



Ensayos *jar-test* y medición del tamaño y distribución de partículas para el control y optimización del tratamiento terciario de una EDAR

La normativa actual en vigor en España para la reutilización de aguas (RD 1620/2007) y la nueva normativa europea aprobada recientemente (Reglamento (UE) 2020/741 del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de mayo de 2020 relativo a los requisitos mínimos para la reutilización del agua) imponen estrictas normas de calidad para el agua reutilizada. Para asegurar el cumplimiento de estas normativas se requiere un adecuado control y optimización de procesos, tanto existentes, como de futura implantación en las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR). En este trabajo se estudia el control y optimización del funcionamiento del tratamiento terciario de una EDAR mediante una herramienta muy conocida, pero quizás infrutilizada en el tratamiento de aguas residuales urbanas. Esta herramienta no es otra que el ensayo *jar-test*, que permite la optimización del consumo de coagulante y floculante. Esta herramienta se combina con la medición del tamaño y distribución de partículas, una técnica utilizada fundamentalmente en el tratamiento de agua potable, aunque poco usada en el campo del tratamiento de aguas residuales urbanas.

Palabras clave

EDAR, tratamiento terciario, ensayo *jar-test*, coagulación, floculación, reutilización de agua, partículas, medición del tamaño y distribución de partículas.

USING JAR-TEST AND PARTICLE COUNT TECHNIQUES FOR CONTROL AND OPTIMIZATION OF PHYSICAL-CHEMICAL TREATMENTS IN WWTP TERTIARY TREATMENTS

The current regulations in force in Spain for the reuse of water (RD 1620/2007) and the new European regulations recently approved (Regulation (EU) 2020/741 of the European Parliament and of the Council of May 25, 2020 regarding the minimum requirements for water reuse) impose strict quality standards for reused water. To ensure compliance with these regulations, adequate control and optimization of processes, both existing and of future implementation in wastewater treatment plants (WWTP), is necessary. In this work, control and optimization of the tertiary treatment operation of a WWTP is studied using a well-known tool, but perhaps underused in the treatment of municipal wastewater. This tool is the jar-test that allows optimization of the consumption of coagulant and flocculant in a tertiary treatment. This tool is combined with the measurement of particles size and distribution, a technique used mainly in drinking water treatment, although little used in the field of urban wastewater treatment.

Keywords

WWTP, tertiary treatment, jar-test, coagulation, flocculation, water reuse, particles, measurement of particle size and distribution.

J. Marcos Pérez García

licenciado en Ciencias Químicas, jefe de Equipo de Control de EDAR en Técnica y Proyectos, S.A. (Typs)

Ana Penalva García

ingeniera química, técnica de I+D en Técnica y Proyectos, S.A. (Typs)

Pedro Simón Andreu

ingeniero industrial, director técnico de la Entidad de Saneamiento y Depuración de la Región de Murcia (Esamur)

Manuel Abellán Soler

ingeniero agrónomo, técnico de Explotación Zona I de la Entidad de Saneamiento y Depuración de la Región de Murcia (Esamur)



1. INTRODUCCIÓN

En la Región de Murcia se reutilizan para uso agrícola, de forma directa o indirecta, casi el 100% de las aguas residuales urbanas tratadas. Es necesario, por tanto, asegurar en todo momento el cumplimiento de la normativa española de reutilización de aguas (RD 1620/2007) y, en un futuro próximo, la todavía más exigente normativa europea recientemente aprobada (Reglamento (UE) 2020/741 del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de mayo de 2020 relativo a los requisitos mínimos para la reutilización del agua). Para asegurar el cumplimiento de estas normativas es necesario un adecuado control y optimización de procesos, tanto existentes como de futura implantación en las EDAR.

En este trabajo se estudia el control y optimización del funcionamiento del tratamiento terciario de una EDAR utilizando una herramienta muy conocida, el ensayo *jar-test*, que permite la optimización del consumo de coagulante y floculante en un tratamiento terciario. Esta herramienta se combina con la medición del tamaño y distribución de partículas, una técnica utilizada fundamentalmente en el tratamiento de agua potable, aunque poco usada en el campo del tratamiento de aguas residuales urbanas.

Se introduce en este trabajo la medición del tamaño y distribución de partículas, ya que se considera que a mayor eliminación de partículas, más efectiva es la eliminación de ciertos elementos microbiológicos incluidos en la nueva normativa europea, como las esporas de *Clostridium perfringens*. En un trabajo anterior (Pérez García *et al.*, 2020), los autores ya apuntaban a la eliminación del entorno de 1 unidad logarítmica de esporas de *Clostridium perfringens* en el tratamiento físico-químico de una EDAR antes de la desinfección.

El objeto de este trabajo es desarrollar una metodología sencilla y objetiva para obtener datos de dosificación de coagulante y floculante en los tratamientos físico-químicos de las EDAR, mediante la realización de ensayos *jar-test*.

2. OBJETO

Se propone un método gráfico que permite discriminar de forma sencilla los resultados, y así poder seleccionar las dosis más adecuadas según el objetivo buscado. En este trabajo se buscaron las dosificaciones óptimas para maximizar de forma conjunta la eliminación de color, turbidez, partículas e incremento de la transmitancia.

En dos fechas diferentes se tomaron dos muestras del efluente secundario de una EDAR para realizar ensayos *jar-test* con el objetivo de encontrar las dosis óptimas de coagulante y floculante. El efluente de esta EDAR se caracteriza por su elevada coloración, turbidez y baja transmitancia.

3. METODOLOGÍA

La EDAR seleccionada posee las siguientes características: tratamiento secundario de fangos activos de aireación prolongada y con eliminación biológica de N; y tratamiento terciario con cámaras de coagulación-floculación, decantación lamelar, filtros abiertos de arena y desinfección UV (lámparas de baja presión) en canal.

En este trabajo se han ensayado dosis de sulfato desde 10 mg/L hasta 220 mg/L y de polielectrolito desde 0,4 mg/L hasta 1 mg/L siguiendo el procedimiento experimental que se describe a continuación. Para facilitar la selección de la dosis óptima se propone un método gráfico que permite discriminar de forma sencilla los resultados y, así, poder seleccionar las dosis más adecuadas según el objetivo buscado.

El floculador utilizado posee 4 posiciones. El procedimiento seguido es el siguiente:

- Paso 1. Se preparan las disoluciones de coagulante y floculante comerciales para su adición a las muestras según las dosis buscadas.

3.1. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

- Paso 2. Se llenan los 4 matraces de 1 L con muestra y se añade sulfato de aluminio para conseguir diferentes concentraciones.

- Paso 3. Se selecciona una agitación fuerte (200 rpm), se añade el coagulante, se agita durante 1 min.

- Paso 4. Se baja la agitación a lenta (30 rpm) durante unos 10 min.

- Paso 5. Se deja decantar durante 30 min.

- Paso 6. Se miden los siguientes parámetros: color, turbidez, transmitancia y tamaño y distribución de partículas.

- Paso 7. Se miden los siguientes parámetros: color, turbidez, transmitancia y tamaño y distribución de partículas.

- Paso 8. Después se dejan decantar durante 30 min y se toman muestras para el análisis de turbidez, color, transmitancia y tamaño y distribución de partículas.

- Paso 9. Se repiten los pasos 7 y 8 para diferentes dosificaciones de sulfato.

- Paso 10. Se repiten los pasos 7 y 8 para diferentes dosificaciones de sulfato.

- Paso 11. Se repiten los pasos 7 y 8 para diferentes dosificaciones de sulfato.

4. MEDIOS MATERIALES

4.1. INSTRUMENTACIÓN

En cuanto a la instrumentación, se ha empleado el medidor Pamas S403. Se trata de un medidor de tamaño y distribución de partículas portátil, que utiliza el método de extinción del haz de luz, con capacidad para analizar muestras puntuales o bien instalarse en línea (**Figura 1**).

También se ha empleado un equipo floculador de 4 posiciones de la marca Selecta (**Figura 2**), el espectrofotómetro Hach DR1900 para medir el color en las muestras y el turbidímetro portátil Hach 2100Q para medir turbidez. Finalmente, la medida de la transmitancia se ha realizado mediante un medidor portátil de transmitancia Ultraqua (**Figura 3**).

4.2. REACTIVOS

Como reactivos se ha utilizado sulfato de alúmina (8,2-8,3% Al_2O_3) y polielectrolito aniónico de Pm medio de los habitualmente utilizados en los tratamientos terciarios de las EDAR y según recomendación del suministrador.

5. MEDICIONES

Se realizaron ensayos *jar-test* con el efluente secundario de una EDAR que presentaba una coloración y turbidez elevadas. Se aplicó el procedimiento experimental descrito en el apartado 3.1.

En las pruebas 0 y 1 solamente se añadió sulfato, mientras que las pruebas 2, 3, 4, 5 y 6 se realizaron con sulfato + polielectrolito. En cada prueba se realizaron 4 ensayos nombrados con el número de la prueba seguido del número de ensayo, por ejemplo: prueba 1-ensayo 1 = ensayo 1.1.

FIGURA 1. Medidor Pamas S403.



FIGURA 2. Floculador Selecta de 4 posiciones.

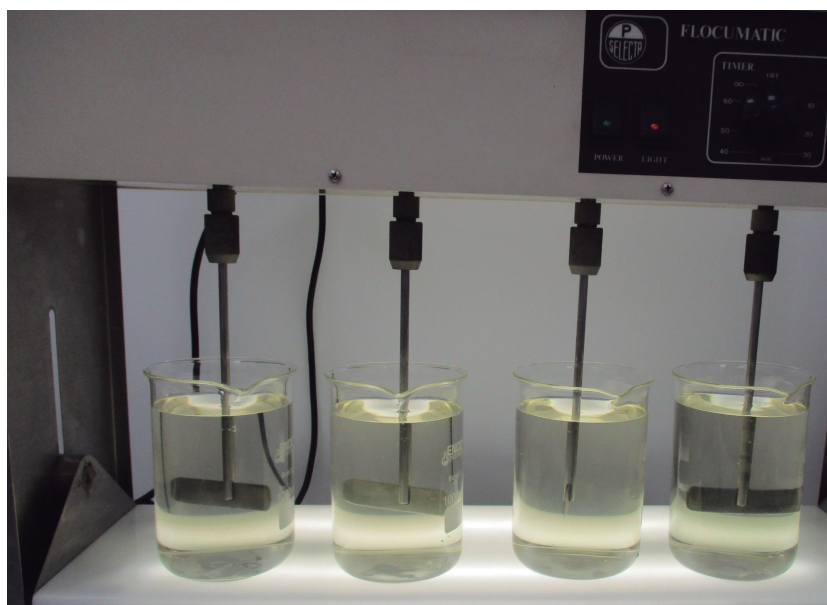


FIGURA 3. Medidor de transmitancia Ultraqua.





5.1. PRUEBAS REALIZADAS

Debido al elevado número de ensayos a realizar, las pruebas para cada muestra fueron realizadas a lo largo de dos días. Las muestras se mantuvieron en el frigorífico y se esperó a equilibrar la temperatura con el ambiente antes de realizar las pruebas *jar-test*. Con cada set de pruebas se midieron de nuevo los parámetros iniciales (**Tablas 1 y 2**).

Para la muestra del 24/02/2020, se realizaron las pruebas 2, 3, 4, 5 y 6 con concentraciones crecientes de sulfato desde 80 hasta 220 mg/L. En cada prueba se efectuaron 4 ensayos con dosificaciones de poli de 0,4, 0,6, 0,8 y 1 mg/L. Las pruebas 0 y 1 se realizaron solo con sulfato (sin adición de polielectrolito) con concentraciones de 40 a 180 mg/L.

Para la muestra del 20/04/2020, se realizaron las pruebas 2, 3, 4, 5 y 6 con concentraciones crecientes de sulfato desde 30 hasta 80 mg/L. En cada prueba se efectuaron 4 ensayos con dosificaciones de poli de 0,4, 0,6, 0,8 y 1 mg/L. Las pruebas 0 y 1 se realizaron solalmente con sulfato (sin adición de polielectrolito) con concentraciones de 10 a 100 mg/L.

5.2. TABLAS DE DATOS

En las **Tablas 1 y 2** se incluyen las analíticas del efluente secundario correspondientes a las dos fechas de toma de muestras. A destacar la mala calidad del efluente secundario de esta EDAR en cuanto a turbidez, color, transmitancia y número de partículas, especialmente en la muestra de fecha 24/02/2020 por la entrada de un vertido de origen industrial de color naranja.

Se realizaron mediciones de turbidez, color, transmitancia y partículas en la muestra de efluente secunda-

TABLA 1

MEDICIONES INICIALES EN LAS MUESTRAS DE EFLUENTE SECUNDARIO DEL 24/02/2020.

Efluente secundario	Turbidez (NTU)	Color (unidad Co Pt)	Transmitancia (%)	Número de partículas/mL
Prueba 0 y 1	23,3	592	30,2	160.041,5
Pruebas 2, 3 y 4	23,2	600	35,2	150.631,1
Pruebas 5 y 6	21,7	626	37,4	133.849,4

TABLA 2

MEDICIONES INICIALES EN LAS MUESTRAS DE EFLUENTE SECUNDARIO DEL 20/04/2020.

Efluente secundario	Turbidez (NTU)	Color (unidad Co Pt)	Transmitancia (%)	Número de partículas/mL
Prueba 0 y 1	13,6	323	46,2	150.438,0
Pruebas 2, 3 y 4	12,8	314	47,3	147.759,0
Pruebas 5 y 6	12,7	290	48,6	130.604,4

rio al comienzo de cada set de pruebas. Estos resultados son los que se incluyen en las **Tablas 1 y 2**.

En las **Tablas 3 y 4** se incluyen las pruebas realizadas y los resultados obtenidos. La **Tabla 3** corresponde a la muestra del día 24/02/2020, mientras que la **Tabla 4** corresponde a la muestra del 20/04/2020. En ambas tablas se marcan en verde los resultados seleccionados de cada prueba.

5.3. GRÁFICAS DE DATOS

Para cada una de las pruebas *jar-test* realizadas se representaron con gráficas los resultados analíticos de color, transmitancia, turbidez y porcentaje de eliminación de partículas en el eje Y. En el eje X se representan las dosis de sulfato en el caso de las pruebas con solo sulfato, y las dosis de polielectrolito en el caso de dosificación sulfato + poli.

En cada una de las gráficas se obtienen 4 puntos para cada dosis, que representan los valores de color, transmitancia, turbidez y porcentaje de eliminación de partículas obtenidos después de la coagulación - flo-

culación. De esta manera se observa fácilmente qué dosis proporciona los mejores valores de los cuatro parámetros indicados. Estos puntos son los que se muestran en el interior de una línea azul.

Así, para la muestra del 24/02/2020, las **Figuras 4 y 5** presentan las gráficas correspondientes a la dosificación de sulfato solo, sin polielectrolito (pruebas 0 y 1). En las **Figuras 6, 7, 8, 9 y 10** se representan las dosificaciones de polielectrolito para cada una de las dosis de sulfato (pruebas de 2 a 6). Las **Figuras 11 y 12** muestran el montaje *jar-test* y el resultado final de la prueba 4 y el ensayo 4.3.

Para la muestra del 20/04/2020, las **Figuras 13 y 14** presentan las gráficas correspondientes a la dosificación de sulfato solo, sin polielectrolito (pruebas 0 y 1). En las **Figuras 15, 16, 17, 18 y 19** se representan las dosificaciones de polielectrolito para cada una de las dosis de sulfato (pruebas 2, 3, 4, 5 y 6). Finalmente, las **Figuras 20 y 21** muestran el montaje *jar-test* y el resultado final de la prueba 6 y el ensayo 6.4.

TABLA 3

TABLA DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DEL 24/02/2020.

Prueba	Dosis sulfato (mg/L)	Dosis poli (mg/L)	V floc (mL)	Color (ud Pt Co)	Turbidez (NTU)	Transmitancia (%)	% eliminación color	% eliminación turbidez	% incremento transmitancia	% eliminación partículas
Prueba 0										
0.1	40	-	-	550	22,6	30,6	7,1	3,0	1,3	-1,3
0.2	60	-	-	352	14,7	39,2	40,5	36,9	29,8	13,2
0.3	80	-	-	214	8,01	46,7	63,9	65,6	54,6	41,9
0.4	100	-	-	143	5,22	52,6	75,8	77,6	74,2	65,9
Prueba 1										
1.1	120	-	-	113	3,88	56,2	80,9	83,3	86,1	63,6
1.2	140	-	-	101	3,1	58,2	82,9	86,7	92,7	70,1
1.3	160	-	-	86	2,85	59,4	85,5	87,8	96,7	68,8
1.4	180	-	-	82	2,81	60,2	86,1	87,9	99,3	68,7
Prueba 2										
2.1	80	0,4	0,4	147	5,26	56,5	75,5	77,3	60,5	63,0
2.2		0,6	0,6	125	4,36	58,8	79,2	81,2	67,0	64,7
2.3		0,8	0,8	86	3,36	61,6	85,7	85,5	75,0	68,2
2.4		1	1	88	3,52	60,9	85,3	84,8	73,0	65,9
Prueba 3										
3.1	100	0,4	0,4	104	3,93	59,7	82,7	83,1	69,6	59,5
3.2		0,6	0,6	94	3,45	60,8	84,3	85,1	72,7	61,1
3.3		0,8	0,8	77	2,74	62,2	87,2	88,2	76,7	62,7
3.4		1	1	75	2,66	62,7	87,5	88,5	78,1	67,3
Prueba 4										
4.1	120	0,4	0,4	85	2,95	62,9	85,8	87,3	78,7	70,2
4.2		0,6	0,6	90	2,4	64,5	85,0	89,7	83,2	77,5
4.3		0,8	0,8	60	1,79	65,9	90,0	92,3	87,2	76,6
4.4		1	1	62	1,55	66,4	89,7	93,3	88,6	86,1
Prueba 5										
5.1	180	0,4	0,4	57	1,8	67,5	90,9	91,7	80,5	91,4
5.2		0,6	0,6	44	1,2	69,4	93,0	94,5	85,6	89,9
5.3		0,8	0,8	50	1,08	69,6	92,0	95,0	86,1	92,0
5.4		1	1	45	0,91	69,6	92,8	95,8	86,1	94,3
Prueba 6										
6.1	220	0,4	0,4	63	1,26	69,9	89,9	94,2	86,9	81,0
6.2		0,6	0,6	49	1,28	69,9	92,2	94,1	86,9	86,9
6.3		0,8	0,8	58	0,9	70,9	90,7	95,9	89,6	93,4
6.4		1	1	43	0,8	70,8	93,1	96,3	89,3	96,4



TABLA 4

TABLA DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DEL 20/04/2020.

Prueba	Dosis sulfato (mg/L)	Dosis poli (mg/L)	V floc (mL)	Color (ud Pt Co)	Turbidez (NTU)	Transmitancia (%)	% eliminación color	% eliminación turbidez	% incremento transmitancia	% eliminación partículas
Prueba 0										
0.1	10	-	-	320	13	46,2	0,9	4,4	0,0	0,0
0.2	20	-	-	317	12,9	46,9	1,9	5,1	1,5	-3,7
0.3	30	-	-	259	10,6	51,6	19,8	22,1	11,7	12,6
0.4	40	-	-	165	6,41	59,8	48,9	52,9	29,4	32,5
Prueba 1										
1.1	50	-	-	142	5,35	62,3	56,0	60,7	34,8	34,4
1.2	60	-	-	104	3,9	66,4	67,8	71,3	43,7	46,9
1.3	80	-	-	73	2,52	67,2	77,4	81,5	45,5	62,7
1.4	100	-	-	64	2,17	72,4	80,2	84,0	56,7	67,5
Prueba 2										
2.1	30	0,4	0,4	168	6,51	59,7	46,5	49,1	26,2	23,7
2.2		0,6	0,6	127	4,9	63,3	59,6	61,7	33,8	34,1
2.3		0,8	0,8	99	3,58	66,3	68,5	72,0	40,2	47,9
2.4		1	1	93	3,24	66,4	70,4	74,7	40,4	55,7
Prueba 3										
3.1	40	0,4	0,4	197	5,3	60,7	56,4	58,6	28,3	36,8
3.2		0,6	0,6	91	3,4	65,6	71,0	73,4	38,7	52,4
3.3		0,8	0,8	79	2,81	65,8	74,8	78,0	39,1	65,0
3.4		1	1	65	2,27	68,9	79,3	82,3	45,7	77,0
Prueba 4										
4.1	50	0,4	0,4	105	2,11	63,7	66,6	83,5	34,7	61,6
4.2		0,6	0,6	72	2,34	68,4	77,1	81,7	44,6	77,4
4.3		0,8	0,8	60	1,99	69,6	80,9	84,5	47,1	81,3
4.4		1	1	60	1,97	69,7	80,9	84,6	47,4	84,5
Prueba 5										
5.1	60	0,4	0,4	97	3,2	65,3	66,6	74,8	34,4	67,8
5.2		0,6	0,6	67	2,23	68,4	76,9	82,4	40,7	76,1
5.3		0,8	0,8	56	1,84	69,8	80,7	85,5	43,6	81,3
5.4		1	1	50	1,54	70,2	82,8	87,9	44,4	84,8
Prueba 6										
6.1	80	0,4	0,4	61	2,29	68,4	79,0	82,0	40,7	81,1
6.2		0,6	0,6	53	1,77	69,7	81,7	86,1	43,4	83,7
6.3		0,8	0,8	50	1,52	70,1	82,0	88,0	44,2	86,9
6.4		1	1	43	1,24	70,9	85,2	90,2	45,9	90,3

FIGURA 4. Prueba 0 de la muestra del 24/02/2020.

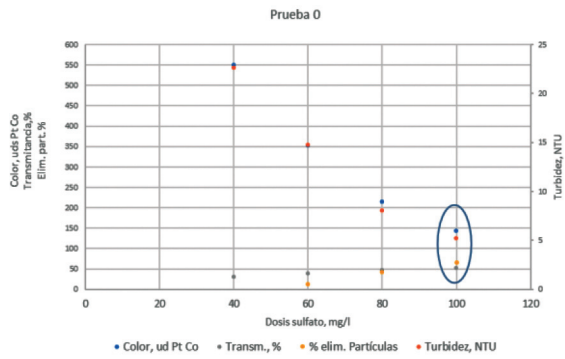


FIGURA 5. Prueba 1 de la muestra del 24/02/2020.

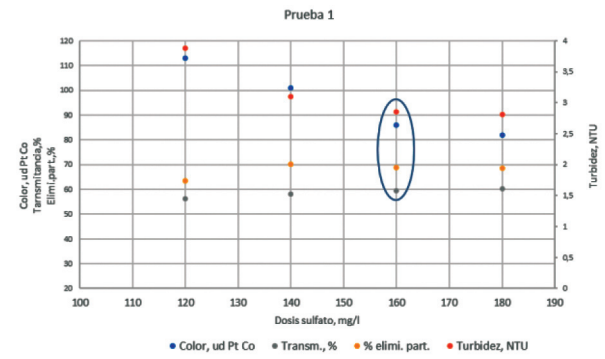


FIGURA 6. Prueba 2 de la muestra del 24/02/2020.

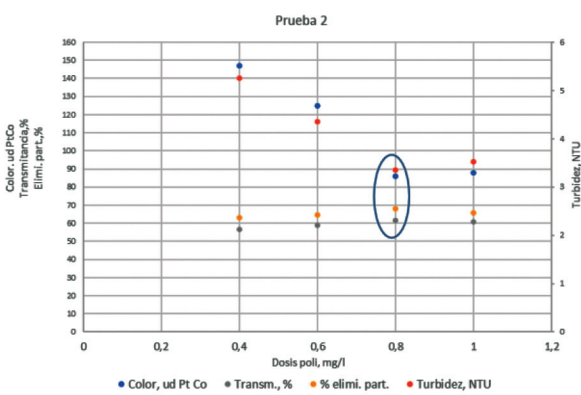


FIGURA 7. Prueba 3 de la muestra del 24/02/2020.

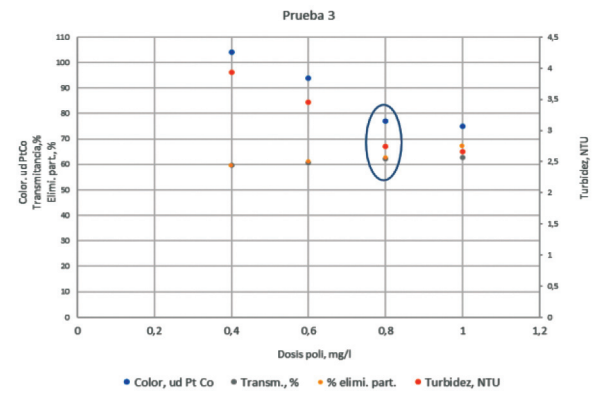


FIGURA 8. Prueba 4 de la muestra del 24/02/2020.

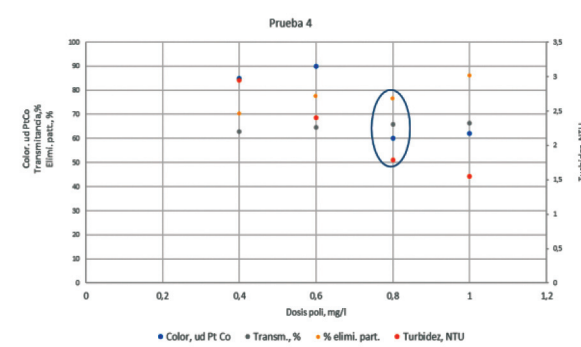


FIGURA 9. Prueba 5 de la muestra del 24/02/2020.

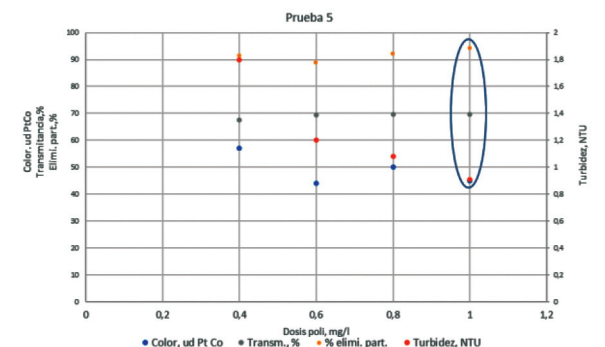


FIGURA 10. Prueba 4 de la muestra del 24/02/2020.

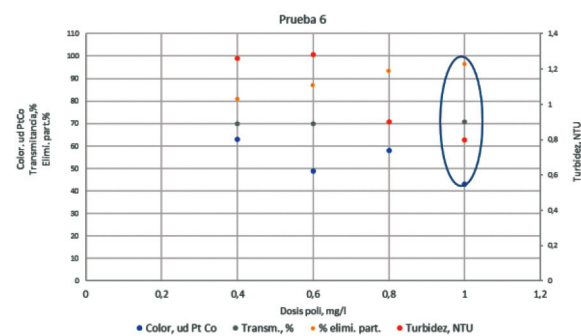


FIGURA 11. Montaje en el floculador. Resultado final, prueba 4.

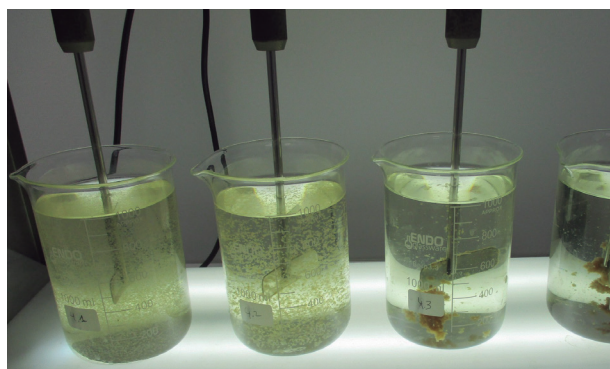




FIGURA 12. Montaje en el floculador. Resultado final, ensayo 4.3.

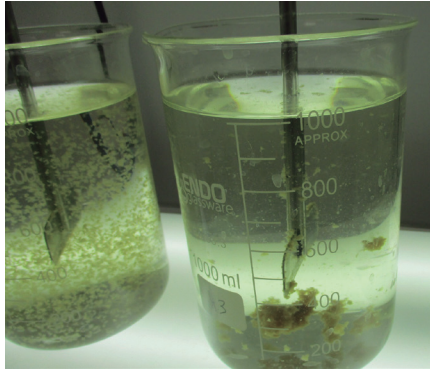


FIGURA 13. Prueba 0 de la muestra del 20/04/2020.

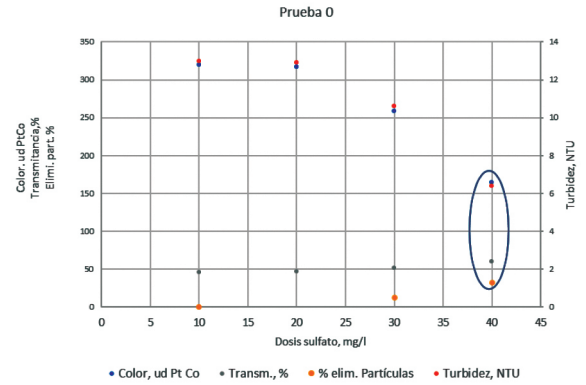


FIGURA 14. Prueba 1 de la muestra del 20/04/2020.

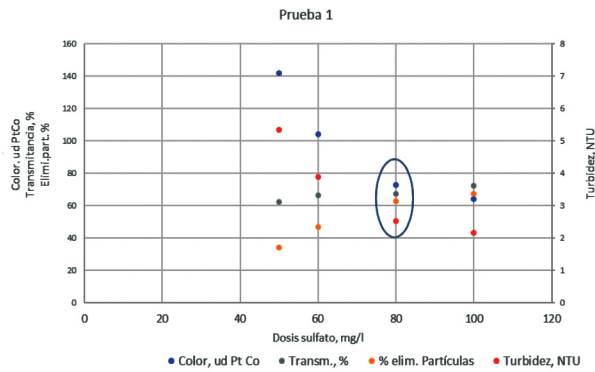


FIGURA 15. Prueba 2 de la muestra del 20/04/2020.

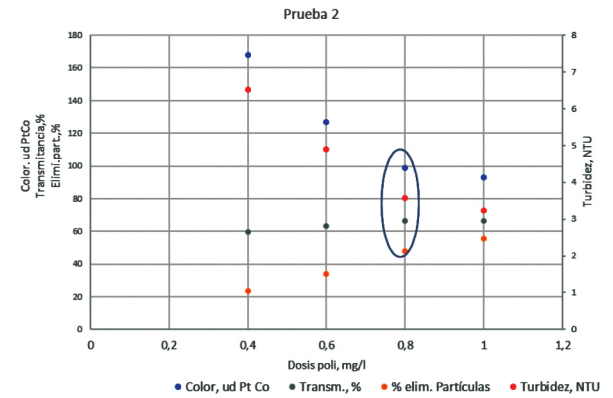


FIGURA 16. Prueba 3 de la muestra del 20/04/2020.

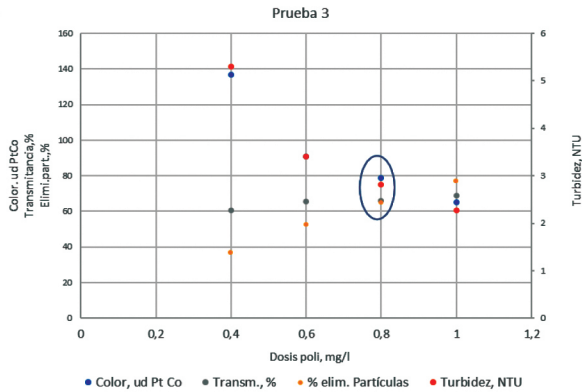


FIGURA 17. Prueba 4 de la muestra del 20/04/2020.

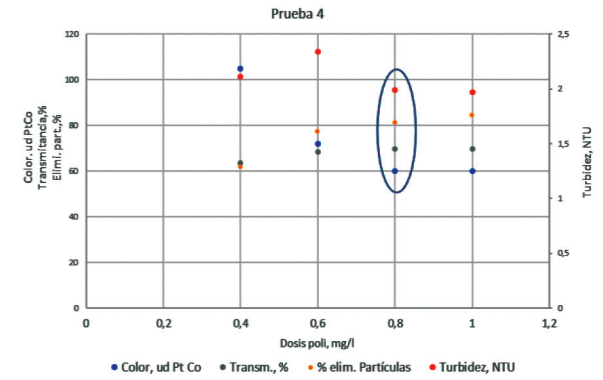


FIGURA 18. Prueba 5 de la muestra del 20/04/2020.

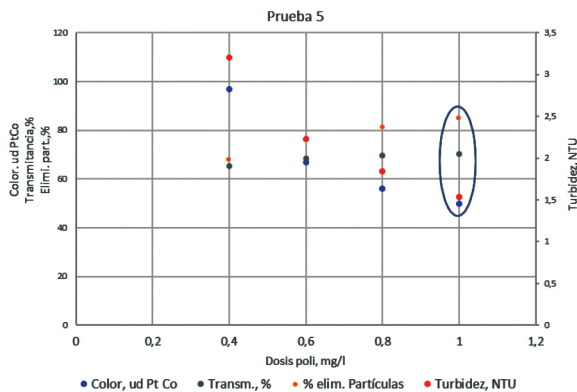


FIGURA 19. Prueba 6 de la muestra del 20/04/2020.

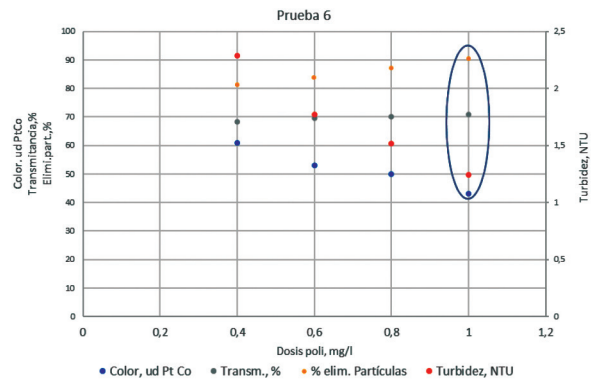


FIGURA 20. Montaje *jar-test*. Resultados finales, prueba 6.

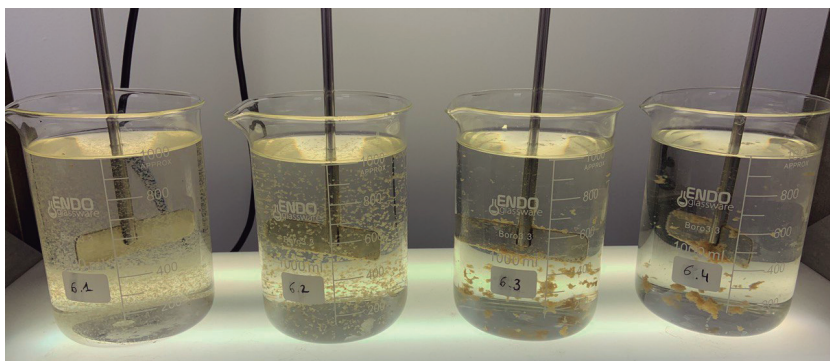
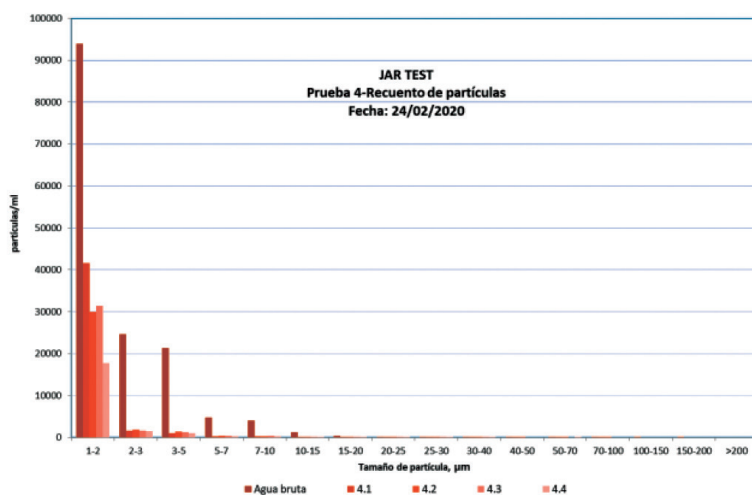


FIGURA 22. Tamaño y distribución de partículas. Prueba 4 del 24/02/2020.



5.4. TAMAÑO Y DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULAS

Se realizaron análisis de tamaño y distribución de partículas, tomando muestras del agua inicial y final para cada ensayo *jar-test*. Los resultados del porcentaje de eliminación de partículas se incluyen en las **Tablas 3 y 4**.

La **Figura 22** y las **Tablas 5 y 6** corresponden a los resultados del análisis de tamaño y distribución de partículas de una de las pruebas *jar-test*. Se incluyen como ejemplo de la información que ofrece esta técnica (4). Aunque en todas las pruebas *jar-test* se obtuvieron resultados de este tipo, dado el alcance de este trabajo solo se incluyen los rendimientos de eliminación de partículas totales (**Tablas 3 y 4**).

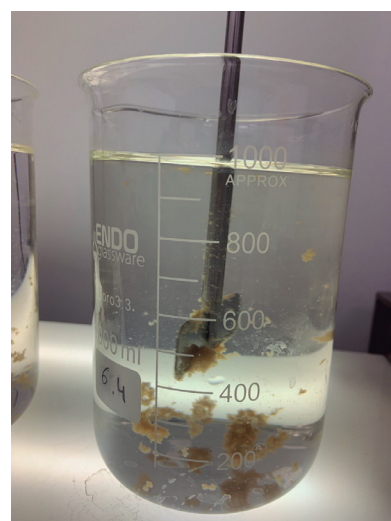
5.5. SELECCIÓN DE RESULTADOS

Se han tomado como parámetros indicadores el color, la turbidez, la transmitancia y el rendimiento de eliminación de partículas totales (% eliminación de partículas). En general, se puede decir que, a mayor dosis de sulfato, mayor reducción del número de partículas, con rendimientos totales de eliminación de hasta el 96,4% (que es el caso del ensayo 6.4 del 24/02/2020).

Para la muestra del 24-02-2020, la **Tabla 7** muestra los mejores resultados de todas las pruebas, resultados que también se representan en la **Figura 23**, en la que se selecciona el ensayo más adecuado (ensayo 4.3), de color naranja en la tabla.

Se selecciona el ensayo 4.3 teniendo en cuenta que es el que da me-

FIGURA 21. Resultado final ensayo 6.4.



jores resultados con unas dosis de coagulante y floculante aceptables. Aunque se obtienen mejores resultados en las pruebas 5 y 6, las dosis de coagulante y floculante son muy elevadas. Si el objetivo fuera la mayor eliminación posible de partículas, habría que seleccionar la prueba 5 o la 6.

En cuanto al tamaño y distribución de partículas, en general se puede decir que, a mayor dosis de sulfato, mayor reducción del número de partículas, con rendimientos totales de eliminación de hasta el 96,4% (que es el caso del ensayo 6.4). En el ensayo 4.3 seleccionado, el rendimiento total de eliminación de partículas es del 76,6%.

Para la muestra del 20-04-2020, la **Tabla 8** muestra los mejores resultados de todas las pruebas, que también se representan en la **Figura 24**, en la que se seleccionan los mejores resultados de entre los mejores (color naranja en la tabla).

Se han seleccionado los ensayos 4.3, 5.4 y 6.4, ya que con todos ellos se obtienen buenos resultados a dosis ajustadas de reactivos. La elección de las dosis se hará en función del objetivo que se busque en cuanto a los parámetros anali-



TABLA 5

RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE TAMAÑO Y DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULAS DE LAS PRUEBAS JAR-TEST A FECHA DEL W24/02/2020.

Tamaño (µm)	Agua bruta	4.1	4.2	4.3	4.4
	Partículas/mL	Partículas/mL	Partículas/mL	Partículas/mL	Partículas/mL
1-2	93.840,1	41.606,4	29.894	31.403,5	17.671,2
2-3	24.621,8	1.624,3	1.838,9	1.601,5	1.504
3-5	21.356,1	931,6	1.325,7	1.243,3	1.045,7
5-7	4.691,1	300,9	382,9	378,2	279,4
7-10	3.999	287,8	309,2	431,1	297,1
10-15	1.182,9	48,7	55,9	164,7	118,3
15-20	374,7	8,9	9,5	36	26,9
20-25	184,2	2,5	2,6	8	6,2
25-30	104,5	1	1	2,1	1,3
30-40	116,6	0,8	1	0,7	0,5
40-50	65,7	0,3	0,2	0	0
50-70	62	0,3	0,2	0	0,1
70-100	26,2	0,2	0,2	0	0
100-150	5,7	0	0	0	0
150-200	0,5	0	0	0	0
>200	0	0	0	0	0
Total	150.631,1	44.813,7	33.821,3	35.269,7	20.950,7

TABLA 6

RENDIMIENTO DE ELIMINACIÓN DE PARTÍCULAS POR COAGULACIÓN - FLOCULACIÓN A FECHA DEL 24/02/2020.

Tamaño (µm)	4.1	4.2	4.3	4.4
1-2	55,7	68,1	66,5	81,2
2-3	93,4	92,5	93,5	93,9
3-5	95,6	93,8	94,2	95,1
5-7	93,6	91,8	91,9	94,0
7-10	92,8	92,3	89,2	92,6
10-15	95,9	95,3	86,1	90,0
15-20	97,6	97,5	90,4	92,8
20-25	98,6	98,6	95,7	96,6
25-30	99,0	99,0	98,0	98,8
30-40	99,3	99,1	99,4	99,6
40-50	99,5	99,7	100,0	100,0
50-70	99,5	99,7	100,0	99,8
70-100	99,2	99,2	100,0	100,0
100-150	100,0	100,0	100,0	100,0
150-200	-	-	-	-
>200	-	-	-	-
Rendimiento de eliminación total (%)	70,2	77,5	76,6	86,1

zados. Como interesa asegurar la mayor eliminación posible de esporas de *clostridium perfringens*, se elige el ensayo 6.4, que consigue una mayor eliminación de partícu-

las con una dosificación razonable de sulfato.

En cuanto al tamaño y distribución de partícula, en general se puede decir que, a mayor dosis de sulfa-

to, mayor reducción del número de partículas, con rendimientos totales de eliminación de hasta el 90,3%, que es el caso del ensayo 6.4 del 20/04/2020 (Tabla 3).

TABLA 7

MEJORES RESULTADOS DE TODAS LAS PRUEBAS EN LA MUESTRA DEL 24/02/2020.

Prueba n°	Ensayo	Dosis sulfato (mg/L)	Dosis poli (mg/L)	Color (ud Pt Co)	Turbidez (NTU)	Transmitancia (%)	% eliminación color	% eliminación turbidez	% incremento transmitancia	% eliminación partículas
0	0.4	100	-	143	5,22	52,6	75,8	77,6	74,2	65,9
1	1.3	160	-	86	2,85	59,4	85,5	87,8	96,7	68,8
2	2.3	80	0,8	86	3,36	61,6	85,7	85,5	75,0	68,2
3	3.3	100	0,8	77	2,74	62,2	87,2	88,2	76,7	62,7
4	4.3	120	0,8	60	1,79	65,9	90,0	92,3	87,2	76,6
5	5.4	180	1	45	0,91	69,6	92,8	95,8	86,1	94,3
6	6.4	220	1	43	0,8	70,8	93,1	96,3	89,3	96,4

TABLA 8

MEJORES RESULTADOS DE TODAS LAS PRUEBAS EN LA MUESTRA DEL 20/04/2020.

Prueba n°	Ensayo	Dosis sulfato (mg/L)	Dosis poli (mg/L)	Color (ud Pt Co)	Turbidez (NTU)	Transmitancia (%)	% eliminación color	% eliminación turbidez	% incremento transmitancia	% eliminación partículas
0	0.4	40	-	165	6,41	59,8	48,9	52,9	29,4	32,5
1	1.3	80	-	73	2,52	67,2	77,4	81,5	45,5	62,7
2	2.3	30	0,8	99	3,58	66,3	68,5	72,0	40,2	47,9
3	3.3	40	0,8	79	2,81	65,8	74,8	78,0	39,1	65,5
4	4.3	50	0,8	60	1,99	69,6	80,9	84,5	47,1	81,3
5	5.4	60	1	50	1,54	70,2	82,8	87,9	44,4	84,8
6	6.4	80	1	43	1,24	70,9	85,2	90,2	45,9	90,3

TABLA 9

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS POR CADA UNA DE LAS MUESTRAS.

Fecha	Prueba n°	Ensayo	Dosis sulfato (mg/L)	Dosis poli (mg/L)	Color (ud Pt Co)	Turbidez (NTU)	Trans. (%)	% eliminación color	% eliminación turbidez	% incremento transmitancia	% eliminación partículas
24/02/2020	4	4.3	120	0,8	60	1,79	65,9	90,0	92,3	87,2	76,6
20/04/2020	6	6.4	80	1	43	1,24	70,9	85,2	90,2	45,9	90,3

TABLA 10

DATOS DE COLOR, TURBIDEZ, TRANSMITANCIA Y % DE ELIMINACIÓN DE PARTÍCULAS ANTES Y DESPUÉS DE LOS ENSAYOS SELECCIONADOS.

Fecha	Efluente secundario antes de ensayo			Efluente después de ensayo			% eliminación color	% eliminación turbidez	% incremento transmitancia	% eliminación partículas
	Turbidez (NTU)	Color (ud Pt Co)	Trans. (%)	Turbidez (NTU)	Color (ud Pt Co)	Trans. (%)				
24/02/2020	23,2	600	35,2	1,79	60	65,9	90,5	92,3	87,2	76,6
20/04/2020	12,7	290	48,6	1,24	43	70,9	85,2	90,2	45,9	90,3



FIGURA 23. Selección de los mejores resultados de los ensayos del 24/02/2020.

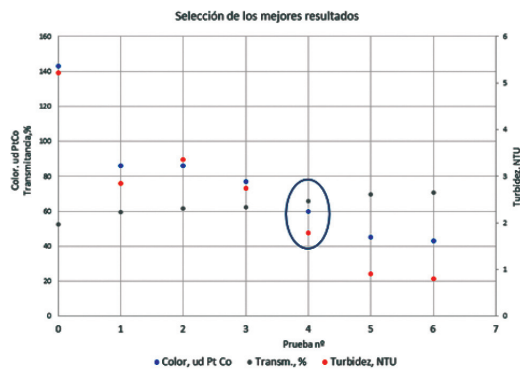
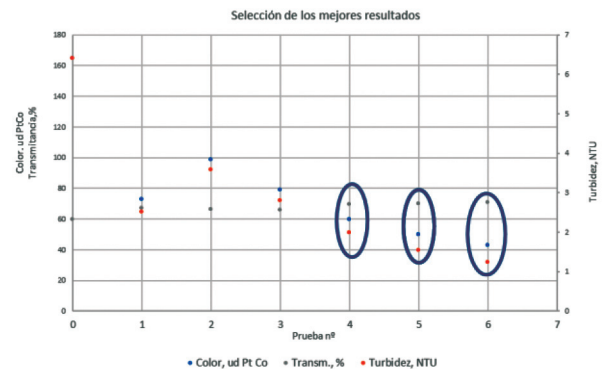


FIGURA 24. Selección de los mejores resultados de los ensayos del 20/04/2020.



6. CONCLUSIONES

Se han realizado ensayos jar-test con el efluente secundario de una EDAR en dos fechas diferentes. Se ensayaron dosificaciones de sulfato de alúmina desde 40 hasta 220 mg/L, y de 10 a 100 mg/L según los casos, y de polielectrolito aniónico entre 0,4 y 1 mg/L. El efluente de esta EDAR destaca por sus elevados valores de turbidez, color y partículas y baja transmitancia. Esto es especialmente significativo para la muestra del 24/02/2020 ya que, por aquel entonces, la EDAR estaba recibiendo un vertido de origen industrial.

Se tomaron la turbidez, el color, la transmitancia y el porcentaje de eliminación de partículas como criterios de selección principales de la dosis de sulfato de alúmina y polielectrolito aniónico. Estos parámetros se representaron gráficamente para cada prueba con el objetivo de permitir una selección objetiva y sencilla de las dosis más adecuadas para el objetivo buscado.

Se considera que un porcentaje de eliminación de partículas elevado posibilita la eliminación de esporas de *clostridium perfringens* en el entorno de 1 ud log. Las esporas de *clostridium perfringens* es uno de los parámetros microbiológicos incluido en la nueva normativa europea de reutilización de aguas.

En el presente trabajo se buscaron las dosificaciones que maximizan de forma conjunta la eliminación del color, turbidez, partículas y el incremento de la transmitancia. Se han tratado de seleccionar las menores dosis posibles que permitan un efluente de excelente calidad. Dependiendo del objetivo que se busque se pueden utilizar dosis menores o mayores, por ejemplo, son posibles dosis menores si solo se busca eliminación de turbidez. Si el objetivo principal es la eliminación de partículas, se necesitan dosis elevadas de sulfato de alúmina.

Dosificando solo sulfato también se consiguen buenos resultados, logrando importantes reducciones de turbidez, color y partículas e incrementos de transmitancia. Cuando más alta es la dosis de sulfato, más altas son las eliminaciones de partículas. La dosis más alta probada fue de 220 mg/L de sulfato y 1 mg/L de poli, obteniéndose 4.869,7 partículas/mL partiendo de 133.849,4 partículas/mL, lo que se corresponde a un 96,4% de rendimiento de eliminación de partículas totales.

Tomando como criterios de selección de dosis el color, la turbidez, la transmitancia y el porcentaje de eliminación de partículas, se realizó una selección de ensayos (Tablas 7 y 8). Aunque estos ensayos no son

los que mejores resultados ofrecen, se seleccionaron por obtener una buena calidad de efluente en todos los parámetros, con unas dosis de reactivos moderadas. En la **Tabla 9** se muestran los resultados de los ensayos seleccionados para cada una de las muestras. En la **Tabla 10** se muestran los datos de color, turbidez, transmitancia y porcentaje de eliminación de partículas antes y después de los ensayos seleccionados.

Este trabajo demuestra que los ensayos jar-test y la medición del tamaño y distribución de partículas son herramientas a tener muy en cuenta para el control y optimización del funcionamiento de los tratamientos terciarios de una EDAR.

Bibliografía

- [1] Diario oficial de la UE (2020). Reglamento (UE) 2020/741 del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de mayo de 2020 relativo a los requisitos mínimos para la reutilización del agua.
- [2] BOE (2007). Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas.
- [3] Pérez García, J.M.; Simón Andreu, P.; Abellán Soler, M. (2020). Ensayos biosimétricos en equipos UV para la inactivación de esporas de *clostridium perfringens*. *Tecnoaqua*, núm. 45, págs. 84-95.
- [4] Pérez García, J.M.; Simón Andreu, P.; Abellán Soler, M. (2021). Medición de tamaño y distribución de partículas en varias EDAR de la Región de Murcia. *Tecnoaqua*, núm. 51, págs. 78-88.
- [5] Bridgeman, J. et al. (2002). The use and application of particle-count data in water treatment. *J. CIWEM*.
- [6] Eisnor J.D. et al. (2001). Evaluation of particle removal water treatment plants in Nova Scotia. *Water Quality Research Journal of Canada*.
- [7] Metcalf & Eddy (2014). *Wastewater engineering. Treatment and resource recovery*. 5ª ed.