



# Prueba piloto de una tecnología de eliminación de trihalometanos en un depósito de agua potable

**Ramon Ariño Tarragó** ingeniero industrial, responsable Soporte Explotación de Aigües de Barcelona, Empresa Metropolitana de Gestió del Cicle Integral de l'Aigua

**Meritxell Minoves Ruiz** ingeniera química, técnica Soporte Explotación de Aigües de Barcelona, Empresa Metropolitana de Gestió del Cicle Integral de l'Aigua

**Miquel Paraira Faus** licenciado en Farmacia, director de Calidad del Agua de Aigües de Barcelona, Empresa Metropolitana de Gestió del Cicle Integral de l'Aigua

En el presente artículo se presentan los resultados obtenidos en unas pruebas piloto de validación de una nueva tecnología de eliminación de trihalometanos (THM) en depósitos de agua de consumo, concretamente la tecnología TRS (*Trihalomethane Removal System*). El sistema ha sido instalado en un depósito real de la red de distribución del municipio de Castelldefels (área metropolitana de Barcelona), que dispone de 2 módulos idénticos, por lo que ha permitido comparar los resultados obtenidos en un módulo con el sistema instalado y el módulo 'blanco', sin tratamiento alguno. Se ha estudiado la eficiencia de esta solución con las diferentes configuraciones posibles.

#### Palabras clave

Trihalometanos (THM), potencial de formación, sistema TRS, agitador, depósitos, redes de distribución.

#### *Pilot test of a technology for the removal of trihalomethanes in a drinking water tank*

*This article presents the results of the pilot tests designed to validate a new technology for the removal of trihalomethanes in drinking water tanks, the TRS (Trihalomethane Removal System) technology. The system was installed in a real drinking water tank, located in Castelldefels (Barcelona's Metropolitan Area): this tank has two identical modules, so it has allowed comparing the results obtained in a module with the system installed with the results of the 'blank' module, without any treatment. The efficiency of this solution with the different possible configurations has been studied.*

#### Keywords

*Trihalomethanes (THM), formation potential, TRS system, mixer, water tanks, distribution networks.*



## 1. Introducción

La Directiva Europea 98/83/CE y el Real Decreto 140/2003 sobre criterios sanitarios de las aguas de consumo establecen el valor paramétrico (nivel máximo admisible) de trihalometanos (THM) en las redes de abastecimiento de agua en 100 µg/l.

Con frecuencia, la minimización de THM en las redes de distribución se ha centrado en la eliminación de sus precursores en origen, es decir, en las plantas de tratamiento, mediante procesos de alta tecnología y con un elevado coste de explotación. Pero existen puntos de la red en los que, debido a diversas condiciones (elevado tiempo de residencia, recoloraciones sucesivas, elevado contenido en materia orgánica, presencia de bromuros, alta temperatura, etc.), se obtienen elevadas concentraciones de THM. Intentar reducir los THM en estos puntos minimizando el potencial de formación a la salida de las plantas de tratamiento representa un sobrecoste excesivo que hace interesante considerar tecnologías complementarias y económicamente competitivas y aplicarlas localmente en aquellos puntos problemáticos.

En este contexto se enmarca el presente estudio y prueba piloto, que ha consistido en la instalación y verificación del funcionamiento del

sistema de eliminación de trihalometanos TRS (*Trihalomethane Removal System*) en depósitos, comercializado por la empresa Aqualogy. Dicho sistema incluye opcionalmente un sistema de agitación, el cual también se ha testeado de manera aislada y conjunta con el resto de elementos del sistema TRS.

La prueba piloto se ha realizado íntegramente en el depósito de almacenamiento de agua potable Castelldefels 115, en el municipio de Castelldefels (Barcelona). Se estipuló que el objetivo de eliminación de THM a la salida del depósito fuera del 50% y a tal efecto se dimensionó la instalación y los equipos.

## 2. Descripción de la instalación TRS

La tecnología TRS fundamenta su funcionamiento en la elevada volatilidad de los THM y, por consiguiente, en el uso de sistemas de aireación y *spraying* que favorezcan la transferencia de estos compuestos de la fase líquida a la fase gas. Los elementos que habitualmente componen la instalación TRS, y que se utilizaron en esta prueba piloto, son:

- Rociadores de 1/2" diámetro (NPT), distribuidos de manera uniforme por el techo del depósito,

a través de los cuales se pulveriza (*spraying*) el agua recirculada del mismo depósito. El proceso de aireación permite que los THM, dada su volatilidad, pasen a la fase gas. El número de rociadores y la distribución espacial de los mismos variarán en función de la geometría y volumen del depósito, de tal forma que se deberá adaptar su diseño según cada casuística (**Figura 1**).

- Una bomba de recirculación que aspira agua de la salida del depósito y la recircula hasta el interior del depósito, asperjándola a través de los rociadores (**Figura 2**).

- Un ventilador que fuerza la circulación del aire, inyectándolo hacia el interior del depósito y forzando su salida a través de las rejillas de ventilación del mismo. De esta forma, se fuerza la salida definitiva de los trihalometanos del interior del depósito (**Figura 3**).

- Opcionalmente, un agitador (*mixer*) instalado en el interior del depósito que favorece la homogeneidad dentro del mismo gracias al empuje del agua tanto de forma axial como de forma radial, evitando de este modo posibles gradientes de concentración de cloro o de temperatura dentro del depósito y facilitando la evaporación de los THM (**Figura 4**).

**Figura 1.** Rociador.



**Figura 2.** Bomba de recirculación.





### 3. Diseño y planificación de la prueba piloto

#### 3.1. Ubicación escogida para realizar la prueba

El depósito seleccionado para realizar la prueba ha sido el de Castelldefels 115, con un volumen de 4.000 m<sup>3</sup>, repartidos en dos módulos idénticos de 2.000 m<sup>3</sup>. El hecho de disponer de dos módulos se ha considerado un factor determinante en la selección de esta ubicación, dado que permite obtener resultados totalmente contrastables de evolución de THM para una misma agua de partida y para un mismo ciclo de funcionamiento, con y sin el sistema TRS. La instalación del TRS se realizó en el módulo A, mientras que el módulo B fue el 'blanco'. El ciclo diario de evolución del agua en el depósito supone una renovación diaria aproximada de 1.500 m<sup>3</sup>/día (750 m<sup>3</sup>/día por módulo).

#### 3.2. Diseño y dimensionado de la instalación y de los equipos

Se estipuló que el objetivo de eliminación de THM a la salida del depósito fuera del 50%. En fun-

ción de este parámetro, de las dimensiones del depósito y de su régimen de explotación, Aqualogy definió las características de los diversos elementos del sistema y su diseño.

Resumidamente, la instalación consistió en 12 rociadores convenientemente ubicados (**Figura 5**) y una bomba de recirculación de 15 l/s. Para tener un mejor control de la prueba, se instaló también una caudalímetro electromagnético en el circuito de recirculación y un variador de frecuencia para la bomba de recirculación.

Finalmente, dado que en la ubicación seleccionada para realizar la prueba no se disponía de potencia suficiente para el funcionamiento de todos los equipos dispuestos para la misma, fue necesario instalar un grupo electrógeno.

#### 3.3. Equipos de control en continuo de la prueba

Con la finalidad de realizar un seguimiento detallado de la evolución, tanto de los THM como de otros parámetros de calidad, se instalaron los siguientes equipos de análisis en continuo:

- Analizador de THM de la marca Aqua Metrology Systems (AMS), modelo THM-100.
- Analizador de cloro, pH, conductividad y temperatura de la empresa Apliclor, modelo APMIX-4.

#### 3.4. Aspectos a evaluar. Planificación

El planteamiento experimental para el testeo de la instalación ha evaluado el funcionamiento de los equipos, funcionando tanto de manera conjunta (TRS+agitador) como de manera independiente. También se ha evaluado la respuesta de esta tecnología para concentraciones de partida notablemente elevadas. Para ello, se ha dividido el estudio en 4 fases de ensayos:

- Sistema TRS, con el sistema de agitación (*mixer*).
- Sistema TRS, sin el sistema de agitación (*mixer*).
- Elemento agitador (*mixer*) con aireación, sin *spraying* (elementos rociadores).
- Sistema TRS, más el sistema de agitación (*mixer*), para una elevada concentración de THM.





En las tres primeras fases se ha operado con los dos módulos conectados a la red, es decir, con los ciclos de llenado y vaciado habituales para este depósito, contrastándose en cada caso los resultados de evolución de los módulos A y B del depósito, siendo el módulo A aquel en el que se ha instalado el sistema TRS, y el módulo B el 'blanco' (sin ningún tratamiento). Por el contrario, en la fase 4 se ha operado con el módulo A aislado de la red, debido a que se ha forzado un incremento del nivel de THM por encima del valor paramétrico legislado, para evaluar la eficacia del sistema a elevadas concentraciones de THM.

En cada una de las fases se ha monitorizado la evolución, no solo del nivel de THM, sino también de los niveles de cloro, pH, conductividad, alcalinidad e índice de Langelier. El seguimiento de estos parámetros se ha realizado tanto con equipos de análisis en continuo como mediante la toma diaria de muestras de la entrada y salida de cada uno de los módulos, así como de la mezcla de ambos a la salida, y el posterior análisis en el laboratorio. Los resultados de las diferentes muestras analizadas en el laboratorio corroboran la bondad de los análisis *on line*.

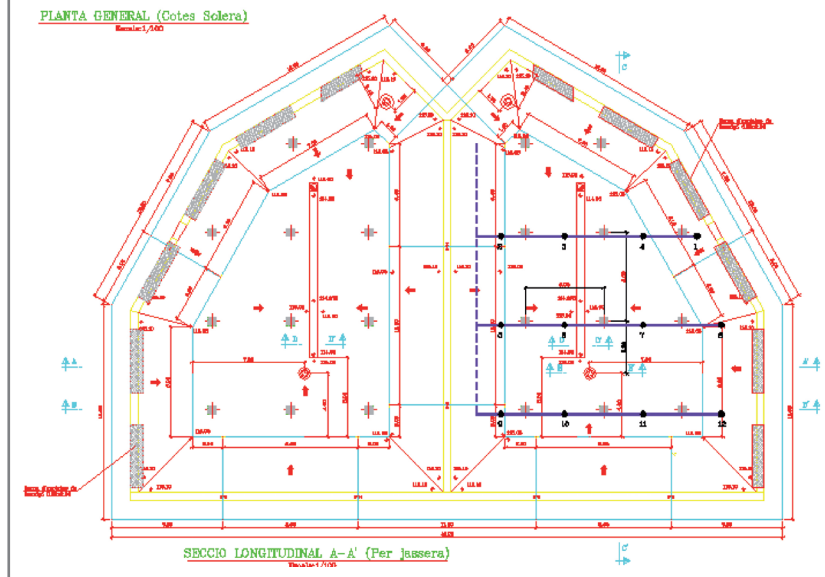
#### 4. Resultados de las diferentes fases

##### 4.1. Fase 1: sistema TRS con sistema de agitación

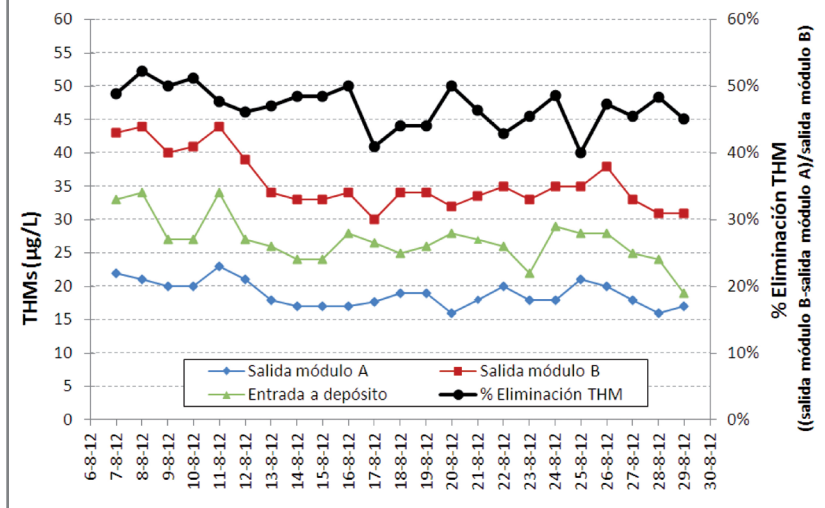
En la **Figura 6** se presentan los resultados de concentración de THM de las muestras de laboratorio tanto para el agua de entrada al depósito como para la salida de los dos módulos del mismo.

A lo largo de esta primera fase, el valor medio de THM a la entrada del depósito fue de 27 µg/l. Con esta agua de entrada, la concentra-

**Figura 5.** Distribución de los rociadores en el módulo A del depósito de Castelldefels. (Línea discontinua: 3"; línea continua: 2").



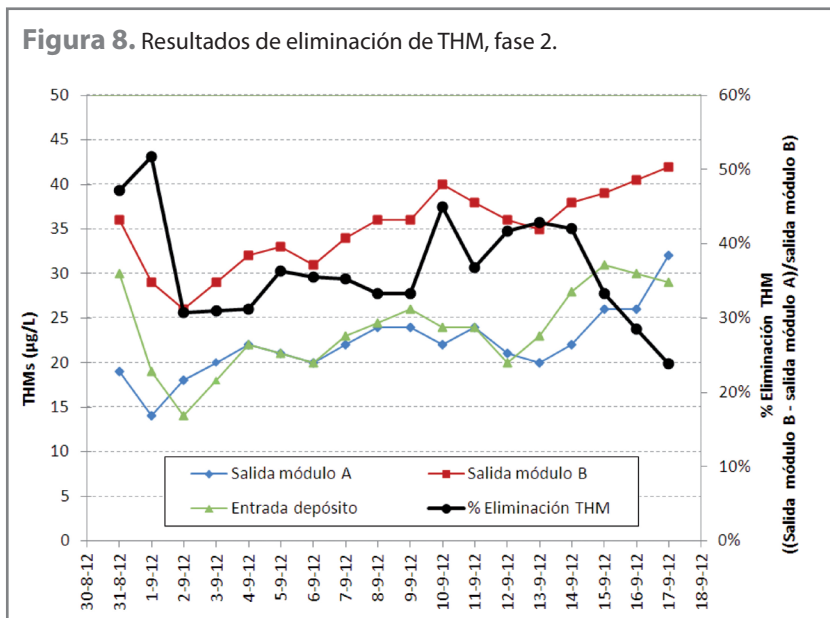
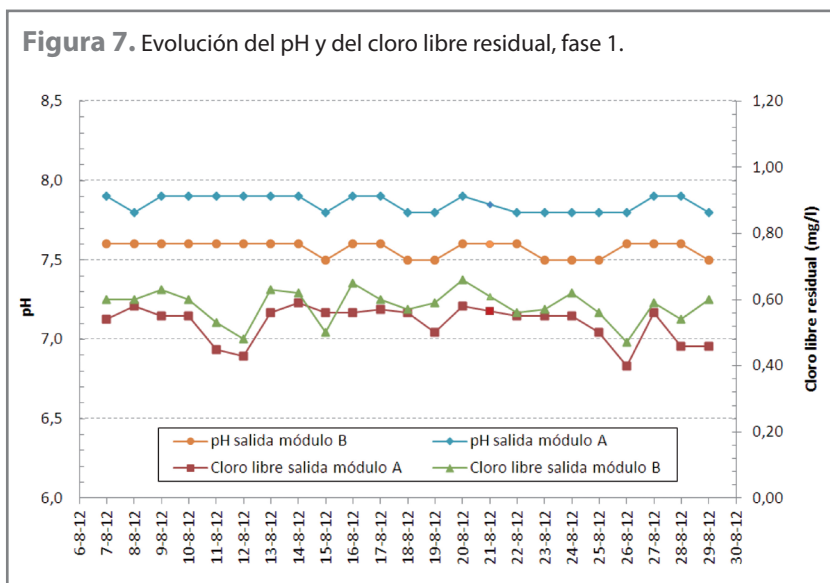
**Figura 6.** Resultados de eliminación de THM, fase 1.



ción media de THM a la salida fue, en promedio, de 19 µg/l en el módulo A (en el cual está montada la instalación del TRS y el agitador) y de 36 µg/l en el módulo B (funcionando según régimen habitual); el aumento de THM entre la entrada y la salida del depósito (módulo B sin tratamiento) es debido al tiempo de retención del agua en el depósito, factor de gran influencia en la formación de estos compuestos. Con ello, se puede concluir que el

porcentaje de THM a la salida del módulo A es un 47% inferior a la del módulo B, aproximándose dicho resultado al objetivo de eliminación fijado de antemano para el sistema (50%).

Para el agua que llega a este depósito (origen río Llobregat), la especie mayoritaria es el bromoformo, con un porcentaje del 70% respecto al total de THM del agua de entrada. El porcentaje de diferencia de bromoformo a la salida de ambos



módulos es del 44%, observándose por tanto mucha similitud con el porcentaje de eliminación correspondiente al total de THM. No obstante, el hecho de que dicho porcentaje sea ligeramente inferior (44% versus 47%), implica un ligero incremento del bromoformo respecto del total de THM a la salida (75% versus al 70% de la entrada). Este ligero incremento de porcentaje de bromoformo respecto del total de THM se explica por la mayor volatilidad del cloroformo respecto al bromoformo.

El sistema TRS favorece que gases ácidos como el CO<sub>2</sub> pasen a la fase gaseosa, con el consiguiente incremento de pH. Dicho aumento debe seguirse en este tipo de instalaciones, dado que puede suponer el desplazamiento del equilibrio bicarbonato/carbonato hacia la formación de este último. Si con ello se sobrepasa el valor del producto de solubilidad del carbonato cálcico, se puede producir la precipitación de este último.

La **Figura 7** muestra la evolución del pH y del cloro libre residual a lo largo de la primera fase. Se obser-

va que en el módulo A el pH es, de promedio, 0,3 unidades más elevado que en el módulo B, corroborándose el impacto del sistema TRS en el incremento del pH y el consiguiente posible riesgo de precipitación de carbonato cálcico. Asimismo, el paro fortuito del grupo electrógeno implicó que los pH a la salida de ambos módulos fueran muy semejantes. Se observa también una ligera reducción del valor de cloro residual libre.

#### 4.2. Fase 2: sistema TRS sin sistema de agitación

Con la finalidad de evaluar la contribución del agitador en el rendimiento global del sistema, se realizó una segunda fase de pruebas con el sistema TRS en marcha y con el agitador parado. Los resultados correspondientes por lo que a eliminación de THM se refiere se muestran en la **Figura 8**.

En esta segunda fase, el valor medio de THM a la entrada del depósito fue de 25 µg/l. Con esta agua de entrada, la concentración media de THM a la salida fue, en promedio, de 22 µg/l en el módulo A y de 35 µg/l en el módulo B. Con ello, se puede concluir que el porcentaje de THM a la salida del módulo A es un 37% inferior a la del módulo B. Dicho resultado, comparado con el 47% de la fase 1, corrobora el papel complementario del agitador en el funcionamiento global del sistema TRS de eliminación de THM.

En este caso, el valor de pH en el módulo A fue en promedio 0,2 unidades más elevado que en el módulo B. La reducción del valor de cloro residual libre fue insignificante.

#### 4.3. Fase 3: agitador y sistema de aireación (sin spraying)

En esta tercera fase se trabajó únicamente con el agitador y el sistema de aireación en marcha, con la bom-



ba de recirculación y los rociadores parados, para ver si el efecto de agitación, combinada con la renovación forzada del aire del interior del depósito, tenía algún efecto significativo en relación con la eliminación de THM.

A lo largo de esta tercera fase de pruebas, el nivel promedio de THM del agua de entrada al depósito fue de 27 µg/l.

Si bien en las fases 1 y 2 el valor de THM a la salida del módulo A era inferior a los THM a la entrada, en esta fase los THM a la salida del módulo A fueron superiores a los de la entrada, alcanzándose un porcentaje de diferencia entre la salida de ambos módulos del 23% (Figura 9).

No se probó el grado de eliminación de THM utilizando únicamente el ventilador, pero dado que en este depósito el agua entra a través de una tubería vertical y siempre por encima de la lámina libre, y por tanto, hay una buena aireación del agua, se supone que el hecho de tener una renovación forzada importante del aire del depósito ya hubiese eliminado una parte importante de los THM.

Respecto a la evolución del pH y del cloro libre residual, para esta configuración no se observó ninguna variación significativa de los valores.

#### 4.4. Fase 4: sistema TRS con agitación para concentraciones elevadas de THM

Para concluir esta batería de pruebas, se quiso testear el funcionamiento del sistema TRS con el agitador para concentraciones de THM de partida elevadas, claramente superiores al límite legal vigente. Para ello, se aisló el módulo A de la red de distribución y se forzó la elevación de la concentración de THM, mediante la adición controlada de cloroformo y bromo-

Figura 9. Resultados de eliminación de THM, fase 3.

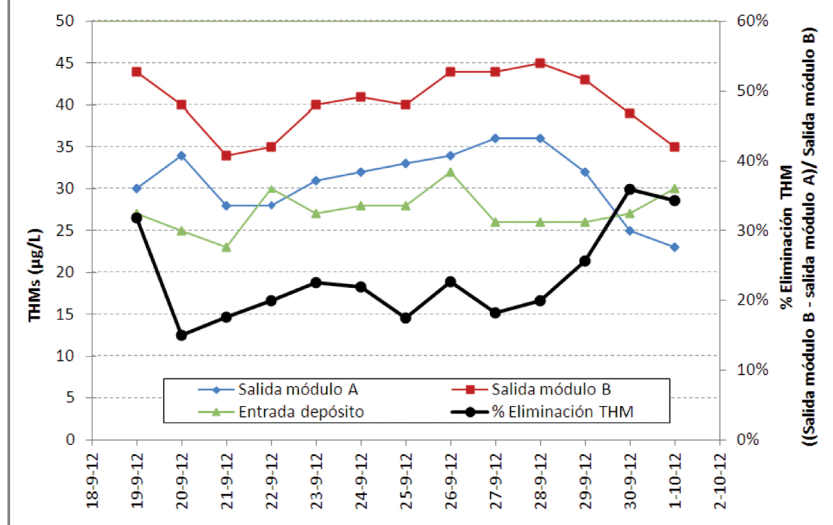
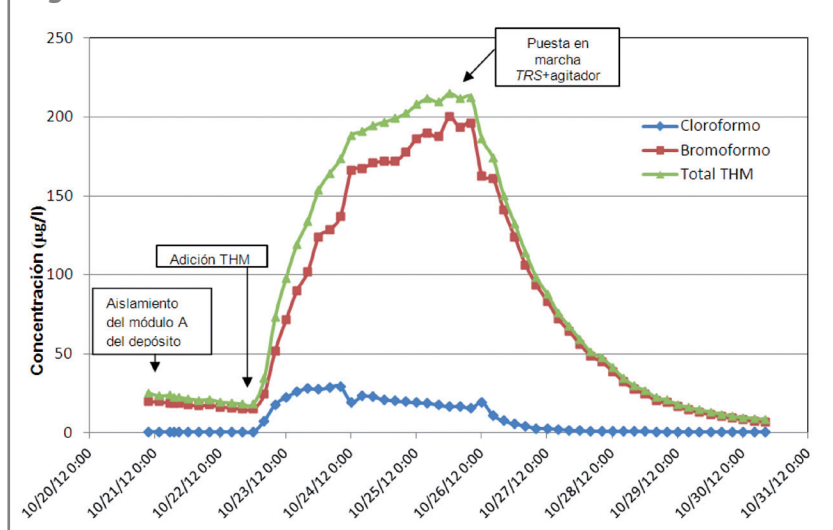


Figura 10. Resultados de eliminación de THM, fase 4.

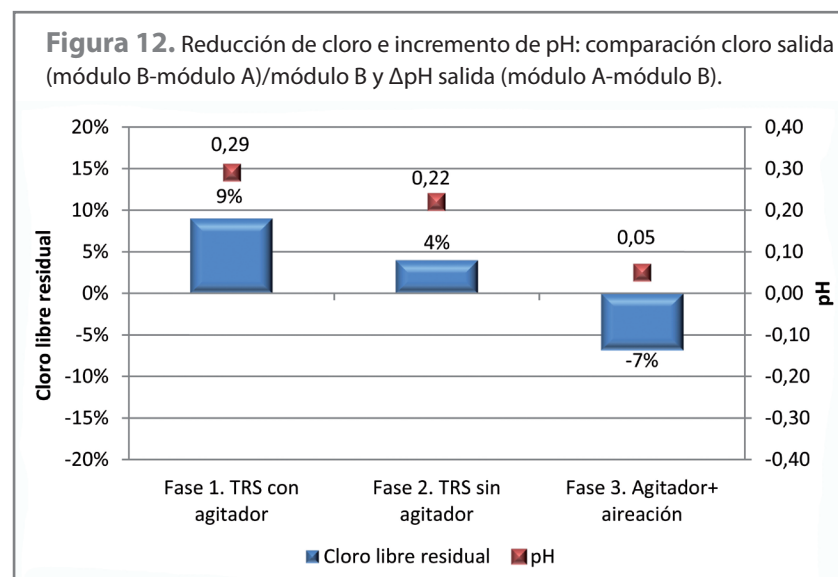
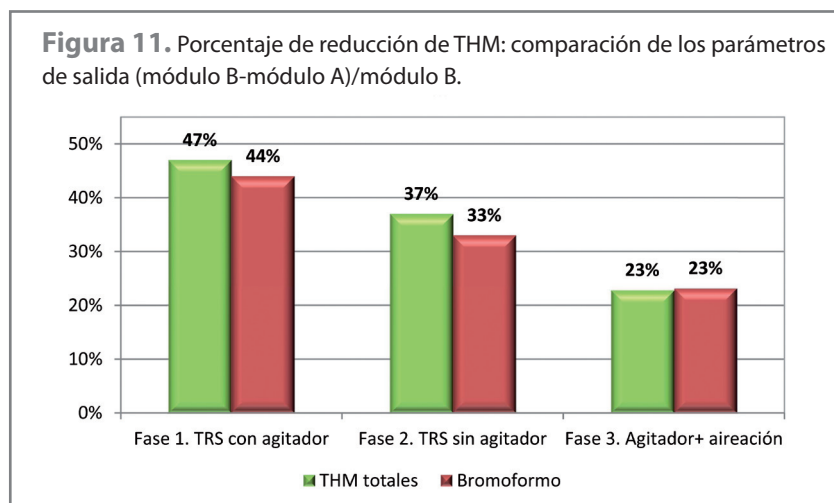


formo en una proporción análoga a la que habitualmente presenta el agua que recibe este depósito.

Una vez alcanzado un máximo estable por lo que a concentración de THM se refiere, se siguió con el módulo aislado de la red y trabajando en circuito cerrado, y se puso en marcha el sistema TRS con el agitador. A partir de ese momento, el nivel de trihalometanos siguió un descenso gradual según una cinética típica de primer orden, de tal forma que entre una muestra y la siguiente (distanciadas 4 horas entre sí, según parametrización del equipo de con-

trol en continuo THM-100), se observó una reducción media del 12 % en el nivel de THM.

De este modo, partiendo de una concentración total de THM de 200 µg/l, en unas 20 horas se consiguió disminuir la concentración inicial de THM a la mitad; este periodo de tiempo se corresponde con el tiempo necesario para recircular todo el volumen del depósito, estando este aislado (1.000 m<sup>3</sup> iniciales; bomba de recirculación con caudal nominal de 15 l/s). Los resultados correspondientes se muestran en la Figura 10.



## 5. Comparativa de las diferentes fases

En este apartado se comparan, para una misma agua de partida impulsada al depósito, y para condiciones análogas de ciclos de funcionamiento de uno y otro módulo, los resultados a la salida de ambos para las diferentes fases del estudio.

Se observa, una vez más, la sinergia lograda trabajando con el sistema TRS (fase 1) con el sistema de agitación, y como dicha efectividad disminuye notablemente si se opera con el sistema TRS sin agitador (*mixer*) y más drásticamente si se trabaja únicamente con el agitador (*mixer*) y la aireación (Figura 11).

En contrapartida, cuanto mayor es la eliminación de compuestos volátiles, más se incrementa el pH, debido a la eliminación también del  $\text{CO}_2$  disuelto en el agua. Este incremento de pH debe ser controlado con el fin de evitar sobrepasar el producto de solubilidad del carbonato cálcico y que este precipite (Figura 12).

## 6. Conclusiones

La tecnología ensayada se muestra efectiva para la reducción de los valores de THM en depósitos de redes de distribución: en las condiciones de trabajo en las que ha sido testeado el sistema TRS, más el sistema de agitación, obteniéndose reducciones

aproximadas del 47% a la salida del depósito (comparación del módulo con el TRS respecto al módulo sin dicho sistema). Este valor es muy cercano al 50% que se había fijado como objetivo y para el cual se había diseñado la instalación.

El hecho de no disponer del elemento agitador (*mixer*) reduce el porcentaje de eliminación hasta el 37%, mientras que trabajando únicamente con el agitador y el ventilador este porcentaje pasa a ser del 23%, opción a tener muy en cuenta en función del valor de THM requerido a la salida del depósito.

Por ello, según los resultados de las tres primeras fases del ensayo se puede concluir que, en función de las características de cada instalación y del nivel de THM a la salida del depósito que se desee alcanzar, hay varias opciones a considerar. Se trata pues de una tecnología modular o gradual, que puede ir desde soluciones más sencillas basadas en algún sistema de difusión de agua (incluso mediante rejillas en la entrada del depósito) y aireación forzada, pasando por un sistema de agitación del agua y ventilación forzada y, como tecnología más compleja y con mejor rendimiento de eliminación de THM, el sistema TRS con agitador (*mixer*).

Asimismo, se ha podido verificar que la respuesta de esta tecnología es efectiva para un amplio rango de concentraciones de THM de partida. El sistema ha permitido reducir una concentración inicial de 200  $\mu\text{g/l}$  a la mitad en 20 h, con el depósito aislado.

El mayor inconveniente de esta tecnología radica en el incremento de pH inherente al funcionamiento del sistema TRS que, según la tipología del agua a tratar, puede conllevar precipitaciones de carbonato cálcico dentro del depósito y que, por tanto, es un factor a controlar de cerca.



No obstante, tras realizar las distintas fases de testeo de la tecnología descrita en el presente estudio, no se ha observado precipitación alguna.

La potencia eléctrica consumida por este sistema puede ser considerable, por lo que podría ser necesario ampliar la potencia contratada o solicitar una nueva acometida en aquellos depósitos en los que no la hubiera. En depósitos aislados, alejados de zonas urbanizadas, esto podría representar un problema y un elevado coste de instalación.

Los costes de explotación se reducen al consumo eléctrico de la instalación, que pudieran ser importantes dependiendo de la potencia necesaria. Los costes de mantenimiento no se prevén elevados (mantenimiento

del grupo de recirculación, cambio de los rociadores, cuadros de BT, mantenimiento del agitador) y los trabajos de mantenimiento son los habituales en una instalación electromecánica, pudiendo ser realizados por personal propio.

Los costes de la instalación y de funcionamiento del sistema deben ser contrastados con el incremento de coste que supone una mayor eliminación de precursores de THM en origen (plantas de tratamiento), puesto que esta comparación puede indicar un ahorro global importante en el abastecimiento utilizando este sistema 'satélite'. Evidentemente, dicha comparativa dependerá de cada explotación (número de depósitos candidatos, tiempo de residencia del

agua, recloraciones en la red, etc.) y de la calidad del agua a tratar.

## 7. Agradecimientos

Nuestro agradecimiento a Aqualogy por el diseño del sistema y la cesión de los elementos que lo componen y al equipo del Laboratorio de Aigües de Barcelona involucrado en el estudio, especialmente a Verónica García, Jordi Martín y el equipo del Departamento de Química Orgánica. También queremos dar las gracias a todo el personal de la empresa que ha participado en el montaje y mantenimiento del sistema, en especial a los responsables de operaciones especializadas (obra civil y recintos, operaciones eléctricas y electrónicas, operaciones mecánicas y soldadura).

# TECNOAQUA

## Normas de publicación para autores

Estimado Colaborador:

Para facilitar la publicación de los artículos técnicos (o procesos y sistemas) en nuestra revista TECNOAQUA se han elaborado unas breves normas de forma y contenidos para sus autores.

### RECOMENDACIONES A LOS AUTORES DE ARTÍCULOS

1. Los artículos deben ser inéditos, nuestra política editorial requiere exclusividad para publicarlos. No obstante, si tuviera interés en publicarlos en otro medio a posteriori, dicho medio deberá pedirnos autorización.
2. Deberán figurar el nombre y dos apellidos del autor o autores, su titulación y/o cargo en la entidad a la que pertenezcan, dirección completa, teléfono de contacto, fax, e-mail y web.
3. El título no debe sobrepasar las 20 palabras, con su traducción al inglés. (La traducción no es necesaria en caso de procesos y sistemas).
4. Se debe incluir un breve resumen del artículo de unas 100 palabras, junto a 5-8 palabras clave, y la traducción de todo ello al inglés (Todo este punto debe obviarse en el caso de procesos y sistemas).
5. El texto seguirá una línea de explicación coherente y progresiva, contando de partes con títulos y subtítulos numerados, que habitualmente empiezan con una introducción al tema (número 1), para pasar a su estudio de planteamientos, resultados, discusión.....- número 2, 3, 4, 4.1, 4.2...), terminando con las conclusiones y, si los hubiera, los agradecimientos (punto final). Por último, se añade la bibliografía (numerada dentro de corchetes [1], [2]...).
6. El artículo se redactará evitando el lenguaje académico o excesivamente denso, sin por ello dejar de mantener un rigor conceptual, explicando cuando convenga aquellos términos o conceptos de uso poco habitual.
7. Preferentemente se utilizarán frases y párrafos cortos. Debe evitarse la inclusión de notas a pie de página, incorporándolas dentro del texto.

8. Se cuidará la correcta expresión de las unidades, símbolos y abreviaciones.
9. El texto tendrá una extensión de unas 5-8 hojas, formato DIN A4 a espacio simple. Tipo de letra preferente: Times New Roman, 12.
10. Se incluirán gráficos, esquemas o fotografías en color para facilitar la comprensión del texto, todos ellos bajo el epígrafe de Figura, indicándose su ubicación en el texto escrito. Cada figura llevará su número y pie explicativo. Todas las figuras deben tener la suficiente calidad gráfica para su reproducción (300 píxeles por pulgada) y deben enviarse por separado. (Es aconsejable añadirlas en el texto escrito en baja calidad para, al menos, conocer su ubicación).
11. Las fotografías y dibujos deben tener un mínimo de 300 píxeles de resolución, tamaño 13x8 cm (mínimo), y en formato jpg, tiff o bmp, preferentemente.
12. El artículo se dirigirá al coordinador editorial de la revista TECNOAQUA, vía e-mail a: [rubenjinagre@gmail.com](mailto:rubenjinagre@gmail.com).
13. Una vez recibido el artículo, la dirección de la revista estudiará su contenido. En caso de aceptación se indicará la fecha aproximada de publicación, que depende del tema del artículo y su relación con el contenido de cada número de la revista, así como del orden de artículos recibidos con anterioridad.
14. Una vez publicado el artículo, la revista envía un ejemplar de cortesía a cada autor firmante. A solicitud del interesado se puede enviar una carta o fax donde se especifique la aceptación del mismo antes de su publicación.