663,77	2818,15	2,82	3,52
9-jun	11,84	762,51	3237,38	3,24	4,05
13-jun	11,84	877,71	3726,48	3,73	4,66
14-jun	11,84	916,11	3889,51	3,89	4,86
15-jun	11,84	625,37	2655,12	2,66	3,32
16-jun	11,84	603,43	2561,95	2,56	3,20
20-jun	7,79	808,52	3432,69	3,43	4,29
21-jun	11,84	747,50	3173,62	3,17	3,97
24-jun	3,74	575,35	2442,75	2,44	3,05
28-jun	3,74	753,11	3197,46	3,20	4,00
29-jun	3,74	275,42	1169,36	1,17	1,46

## 6. Anexo F. Valores de los parámetros obtenidos en el periodo estable de funcionamiento de la planta piloto

A partir de los análisis de laboratorio se obtienen los valores de nitratos (mg/L) de entrada y salida de la planta piloto que se muestran en la tabla 6. La carga de entrada y salida ( $\text{g/m}^3 \text{ h}$ ) se obtiene a partir de la ecuación 15 de la memoria.

*Tabla 5. Caudal y TRH en los periodos estables de tratamiento.*

	<b>Caudal (<math>\text{m}^3/\text{h}</math>)</b>	<b>Caudal (<math>\text{m}^3/\text{día}</math>)</b>	<b>TRH (h, min)</b>
16/8/22	0,36	8,70	5,30
16/8/22	0,36	8,70	5,30
17/8/22	0,36	8,70	5,30
18/8/22	0,48	11,62	4,00
18/8/22	0,48	11,62	4,00
22/8/22	0,48	11,62	4,00
23/8/22	0,56	13,53	4,00
24/8/22	0,56	13,53	3,30
31/8/22	0,56	13,53	3,30
2/9/22	0,56	13,53	3,30
5/9/22	0,78	18,62	2,35
5/9/22	0,78	18,62	2,35
6/9/22	0,97	23,33	2,00
7/9/22	0,97	23,33	2,00
8/9/22	0,97	23,33	2,00
8/9/22	0,97	23,33	2,00
9/9/22	1,25	30,07	1,36
12/9/22	1,25	30,07	1,36



Tabla 6. Análisis de nitratos en el periodo estable de tratamiento.

	Entrada NO <sub>3</sub> (mg/l)	Salida NO <sub>3</sub> (mg/l)	Carga entrada NO <sub>3</sub> (g/m <sup>3</sup> h)	Carga Salida NO <sub>3</sub> (g/m <sup>3</sup> h)
16/8/22	28,60	0,60	5,18	0,11
16/8/22	29,7	0,3	5,38	0,05
17/8/22	27,5	0,3	4,98	0,05
18/8/22	24,1	1,1	5,83	0,27
18/8/22	23,6	0,8	5,71	0,19
22/8/22	31,6	4,6	7,65	1,11
23/8/22	25,2	6,7	7,10	1,89
24/8/22	25,2	5,7	7,10	1,61
31/8/22	20,4	1,3	5,75	0,37
2/9/22	17,6	3,4	4,96	0,96
5/9/22	21,3	2,8	8,26	1,09
5/9/22	20,6	3,6	7,99	1,40
6/9/22	21,9	10,3	10,64	5,01
7/9/22	9	0	4,37	0,00
8/9/22	17,2	4,4	8,36	2,14
8/9/22	16,4	4,2	7,97	2,04
9/9/22	12,3	1,3	7,71	0,81
12/9/22	25,9	12,6	16,23	7,89

En la tabla 7 están los valores de nitratos eliminados (g/m<sup>3</sup> h) y rendimiento (%) obtenidos a partir de la ecuación 14 y 16 de la memoria, respectivamente.

Tabla 7. Nitratos eliminados y rendimiento.

	<b>NO<sub>3</sub> eliminado (g /m<sup>3</sup> h)</b>	<b>Eliminación (%)</b>
16/8/22	5,08	97,90
16/8/22	5,33	98,99
17/8/22	4,93	98,91
18/8/22	5,57	95,44
18/8/22	5,52	96,61
22/8/22	6,54	85,44
23/8/22	5,21	73,41
24/8/22	5,50	77,38
31/8/22	5,38	93,63
2/9/22	4,00	80,68
5/9/22	7,18	86,85
5/9/22	6,59	82,52
6/9/22	5,64	52,97
7/9/22	4,37	100,00
8/9/22	6,22	74,42
8/9/22	5,93	74,39
9/9/22	6,89	89,43
12/9/22	8,33	51,35