

## **Estudio de eliminación de turbidez elevada y NOM y su caracterización en agua de mar mediante coagulación, floculación y flotación**

**Autores:** Carmen Repollés (Investigadora I+D+i, Acciona Agua, carmen.repolles.ramirez@acciona.com), Susana Navea (Investigadora I+D+i, Acciona Agua, Susana.navea.vazquez@acciona.com), Joan Antoni Salvadó (Investigador I+D+i, Acciona Agua, jsalvado@acciona.com), Enrique Ferrero (Jefe de laboratorio I+D+i, Acciona Agua, enrique.ferrero.polo@acciona.com) y Jorge Juan Malfeito (Director de I+D+i, Acciona Agua, jorgejuan.malfeito.sanchez@acciona.com).

### **Resumen:**

En la actualidad, el pretratamiento físico de coagulación, floculación y flotación ha ido ganando importancia en desalinización; sin embargo, resulta necesario estudiarlo en mayor profundidad frente a episodios de elevada turbidez, como los que se ocasionan en episodios de lluvia y/o vientos intensos. La cantidad y características de la NOM del agua varían considerablemente dependiendo de los ciclos biogeoquímicos del entorno. Debido al elevado impacto que la materia orgánica natural (NOM) tiene en el tratamiento de agua resulta esencial caracterizarla y cuantificarla en diferentes situaciones para la optimización de los procesos.

Este estudio está centrado en la utilización de un DAF (“dissolved air flotation) para eliminar la turbidez y NOM de agua de mar procedente de Oriente Medio después de un episodio de lluvia. Los análisis de NOM se han desarrollado mediante cromatografía de líquidos con detección de carbono orgánico disuelto (LC-OCD), y los datos se han tratado mediante un diseño de experimentos (DoE) desarrollados con el software estadístico STATGRAPHICS Centurion XVI.

Los resultados obtenidos muestran la práctica eliminación de la turbidez del agua estudiada (96 %) y que la fracción biogénica de la NOM es la que se reduce en mayor medida (hasta un 29 %). Todo ello apoyado en las correspondientes ecuaciones predictivas.

Por lo tanto, la principal conclusión de este estudio es la confirmación de la viabilidad del proceso de coagulación, floculación y flotación para la eliminación de elevada turbidez del agua mar y en menor medida, pero importante, la eliminación de diferentes fracciones de NOM.

### **Abstract:**

The physical pretreatment of coagulation, flocculation and flotation has been gaining importance in desalination; however, it is necessary to study it in greater depth in the face of episodes of high turbidity, such as those that occur in episodes of rain and / or intense winds. The quantity and characteristics of NOM in seawater currently depends on the biogeochemical cycles of the environment. Due to the high impact that natural organic matter (NOM) has on water treatment, it is essential to characterize and quantify it in different situations for the optimization of processes.

This study focuses on the removal of high turbidity and NOM in seawater that comes from a desalination plant in the Middle East after an episode of rain. NOM analyses were performed with a liquid chromatography with dissolved organic carbon detection (LC-OCD), and the data were processed based on statistical software (STATGRAPHICS Centurion XVI).

The obtained results showed the practical elimination of the turbidity of the studied water (96%) and that the biogenic fraction of the NOM is the one that reduces to a greater extent (up to 29%). All these observations are supported by the corresponding predictive equations.

Therefore, the main conclusion of this study is the confirmation of the viability of the coagulation process, flocculation and flotation for the elimination of high turbidity in seawater and also the elimination of different fractions of NOM.

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Antecedentes

En los últimos diez años se ha optado por el empleo del sistema de flotación por aire disuelto (DAF) como pretratamiento en plantas desalinizadoras de agua de mar por ósmosis inversa (SWRO) para la eliminación de turbidez, NOM, algas así como aceites y grasas [1, 2]. Actualmente, el proceso DAF es ampliamente utilizado en plantas de tratamiento de agua salobre, sin embargo, su aplicación en agua de mar continua siendo a día de hoy bastante limitada ya que las condiciones de operación del DAF en ambientes salinos son diferentes a las aplicadas para tratar aguas superficiales debido a la gran cantidad de sales presentes [3-5].

En determinadas situaciones climatológicas conviene modificar la operación del DAF, como por ejemplo en episodios de lluvia y viento, en los que la entrada de turbidez en la planta SWRO aumenta considerablemente. En estos casos, el sistema DAF puede combinarse en una sola instalación con las cámaras de coagulación y floculación [6].

Por otro lado, la presencia de materia orgánica natural (NOM) en el agua de mar de entrada tiene un impacto significativo en la operación de las plantas SWRO afectando a la proporción y grado de ensuciamiento (biofouling) de las membranas [7, 8]. Es posible reducir la NOM mediante un diseño de la captación que reduzca su concentración por atenuación natural o bien diseñando y operando adecuadamente un sistema de pretratamiento [9]. A pesar de lo bien que se diseñe y opere una planta, las membranas se ensucian con el paso del tiempo al desarrollarse biofilm [10]. Sin embargo, pocos estudios han abordado en profundidad el tema de la eliminación de NOM en agua de mar debido, probablemente, a la dificultad de caracterizar la materia orgánica en este tipo de matriz por el elevado contenido en sales y baja concentración de carbono.

El proceso de pretratamiento tiene un impacto significativo sobre la eficiencia de eliminación de NOM, no solamente respecto a su concentración relativa sino que también en cuanto a la fracción particular eliminada; es de esperar que un proceso de coagulación-floculación-flotación sea adecuado para eliminar materia orgánica natural voluminosa, cargada e hidrofóbica [11].

## 1.2 Objetivos

Los objetivos de esta investigación son evaluar la viabilidad y optimizar un proceso de coagulación-floculación-DAF para eliminar elevada turbidez en agua de mar y también la NOM presente (cada una de sus fracciones). Para ello, este estudio se centra en la eliminación de turbidez elevada en una planta SWRO de Oriente Medio y simultáneamente el efecto sobre la NOM. Para la caracterización de la NOM se ha empleado la cromatografía líquida con detección de carbono orgánico (LC-OCD) que es una técnica cromatográfica basada en la exclusión por tamaño que separa las fracciones de NOM según su tamaño, interacción iónica e interacciones hidrofóbicas con la columna cromatográfica y que tiene suficiente sensibilidad para medir las concentraciones bajas de NOM que contiene el agua de mar.

# 2 METODOLOGÍA

## 2.1 Reactivos

Se empleó hierro (III) cloruro 6-hidrato PRS de Panreac, como agente coagulante ( $\text{Fe}^{3+}$ ).

El agente floculante utilizado era de naturaleza orgánica.

Las muestras de agua de mar procedían de una planta SWRO de Oriente Medio, tomadas durante un episodio de viento y lluvias.

## 2.2 Equipos de laboratorio

### 2.2.1 Jar-test DAF

El sistema empleado fue diseñado para realizar coagulación, floculación y DAF en la misma unidad y consistía en un saturador de aire y celdas de flotación. La unidad de Jar-test DAF empleada fue suministrada por Microfloc Pty Ltd (Australia) en la que un vaso de precipitados de plástico se emplea como celda de flotación.

Se empleó un saturador con capacidad para trabajar hasta 7 bar de presión. El sistema de saturación se optimizó por parte del laboratorio para conseguir 7 bar de presión y para introducir el aire presurizado en el fondo del saturador (por debajo del nivel de agua). También se instaló una válvula de purga en la parte superior del saturador para mejorar su eficiencia.

### 2.2.2 Turbidez

Las medidas de turbidez se realizaron con un turbidímetro modelo 2100AN IS (ISO method 7027) de Hach calibrado con patrones de formazina SatblCal de Hach y verificado con el kit de patrones secundarios Gelex de Hach.

### 2.2.3 Análisis LC-OCD

Los análisis LC-OCD se realizaron con un equipo de cromatografía líquida acoplado a un detector de carbono orgánico y de nitrógeno (LC-OCD) [12]. Este método combina la cromatografía de exclusión por tamaños, detección por radiación ultravioleta (UV) a 254 nm y detección por espectroscopía de infrarrojo (IR) de las fracciones de materia orgánica oxidadas en un reactor cilíndrico de capa fina con radiación UV a 185 nm. Con este equipo se consigue la distribución de la materia orgánica en cinco fracciones diferentes denominadas:

1. biopolímeros que están compuestos por polisacáridos y proteínas (>20 kDa)
2. sustancias húmicas (~1 kDa)
3. building blocks que corresponden a los productos de degradación de los húmicos (0.3 - 0.5 kDa)
4. ácidos orgánicos de bajo peso molecular (<0.3 kDa)
5. ácidos neutros de bajo peso molecular (alcoholes, aldehídos, cetonas y aminoácidos) (<0.3 kDa)

Estas fracciones pueden clasificarse en dos grandes grupos según el impacto que la NOM produce sobre las membranas de OI en cuanto a ensuciamiento [13]:

1. Materia orgánica Biogénica (BOM), es la NOM lábil, formada por los biopolímeros, ácidos y neutros de bajo peso molecular. Son las familias responsables de la formación de biofouling en las membranas de OI.
2. Materia orgánica Refractaria (ROM), formada por las sustancias húmicas y los building blocks. Corresponde a las fracciones de difícil degradación y que además son precursoras de trihalometanos en contacto con cloro.

El parámetro carbono orgánico disuelto cromatografiable (C-DOC) corresponde a la cantidad total de NOM que contienen las muestras de agua.

## 2.3 Experimentos Jar-test DAF

Las muestras de agua de mar se transfirieron al vaso de precipitados por trasvase lento para no introducir aire en el sistema.

Todos los ensayos se realizaron a temperatura ambiente.

La presión de saturación del DAF empleada para eliminar MO en agua dulce generalmente es de 4-5 bar [3]. En estos experimentos se ha requerido llegar hasta los 7 bar debido a la elevada salinidad de la matriz

[5].

El parámetro ratio de recirculación se ajustó en los tests de flotación a escala de laboratorio controlando la diferencia de volumen en la celda de flotación durante el experimento causada por la adición del agua presurizada.

Los procesos de coagulación-floculación-flotación (DAF) se desarrollaron según los siguientes pasos:

1. Etapa de mezcla rápida, se añade  $Fe^{3+}$  y se agita a 200 rpm durante 40 s ( $G \sim 550$  y  $G \cdot t \sim 25000$ )
2. Etapa de mezcla lenta, la solución se agita a 40 rpm durante 5.5 min ( $G \sim 60$ ), seguidamente se agita a 30 rpm durante 5.5 min ( $G \sim 40$ ); en los casos establecidos, entre estas fases de agitación se añadió el agente floculante
3. Etapa de flotación, se inyecta agua saturada de aire desde el saturador a la celda de flotación hasta alcanzar ratios de recirculación del 10 y 15 %. Entonces, se permite que ocurra la flotación propiamente, también denominada clarificación, durante 15 min. Tomando muestras desde el punto de muestreo a los 5, 10 y 15 min.

### 2.3.1 Experimentos de eliminación de turbidez

La tabla muestra los experimentos preliminares llevados a cabo para la eliminación de turbidez del agua de mar y que sirven como punto de partida para determinar la importancia de cada factor a tener en cuenta en el posterior diseño de experimentos.

**Tabla 1.** Experimentos de eliminación de turbidez

<b>Experimento</b>	<b>P (bar)</b>	<b>Tª (°C)</b>	<b>Recirculación (%)</b>	<b>Concentración de coagulante (mg/L como <math>Fe^{3+}</math>)</b>	<b>Concentración de floculante (mg/L)</b>
<b>T.1</b>	4	22	10	5	0
<b>T.2</b>	5,5	22	10	0	0
<b>T.3</b>	5,5	22	10	2	0
<b>T.4</b>	5,5	22	10	5	0
<b>T.5</b>	5,5	22	10	5	1
<b>T.6</b>	5,5	35	10	5	0
<b>T.7</b>	5,5	35	10	5	1
<b>T.8</b>	7	22	15	5	0
<b>T.9</b>	7	22	15	5	1
<b>T.10</b>	7	22	15	5	5
<b>T.11</b>	7	22	15	10	0
<b>T.12</b>	7	22	15	10	1
<b>T.13</b>	7	22	10	5	0
<b>T.14</b>	7	22	10	5	1

A partir de los resultados obtenidos se desarrolló el DOE para determinar los factores importantes y sus intervalos a considerar para la eliminación de turbidez elevada y simultáneamente para evaluar la reducción de las fracciones de la NOM presente en este agua de mar.

## 2.4 Diseño de experimentos (DOE)

El estudio de los procesos de coagulación-floculación-DAF en diferentes condiciones de operación se planteó mediante un diseño de experimentos (DOE) utilizando el software STATGRAPHICS Centurion versión 16.1.07.

Con el objetivo de minimizar el número de ensayos a realizar se desarrolló un diseño de Taguchi basado en los arreglos ortogonales, que es un tipo de diseño factorial fraccionado general. Las tablas ortogonales de Taguchi están equilibradas para asegurar que todos los niveles de todos los factores se consideran por igual. La tabla ortogonal seleccionada fue L9(3<sup>4</sup>) (9 tests, 3 factores y 3 niveles). Con esta metodología, se

llevaron a cabo 9 experimentos en lugar de los 81 propios de un análisis factorial completo.

#### 2.4.1 Experimentos diseñados por Taguchi

Los resultados de eliminación de turbidez obtenidos con los experimentos preliminares (serie T) han sido los responsables del diseño de los siguientes experimentos basados en el método Taguchi.

**Tabla 2.** Experimentos diseñados mediante Taguchi

Experimento	P (bar)	Concentración de coagulante (mg/L como Fe <sup>3+</sup> )	Concentración de floculante (mg/L)
D.1	5,5	2	0
D.2	5,5	5	1
D.3	5,5	10	2
D.4	6	2	1
D.5	6	5	2
D.6	6	10	0
D.7	7	2	2
D.8	7	5	0
D.9	7	10	1

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Experimentos de eliminación de turbidez

**Tabla 3.** Resultados de los experimentos de eliminación de turbidez

Experimento	Eliminación de turbidez a los 5 min de flotación (%)	Eliminación de turbidez a los 10 min de flotación (%)	Eliminación de turbidez a los 15 min de flotación (%)
T.1	92,5	92,6	94,6
T.2	68,5	86,3	88,0
T.3	89,7	93,3	94,0
T.4	90,8	92,7	93,0
T.5	91,8	93,8	94,6
T.6	92,2	94,1	95,0
T.7	93,1	94,8	95,4
T.8	85,6	90,7	91,6
T.9	91,7	92,2	92,7
T.10	91,3	92,3	92,7
T.11	89,3	91,9	92,9
T.12	91,4	92,8	93,2
T.13	92,1	92,8	93,1
T.14	89,7	92,0	93,1

Estos experimentos preliminares demostraron la viabilidad del proceso de coagulación-floculación-DAF para la eliminación de turbidez en la planta desalinizadora de Oriente Medio durante un episodio de elevada turbidez. En estas condiciones la eliminación de turbidez fue siempre superior al 88 % a los 15 min de flotación.

Teniendo en cuenta los resultados preliminares, el ratio de recirculación y la temperatura no se consideraron factores significativos en los intervalos estudiados.

### 3.2 Experimentos diseñados por Taguchi

La tabla muestra los resultados obtenidos durante el desarrollo de los experimentos de Taguchi.

**Tabla 4.** Resultados de los experimentos diseñados mediante Taguchi

<i>Experimento</i>	<i>Eliminación de turbidez a los 15 min (%)</i>	<i>Eliminación de C-DOC (%)</i>	<i>Eliminación de BOM (%)</i>	<i>Eliminación de ROM (%)</i>
<b>D.1</b>	92,1	11,9	19,7	1,6
<b>D.2</b>	92,7	14,7	17,0	11,6
<b>D.3</b>	94,7	23,6	25,3	21,3
<b>D.4</b>	93,5	10,5	15,3	4,1
<b>D.5</b>	94,4	10,0	8,9	11,5
<b>D.6</b>	96,1	23,9	27,1	19,6
<b>D.7</b>	94,5	5,0	4,4	5,8
<b>D.8</b>	95,0	16,1	22,3	7,9
<b>D.9</b>	96,1	25,0	29,2	19,4

En estas condiciones se obtuvieron reducciones de la turbidez superiores al 92 % en todos los casos indistintamente de la dosis de coagulante, floculante y de la presión empleada. Sin embargo, utilizando las condiciones óptimas se alcanza una eliminación del 96 %. D.6 supone menor consumo de floculante y de presión que D.9.

Se reduce el C-DOC entorno a un 25 % en los tres casos que la concentración de coagulante es máxima. El experimento D.6 que es el que reduciría en mayor medida la turbidez es uno de ellos y además supondría el ahorro del floculante.

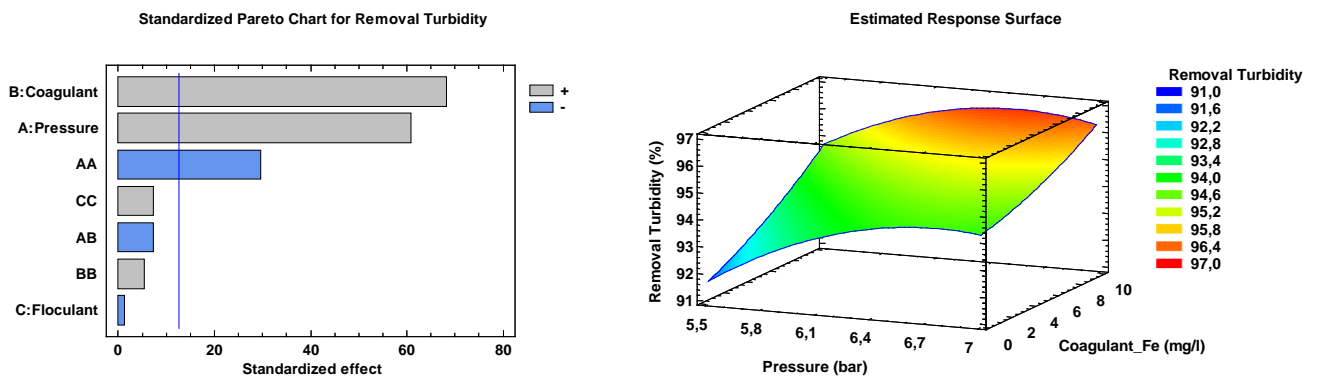
### 3.3 Análisis DOE

Los datos obtenidos se han analizado con STATGRAPHICS para facilitar su interpretación mediante:

- La detección de los factores que mayor influencia tienen en la eficiencia del proceso de coagulación-floculación-DAF mediante diagramas de Pareto.
- La representación gráfica del comportamiento de cada respuesta individual frente a sus factores significativos.
- La obtención de ecuaciones predictivas que relacionen la eliminación de turbidez y la reducción de la NOM (y de cada una de sus fracciones) con los factores. El coeficiente de determinación (correlación) indica la bondad del ajuste con el modelo en el intervalo de estudio y es una medida relativa a la asociación lineal entre los datos experimentales y los predichos por las ecuaciones.

En todos los análisis de datos A corresponde a la presión en bar, B a la concentración de coagulante como mg/L de Fe<sup>3+</sup> y C es la concentración e floculante en mg/L.

### 3.3.1 Eliminación de turbidez



Eliminación de turbidez a los 15 min (%) =  $17,7853 + 22,6529*A + 0,570724*B - 0,538579*C - 1,67562*A^2 - 0,065994*A*B + 0,00999201*B^2 + 0,256093*C^2$   
 R-squared (adjusted for d.f.) = 99,9183 %

**Figura 1.** Resultados del DOE aplicado al estudio de eliminación de turbidez a los 15 min de flotación.

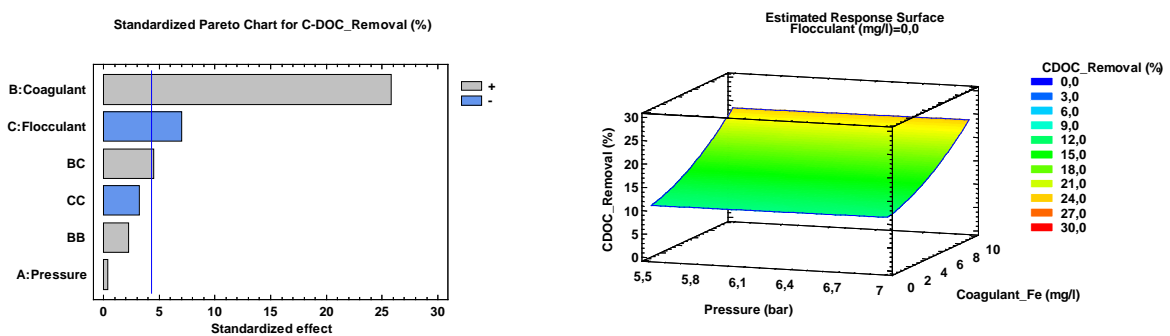
El diagrama de Pareto muestra que la concentración de coagulante y la presión son los factores significativos en este modelo. A mayor concentración de coagulante y mayor presión se consigue una mayor eliminación de la turbidez. El factor presión presenta un efecto cuadrático que también es significativo.

Las superficie de respuesta muestra gráficamente el efecto de la concentración de coagulante y la presión en ausencia de floculante evidenciando el comportamiento cuadrático de la eliminación de turbidez en función de la presión.

El modelo obtenido presenta un ajuste de los datos del  $r^2 = 99,91$  %. Así pues, la ecuación predictiva obtenida para calcular el porcentaje de eliminación de turbidez en función de la concentración de coagulante, la presión y también de la concentración de floculante (aunque con mucha menor influencia) puede considerarse válida en todo el intervalo de condiciones de operación considerado.

### 3.3.2 Reducción de NOM

#### 3.3.2.1 C-DOC



Eliminación de C-DOC (%) =  $10,0474 + 0,173896*A + 0,503945*B - 1,4989*C + 0,0770833*B^2 + 0,449805*B*C - 1,63*C^2$   
 R-squared (adjusted for d.f.) = 98,99 %

**Figura 2.** Resultados del DOE aplicado al estudio de eliminación de NOM a los 15 min de flotación.

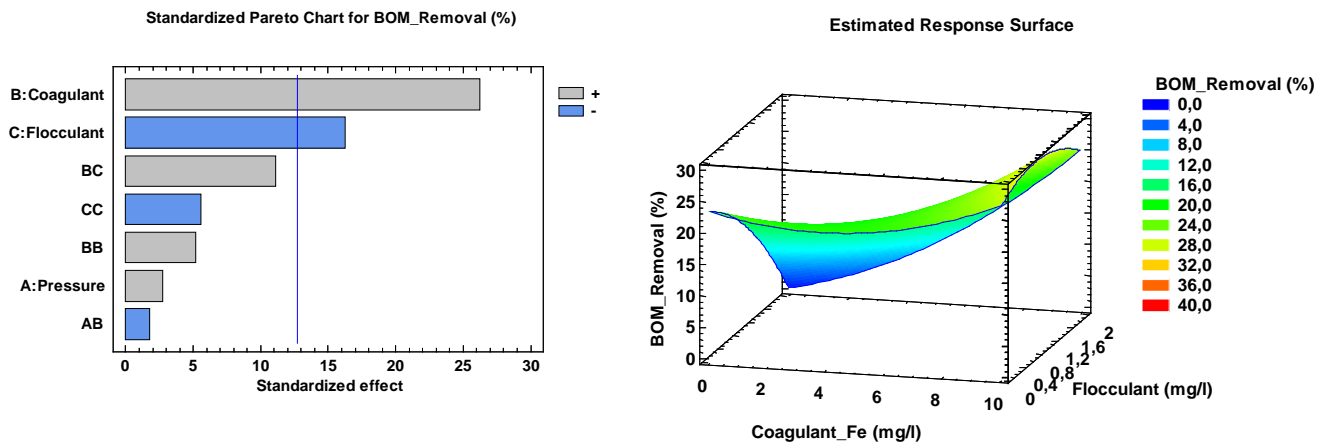
El diagrama de Pareto indica que la concentración de coagulante es el factor significativo más influyente en

la eliminación de C-DOC. Por otro lado, aunque la concentración de floculante también es un factor significativo, su empleo empeora el rendimiento del proceso de eliminación de NOM.

A partir de la superficie de respuesta en la que se representa el efecto de la presión y la concentración de coagulante en ausencia de floculante se puede observar que la presión no tiene efecto sobre este modelo.

Los datos se ajustan al modelo con  $r^2 = 98.99\%$  así que la ecuación predictiva es válida en todo el intervalo de condiciones de operación considerado.

### 3.3.2.2 BOM



$$\text{Eliminación de BOM (\%)} = 6,32306 + 2,7016 * A + 0,541749 * B - 4,92287 * C - 0,275442 * A * B + 0,156111 * B^2 + 1,04181 * B * C - 3,1927 * C^2$$

R-squared (adjusted for d.f.) = 99,4151 %

**Figura 3.** Resultados del DOE aplicado al estudio de eliminación de BOM.

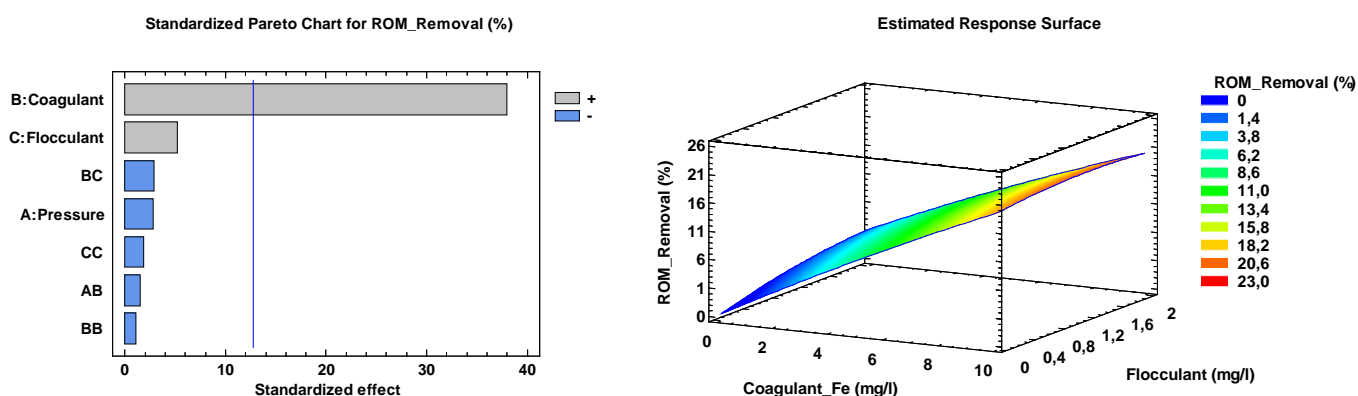
El diagrama de Pareto indica que tanto la concentración de coagulante como la de floculante son los factores más influyentes en la eliminación de la fracción BOM. El aumento en la concentración de floculante empeora el rendimiento del proceso de eliminación de BOM.

A partir de la superficie de respuesta en la que se representa el efecto de la concentración de coagulante y la de floculante se confirma como el máximo rendimiento para la eliminación de la fracción BOM presente en esta agua de mar con elevada turbidez se obtendría con una concentración moderada de floculante.

Los datos se ajustan al modelo con  $r^2 = 99.41\%$  así que la ecuación predictiva es válida en todo el intervalo de condiciones de operación considerado.



### 3.3.2.3 ROM



$$\text{Eliminación de ROM (\%)} = -5,17673 + 0,249014 * A + 3,70954 * B + 4,28795 * C - 0,184895 * A * B - 0,0266667 * B^2 - 0,216028 * B * C - 0,848087 * C^2$$

R-squared (adjusted for d.f.) = 99,5048 %

**Figura 4.** Resultados del DOE aplicado al estudio de eliminación de ROM.

La fracción ROM resulta ser independiente del factor floculante. El diagrama de Pareto en este caso indica que únicamente la concentración de coagulante es el factor significativo con influencia en la eliminación de la fracción ROM.

A partir de la superficie de respuesta en la que se representa el efecto de la concentración de coagulante y la de floculante se confirma como el máximo rendimiento para la eliminación de la fracción ROM presente en esta agua de mar con elevada turbidez se obtendría a la máxima concentración de coagulante considerada.

Los datos se ajustan al modelo con  $r^2 = 99.50\%$  así que la ecuación predictiva es válida en todo el intervalo de condiciones de operación considerado.

## 4 CONCLUSIONES

La turbidez del agua de mar estudiada (planta SWRO de Oriente Medio) se ha eliminado casi en su totalidad (96 % en condiciones óptimas) mediante el proceso de coagulación-floculación-DAF propuesto. La concentración de coagulante y la presión del saturador son los parámetros más significativos para eliminar la elevada turbidez que presentaba este agua de mar. A mayor dosis de coagulante y mayor valor de presión en el saturador, mayor eliminación de turbidez se obtiene.

Simultáneamente, este proceso de coagulación-floculación-DAF reduce el C-DOC entorno a un 25 %. Por tanto, es un proceso efectivo también para la eliminación de NOM en episodios de elevada turbidez y eficiente en cuanto a la reducción significativa de la fracción BOM (29,2 %), principal causante del ensuciamiento de la superficie de las membranas de OI.

En conclusión, el proceso de coagulación-floculación-DAF propuesto en esta investigación es viable y efectivo como pretratamiento en la planta SWRO de Oriente Medio en episodios de viento y lluvia.

## 5 REFERENCIAS

1. Prihasto, N., Q.-F. Liu, and S.-H. Kim, *Pre-treatment strategies for seawater desalination by reverse osmosis system*. Desalination, 2009. **249**(1): p. 308-316.
2. Valavala, R., et al., *Pretreatment in Reverse Osmosis Seawater Desalination: A Short Review*. Environmental Engineering Research, 2011. **16**(4): p. 205-212.
3. Bunker, D.Q., et al., *Pretreatment considerations for dissolved air flotation: Water type, coagulants*

XII Congreso Internacional de Aedyr –Toledo, España, 23-25 Octubre, 2018

REF: AedyrTOL18-17

- and flocculation*. Water Science and Technology, 1995. **31**(3): p. 63-71.
4. Edzwald, J.K., *Dissolved air flotation and me*. Water Research, 2010. **44**(7): p. 2077-2106.
  5. Haarhoff, J. and J.K. Edzwald, *Adapting dissolved air flotation for the clarification of seawater*. Desalination, 2013. **311**: p. 90-94.
  6. Guastalli, A.R., et al., *Comparison of DMF and UF pre-treatments for particulate material and dissolved organic matter removal in SWRO desalination*. Desalination, 2013. **322**: p. 144-150.
  7. Matin, A., et al., *Biofouling in reverse osmosis membranes for seawater desalination: Phenomena and prevention*. Desalination, 2011. **281**: p. 1-16.
  8. Zhang, M., et al., *Composition and Variability of Biofouling Organisms in Seawater Reverse Osmosis Desalination Plants*. Applied and Environmental Microbiology, 2011. **77**(13): p. 4390-4398.
  9. Missimer, T.M. and R.G. Maliva, *Environmental issues in seawater reverse osmosis desalination: Intakes and outfalls*. Desalination, 2018. **434**: p. 198-215.
  10. Alshahri, A.H., et al., *Organic carbon movement through two SWRO facilities from source water to pretreatment to product with relevance to membrane biofouling*. Desalination, 2017. **407**: p. 52-60.
  11. Voutchkov, N., *Considerations for selection of seawater filtration pretreatment system*. Desalination, 2010. **261**(3): p. 354-364.
  12. Huber, S.A., et al., *Characterisation of aquatic humic and non-humic matter with size-exclusion chromatography – organic carbon detection – organic nitrogen detection (LC-OCD-OND)*. Water Research, 2011. **45**(2): p. 879-885.
  13. Jeong, S., et al., *4.3 Membrane Biofouling: Biofouling Assessment and Reduction Strategies in Seawater Reverse Osmosis Desalination*, in *Comprehensive Membrane Science and Engineering (Second Edition)*, E. Drioli, L. Giorno, and E. Fontananova, Editors. 2017, Elsevier: Oxford. p. 48-71.