



## Implicaciones del Decreto 70/2009 de la Junta de Andalucía: Práctica de la cloraminación como desinfección final del agua de Córdoba\*

### RESUMEN

**E**l Decreto 70/2009 de 31-3-2.009 de la Junta de Andalucía establece la obligatoriedad de mantener valores de cloro residual libre no inferiores a 0,2 mg/L en el agua de consumo andaluza. Dado que el incremento del nivel de cloro en un agua supone el paralelo en su contenido en THMs (limitados desde el 1-1-2.009 a 100  $\mu$ /L) varios abastecimientos andaluces encuentran dificultades para conjugar estas dos cuestiones. En este sentido, una de las alternativas válidas para cumplir con el doble compromiso exigible pasa por la sustitución total o parcial del cloro habitualmente empleado en las ETAP por otros reactivos con poder desinfectante contrastado pero que generen menos THMs.

Este trabajo presenta la práctica seguida por EMACSA en la ETAP de Villa Azul consistente en sustituir la desinfección habitual con Cl<sub>2</sub> por el empleo de cloraminas. Se recogen los resultados obtenidos entre octubre de 2.008 y mayo de 2.010, período durante el que se ha logrado respetar habitualmente el requerimiento en THMs: así, el valor medio en salida de ETAP ha sido de 57  $\mu$ /L, y de 73  $\mu$ /L en

Rafael Marín Galvín,  
Control de Calidad,  
Calidad y Medio Ambiente,  
Empresa Municipal de  
Aguas de Córdoba.

los puntos más alejados de la red (hasta 25 km). Además, los valores de Cl<sub>2</sub> combinado han estado por encima de 0,25-0,35 mg/L en los puntos finales de la red, con un valor medio de 0,6-0,8 mg/L. Esto ha posibilitado poder suprimir (salvo como elementos de emergencia) las ocho re-cloraciones existentes en la red necesarias mientras se operaba con Cl<sub>2</sub>, además de reducir el número de tomas de muestras y analíticas de cloro residual

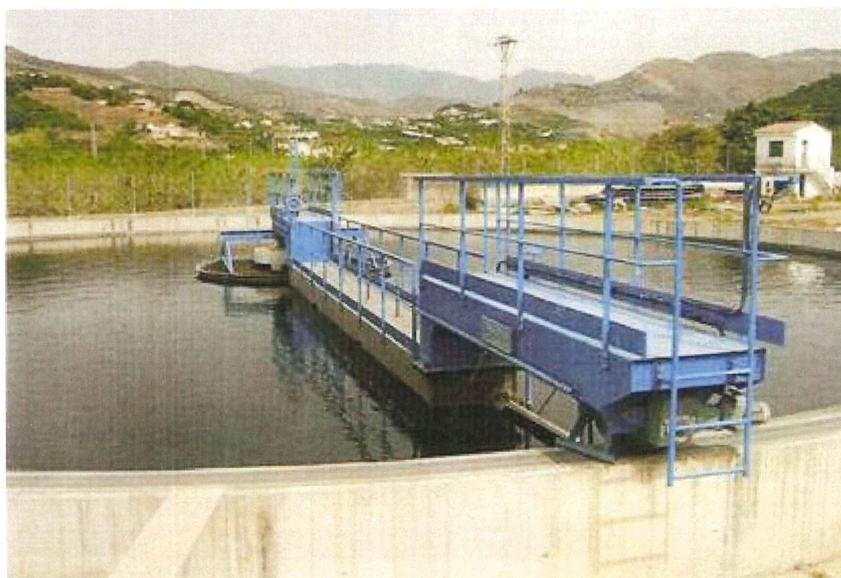
en la red exigidas por la Autoridad Sanitaria (un 12% menos que cuando se aplicaba cloración). Asimismo, no se han detectado problemas de nitritos ni incidencias microbiológicas al emplear las cloraminas. Por último, el coste de la implantación de la planta de cloraminación en la ETAP ha sido de 626.000 €, y el sobrecoste de la dosificación de cloraminas se ha cifrado en 0,256 €/1.000 m<sup>3</sup> (19% más que el derivado de la desinfección con cloro).

**PALABRAS CLAVE:** THMs, cloraminas, materia orgánica, ETAP, cloro residual, nitritos, amonio.

### 1.- GENERALIDADES

#### FORMACIÓN DE TRIHALOMETANOS

La formación de THMs en un

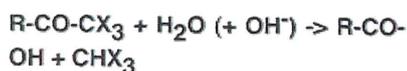
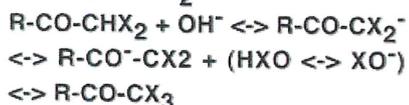
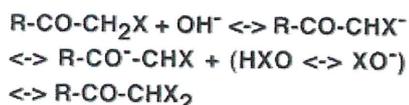
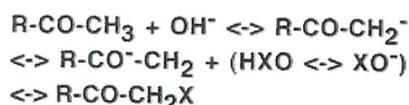


(\*) Los primeros datos de este trabajo se presentaron como ponencia a las XXX Jornadas Técnicas de la Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento (Sevilla, junio-2.010).



agua viene regida por las reacciones químicas experimentadas entre el cloro adicionado y diferentes compuestos orgánicos polifenólicos (denominados precursores de THMs) presentes en la misma, compuestos entre los que cabe citar a las sustancias húmicas, restos procedentes de la degradación de organismos diversos e incluso de algas.

Las complejas reacciones químicas entre el cloro y los precursores de THMs (moléculas con abundancia de anillos aromáticos) discurren a través de la rotura secuenciada de los anillos aromáticos existentes, llegando al final a la generación de compuestos monocarbonados y dicarbonados simples con sustituyentes halogenados (en especial, Cl, Br y I). El mecanismo de reacción responde al siguiente esquema:



siendo "X", un halógeno y "R" el resto aromático del precursor.

Los factores más importantes en la generación de THMs son:

- Cantidad y tipo de moléculas orgánicas presentes en el agua.
- Halógenos presentes en el agua potencialmente oxidables por el cloro. A medida que el agua contenga más bromo y yodo, mayor tasa de formación de THMs.
- Dosis de cloro aplicada: más

cantidad de cloro implicará una más alta tasa de generación de THMs.

- Temperatura del agua: su aumento potencia la formación de THMs.

- pH: valores alcalinos potencian la formación de cloroformo, especialmente.

- Presencia de catalizadores: sobre todo Fe y Mn, muy abundantes en general en la mayoría de las aguas brutas empleadas para potabilización.

- Tiempo de contacto entre el cloro y el agua: la mayor tasa de formación se da durante las 25 primeras horas de contacto.

Los THMs más frecuentemente encontrados en aguas cloradas son  $Cl_3C$ ,  $Cl_2BrC$ ,  $ClBr_2C$  y  $Br_3C$  siguiendo su proporción relativa el orden de cita anterior. Dada la potencial incidencia toxicológica de estos compuestos, el RD 140/2003 limita su contenido en aguas de consumo a  $100 \mu/L$  (reduciendo los  $150 \mu/L$  aplicables hasta el 31-12-2.008).

Para evaluar la potencial generación de THMs ligada a la cloración de un agua se llevan a cabo ensayos de

tratamiento, valorando dosis de cloro empleadas y tiempo de contacto cloro-agua a tratar. En este sentido, el empleo de otros oxidantes alternativos al cloro, tales como  $O_3$ ,  $KMnO_4$ ,  $ClO_2$  y cloraminas da lugar a una menor tasa de generación de THMs en un agua, a igualdad de dosis de reactivo y tiempo de contacto.

Por otra parte, el cumplimiento de valores de cloro en puntos finales de la red de  $0,2 \text{ mg/L}$  exigido por el Decreto 70/2009 de la Junta de Andalucía, suponía la necesidad de contar con re-cloraciones del agua en diferentes puntos de los abastecimientos. Como consecuencia, los sucesivos aportes de cloro al agua suponían un paralelo incremento de los THMs, cuyo valor era difícil que se ajustase habitualmente a los  $100 \text{ m/L}$  establecidos. Esta problemática está haciendo que los diferentes abastecimientos de la Comunidad Andaluza se pongan en marcha para conjugar ambas cuestiones.

En orden a lo anterior, este trabajo expone la estrategia práctica llevada a cabo por EMACSA en el abastecimiento de aguas de Córdoba, consistente en sustituir la desinfección fi-





nal con cloro por cloraminas. Los datos obtenidos entre octubre de 2.008 y mayo de 2.010 justifican la idoneidad de la medida puesto que se ha logrado cumplir con el valor paramétrico de THMs, además de poder mantener el requerimiento establecido sobre una desinfección residual eficaz en el agua de todo nuestro abastecimiento.

## 2.- ESTRATEGIAS GENERALES PARA REDUCIR EL CONTENIDO EN THMS EN AGUAS DESTINADAS A CONSUMO HUMANO

Aparte de algunas variables sobre las que no se puede incidir para reducir los THMs de un agua tratada, como son calidad del agua bruta (temperatura, presencia de catalizadores y halógenos..) y factores de la propia red de distribución (tiempo de contacto agua-cloro) existen varias estrategias válidas, basadas en dos ideas generales: (a) minimizar la cantidad de materia orgánica del agua a

clarar, bien a lo largo del tratamiento en la ETAP (coagulación-floculación, adsorción, incluso filtración) o bien en la primera fase del mismo (pre-oxidación); y (b) reducir la cantidad de cloro aplicado, complementándolo o sustituyéndolo totalmente por otros reactivos alternativos con menor potencial de formación de THMs. Las vías prácticas de actuación más aplicadas son:

- Sustitución total o parcial del cloro empleado.
- Empleo de oxidantes alternativos:  $\text{KMnO}_4$ ,  $\text{ClO}_2$ ,  $\text{O}_3$ , especialmente.
- Empleo de carbón activo (producto en polvo o filtración sobre lecho).
- Empleo de coagulantes más activos que los convencionales en clarificación del agua (policloruros complejos de aluminio y similares).
- Modificación hidráulica y de diseño de Decantadores.
- Sustitución de la cloración convencional en desinfección por cloraminas o  $\text{ClO}_2$ .

En todo caso, será el tipo de agua bruta concreta, el diseño previo de la ETAP, el de la red de distribución, así como la propia capacidad técnica y económica del abastecimiento, los que definan la estrategia válida para cada caso, que debe pasar por ensayos a escala de laboratorio que abor-

den el aspecto fisicoquímico del proceso. Además, cualquier actuación deberá mantener los residuales de cloro (libre o combinado) que no comprometan la inocuidad microbiológica del agua servida y que cumplan con lo establecido por la Autoridad Sanitaria.

## 3.- SOLUCIÓN APLICADA POR EMACSA EN CÓRDOBA

Desde 2.003 EMACSA se marcó el objetivo de estudiar a nivel de laboratorio las posibilidades de empleo de diversos oxidantes-desinfectantes alternativos al cloro gas para reducir THMs en el agua de consumo de Córdoba. Las premisas aplicadas fueron:

- Empleo de diferentes reactivos oxidantes:  $\text{KMnO}_4$ ,  $\text{ClO}_2$ , cloraminas y  $\text{O}_3$ .
- Comparación de generación de THMs para dosis similares de oxidantes y tiempos estándar de tratamiento.
- Variación de la concentración de THMs a lo largo del tiempo hasta llegar a tiempos similares a los de residencia del agua en la red de distribución de la ciudad.
- Mantenimiento de residuales de cloro (libre o combinado) con el tiempo que garantizasen tanto la inocuidad microbiológica del agua como el cumplimiento de estándares en su momento aplicables por la Autoridad Sanitaria.

Como resultado global se concluyó que las cloraminas y el  $\text{ClO}_2$  conseguían estadísticamente los valores más bajos en la generación de THMs totales, incluso con dosis sensiblemente más bajas que las del resto de sustancias evaluadas (Figura-1).

Las cloraminas proporcionaban residuales de cloro combinado de 0,3-0,4 mg/L (dosis inicial aplicada de  $1,5 \text{ g/m}^3$ ) hasta después de 120

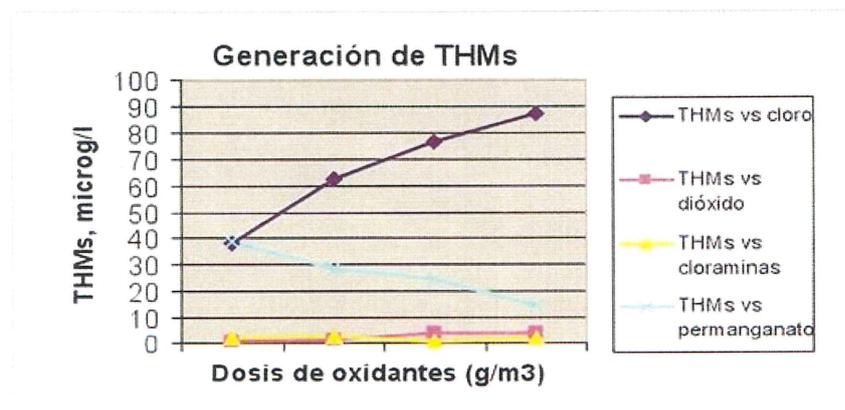


Figura 1. Generación de THMs con diversos oxidantes: dosis 2, 4, 6 y 8 g/m<sup>3</sup>



horas de su adición al agua, con una mínima generación de nitritos en el agua tratada, la cual se mantenía microbiológicamente pura. Se calculó finalmente el coste de la dosificación de cloraminas en unos 0,0015 a 0,0020 € por m<sup>3</sup> de agua producida.

La opción del dióxido de cloro (también muy positiva) se desechó al presentar, según nuestra experiencia, varias desventajas: mayor coste económico que las cloraminas, mayores requerimientos de seguridad ligados al uso de NaClO<sub>2</sub> y de la potencial generación incontrolada de ClO<sub>2</sub> gas, y, la más importante tal vez, cual era la aparición en el agua de un sabor típico que provocaba las quejas de los usuarios, como se comprobó en las ocasiones en que se dosificó ClO<sub>2</sub> a escala real en la ETAP, con motivo de su empleo para reducción de puntas de Fe y Mn en el agua bruta.

En función de todos estos resultados EMACSA optó por trabajar hacia la sustitución del sistema de cloración aplicado como desinfección final del agua en la ETAP de Villa Azul por la dosificación con cloraminas. Con ello la línea de tratamiento de la ETAP apenas variaba y la modificación podía ser técnica y económicamente asumible.

#### 4.- RESULTADOS PRÁCTICOS OBTENIDOS

##### 4.1.- CLORAMINACIÓN DE AGUAS EN LA ETAP DE VILLA AZUL: ASPECTOS TÉCNICOS

La cloraminación a escala industrial debía cumplir con los dos objetivos prácticos de: (a)asegurar la estabilidad en el nivel de THMs en todo el abastecimiento con valores inferiores a 100 µ/L; (b)garantizar residuales de cloro combinado en la red que, de acuerdo con la Autoridad Sanitaria,

## ¿DESHIDRATACIÓN DE FANGOS?

### LA SOLUCIÓN ESTÁ EN PIERALISI



PIERALISI tiene una máquina para cada caudal y una solución para cada problema. Decanters centrífugos con caudales hidráulicos desde 2.500 l/h hasta 140.000 l/h.

Calidad, innovación, alta tecnología... son los motores de la credibilidad de PIERALISI en el mundo

**PIERALISI**  
ESPAÑA S.L.

FÁBRICA: C/ Burtina, 10 (Pol. PLAZA)  
50197 ZARAGOZA (España)  
Tel. 976 46 60 20 - Fax: 976 73 28 16  
e-mail: comercial@pialisi.es



fuesen  $\geq 0,2$  mg/L en los puntos finales de la red (25 km desde la ETAP y con tasas de renovación muy variables de unos puntos a otros). Tras la implantación de las cloraminas (octubre de 2.008) la línea de tratamiento aplicada en la ETAP (1,7 m<sup>3</sup>/s de producción punta) ha sido la siguiente:

- Adsorción con carbón activo en polvo (opcional).
- Pre-oxidación con cloro gas, dióxido de cloro o permanganato potásico.
- Ajuste de pH con Ca(OH)<sub>2</sub> (opcional).
- Coagulación-floculación con sales de aluminio.
- Filtración sobre arena.
- Desinfección con cloraminas (Cl<sub>2</sub> + NH<sub>3</sub>).

El amoníaco se recibe en tanques herméticos de 450 kg de capacidad y todo el sistema se regula de forma automática (con opción en manual) en función del caudal de agua tratada y de la relación cloro/amoníaco que se desee, la cual suele oscilar entre 3/1 y 5/1 (en peso) para conseguir la tasa más favorable en la generación de monocloramina. Para no superar el nivel máximo de amonio en el agua de consumo (0,50 mg/L) la consigna aplicada ha sido no superar este valor en la dosificación práctica. Además, el amonio excedentario presente en el agua podría ser oxidado a lo largo de la red generando cantidades indeseables de nitritos, cuya concentración se haya limitada (RD 140/2003) a 0,10 mg/L en el agua a la salida de ETAP y a 0,50 mg/L en el agua de la red.

Por otro lado, la química de la reacción entre Cl<sub>2</sub> y NH<sub>3</sub> responde a las siguientes ecuaciones básicas:

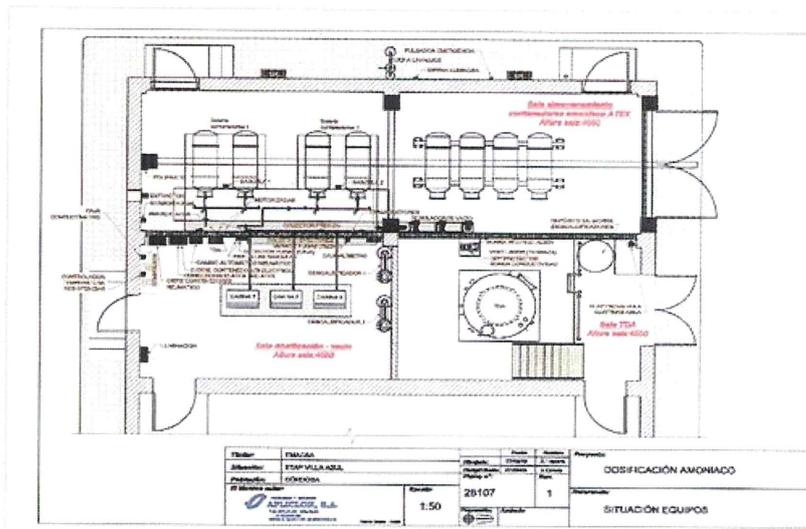
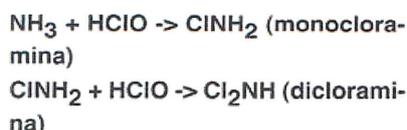


Figura 2. Esquema de la instalación de cloraminación de la ETAP de Villa Azul

**Cl<sub>2</sub>NH + HClO -> Cl<sub>3</sub>N (tricloruro de nitrógeno)**

Estequioméricamente la máxima generación de ClNH<sub>2</sub> (máximo poder oxidante y mínima generación de olor-sabor en el agua) se da operando a pH=10, necesitando así el ajuste previo de pH del medio de reacción mediante la dosificación de NaOH o Ca(OH)<sub>2</sub>, por ejemplo, y trabajando entonces con una relación Cl<sub>2</sub>/NH<sub>3</sub> de 5,1 en peso.

No obstante en la práctica rutinaria y también en nuestro caso, se opera a pH 6,8-7,3 (en realidad, el pH del agua en origen) y con una relación en peso Cl<sub>2</sub>/NH<sub>3</sub>  $\leq 4,1$ . Con estas condiciones se consiguen tasas de formación de ClNH<sub>2</sub> altas, evitando el complicar la instalación con un sistema accesorio de dosificación para ajuste previo de pH.



Además, al usar menor cantidad de cloro que en el primer caso, también se reduce el residual de cloro no reaccionante que pudiese generar cantidades indeseables de THMs en el agua.

La figura-2 presenta el esquema de la instalación para almacenamiento, dosificación y control de la dosificación de amoníaco instalada en la ETAP de Villa Azul (fotografía-1), mientras la fotografía-2 presenta dos vistas del sistema. A comentar que como medida de seguridad ante escapes accidentales de NH<sub>3</sub> gas, éstas serían neutralizadas en un tanque de ácido sulfúrico anejo a la instalación.

Otra cuestión importante a considerar fue la necesidad de adaptar las analíticas de laboratorio para determinación de amonio residual, y de las diversas especies cloradas presentes en las aguas desinfectadas con cloraminas. Así, las metodologías analíticas empleadas cuando se dosificaba cloro en desinfección debieron ser sustituidas como más eficaces y precisas por el método de Berthelot para el amonio (reacción a pH básico con un compuesto fenólico, y medida del com-



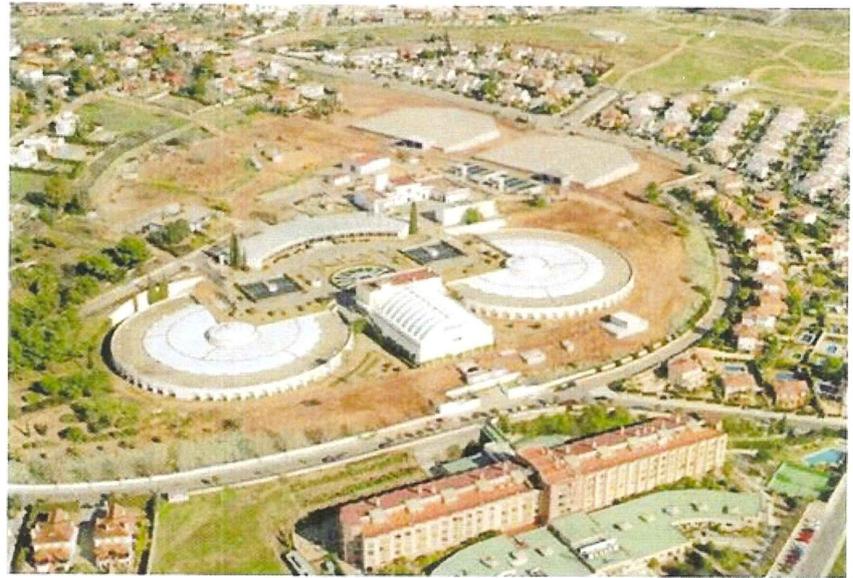
plejo formado a una longitud de onda de 660 nm), y por la volumetría con sal de Oesper para cloro total y libre, correspondiendo la diferencia entre estas dos medidas al cloro combinado del agua.

#### 4.2.- AGUA BRUTA Y TRATAMIENTO EN LA ETAP

El agua bruta a tratar en la ETAP procede del embalse de Guadalmeillato y sus características medias y extremas se recogen en la tabla-1: se trata de un agua de calidad aceptable y sin especiales parámetros conflictivos cara a su tratamiento. Como excepciones, las de episodios más o menos periódicos con altos niveles de Fe y Mn, especialmente, que coinciden con el aprovechamiento de aguas situadas en la zona del hipolimnion del embalse durante finales de verano y otoño, así como episodios de aguas brutas con alta turbidez y bajo contenido salino, en invierno y primavera (por lluvias). Estas dos circunstancias explican la amplia variabilidad de la calidad del agua bruta recogida en la referida tabla-1. No obstante, los valores medios del agua bruta se mantienen estables durante gran parte del año (7-8 meses, según climatología).

Con relación a la ETAP, la línea de tratamiento en el orden práctico consistió en la convencional aplicada hasta octubre de 2.008, con la única sustitución en desinfección final del habitual cloro gas por cloraminas (ver apartado 4.1). Las dosis aplicadas (valores medios y extremos) se recogen en la tabla-2.

El empleo de  $KMnO_4$  o  $Cl_2$  en preoxidación viene marcado por el contenido en M.O., Fe, y especialmente, Mn del agua bruta: así, contenidos  $> 0,250$  mg/L implicaban su empleo como más favorable que la cloración. Respecto a la cloramina-



Fotografía 1. Imagen aérea ETAP Villa Azul (Córdoba)

ción, las dosis variaron muy poco al no tener más que una misión desinfectante. En todo caso, la relación  $Cl_2/NH_3$  osciló entre 5/1 y 3,4/1 mientras la media fue de 3,7/1.

#### 4.3.- AGUA TRATADA Y CONCENTRACIÓN DE THMS

Las dosis empleadas garantizaron una la calidad del agua producida en la ETAP alta (ver tabla-1) con valores muy bajos de color y turbidez, así como contenidos en Fe y

Mn mínimos. Esta calidad no varió en relación al período anterior al inicio de la cloraminación del agua (hasta octubre de 2.008).

La figura-3 recoge el seguimiento de los niveles de THMs, tanto en el agua salida de la ETAP como en diferentes puntos de la red de distribución. Sólo tres muestras en agua de salida de la ETAP y otras 3 muestras en agua de red superaron el valor paramétrico lo que supone que un 96,25% de todos los datos analizados cumplían con la norma.

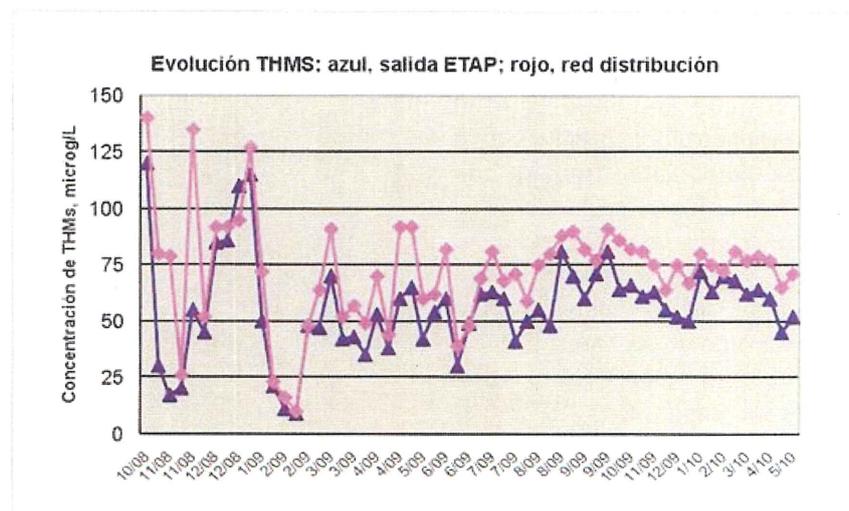


Figura 3. Contenido en THMs en salida de ETAP y red de Córdoba



Evaluando los resultados obtenidos, el valor medio de THMs en el agua de salida de la ETAP fue de  $57 \mu\text{L}$ , mientras que en el agua de la red ascendió hasta  $73 \mu\text{L}$ , con lo se deducía que en la red se incrementaba un 28% con respecto al del agua producida en planta. Este incremento se explica por la generación diferida de THMs en red provocada por reacción entre cloro residual y bio-film de las redes de distribución. Comparados estos resultados con la situación de la dosificación de cloro, ésta fue claramente más desfavorable con una apreciablemente más alta generación diferida de THMs en la red: +55%, desde  $77 \mu\text{L}$  en salida de ETAP hasta  $119 \mu\text{L}$ , como media, en la red.

En todo caso, la generación de THMs en salida de ETAP y en la red están siendo, respectivamente, un 26% y un 39% más bajas que con cloro ( $57$  vs  $77 \mu\text{L}$ , y  $73$  vs  $119 \mu\text{L}$ ). Tomando ambos datos en conjunto podemos cifrar en un 33% menos la generación de THMs con cloraminas con respecto a la ligada a la desinfección con cloro.

Con respecto a las puntas de THMs aplicando la cloraminación, la mayoría de los valores superiores a  $100 \mu\text{L}$  se midieron en los 2-3 primeros meses de nuestro estudio, lo que indicaba que el abastecimiento (especialmente, la red de distribución) "requirió" de este tiempo para acomodarse al nuevo sistema de desinfección, el cual ha de haber modificado más o menos las características del bio-film existente en las redes.

Finalmente, en cuanto a los THMs generados, el 74,8% correspondió a cloroformo, el 19,9% a dicloro-bromo metano, el 5,2% a dibromo-cloro metano y el 0,1% a bromoformo (figura-4) lo que está

de acuerdo con los muy bajos niveles de Br y I del agua bruta procesada ( $<0,5 \mu\text{L}$  y  $<0,01 \mu\text{L}$ , respectivamente).

#### 4.4.- GENERACIÓN DE THMS EN EL ABASTECIMIENTO: FACTORES PRÁCTICOS QUE INFLUYEN

Se han investigado las posibles relaciones que pueden regir la mayor o menor formación práctica de THMs en el agua de nuestro abastecimiento. En primer lugar, dado que no se tenían datos de materia orgánica disuelta (M.O.D.) se operó con los datos disponibles de oxidabilidad al permanganato (M.O.). En el espectro de M.O. presentado por el agua bruta procesada ( $7,2 \text{ mg/L}$ - $3,3 \text{ mg/L}$ ) existió una asociación entre valores más altos de M.O. y concentraciones más altas de THMs: cada  $\text{mg/L}$  de M.O. incrementó unos  $8 \mu\text{L}$  los THMs del agua generada en la ETAP, con independencia del tratamiento aplicado.

Por otro lado, como proceso de pre-oxidación aplicado durante el estudio se utilizó  $\text{KMnO}_4$  ante aumentos de M.O., Fe o Mn del agua bruta, o cloro gas para aguas brutas

menos exigentes. Como conclusión general, el uso de  $\text{KMnO}_4$  no parecía afectar a la tasa de generación de THMs en la estación de tratamiento (ver figura-5).

Con relación a la influencia de la temperatura del agua sobre los THMs generados se ha concluido que, en el abanico de temperaturas investigado ( $10,5^\circ\text{C}$  a  $28,0^\circ\text{C}$ ) existía una tendencia que asociaba más altos contenidos en THMs con valores más elevados de temperatura, cifrándose aproximadamente la cuantía de este factor en un aumento de unos  $2,4 \mu\text{L}$  de THMs por cada  $^\circ\text{C}$  de incremento de la temperatura del agua.

También se ha valorado la influencia práctica de la dosis de cloro aplicada al agua sobre la generación de THMs. Dado que la dosis final de cloraminas apenas variaba (unos  $1,7 \text{ g/m}^3$ , con relación cloro/amoníaco de 3,7/1, como valor medio) podría intentarse en este caso trabajar con la dosis total de cloro aplicada (pre-oxidación+desinfección). Así, para dosificaciones totales de cloro comprendidas entre  $2,8$  y  $6,0 \text{ g/m}^3$ , la generación de THMs se incrementó desde unos 30



Fotografía 2. Instalación interior del sistema de dosificación de amoníaco gas: arriba, sistemas de control; abajo, descalcificadores de agua para dilución y tanques de amoníaco

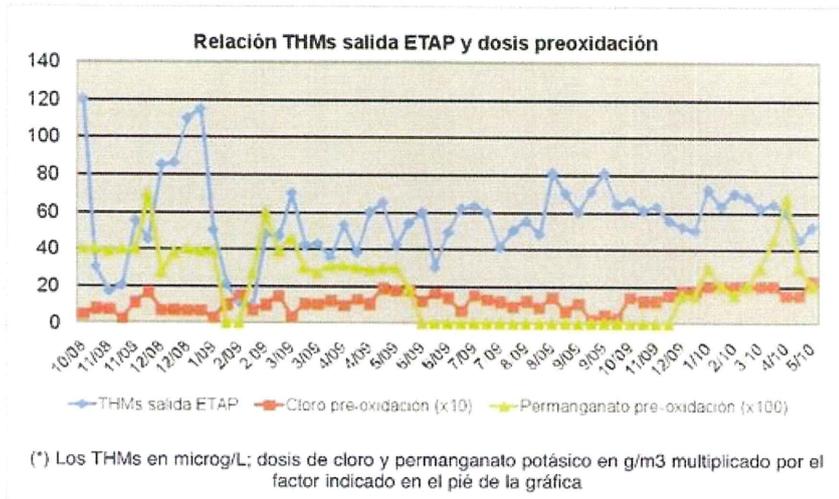


Figura 5. Influencia de la pre-oxidación (KMnO<sub>4</sub> o Cl<sub>2</sub>) sobre la generación de THMs

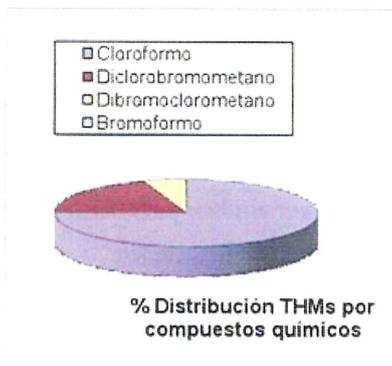


Figura 4. Especiación de THMs: compuestos químicos generados

μ/L hasta unos 120 μ/L. Es decir, con la calidad del agua disponible, cada g/m<sup>3</sup> de cloro total suponía un aumento de unos 28 μ/L en los THMs totales del agua producida en la ETAP.

También se ha estudiado la evolución práctica de los THMs en la red de distribución de Córdoba (figura-6 y figura-7). Como conclusiones, por una parte no se comprobó relación entre niveles de cloro combinado en red y concentraciones de THMs, lo cual se ajusta a lo indicado en bibliografía. Sí pudo observarse, por el contrario, que tras un determinado período de "adaptación" de la red, con valores más altos de THMs, estos se reducían paulatinamente (figura-6, parte derecha).

En realidad la generación diferida de THMs está más afectada por el tiempo de contacto (distancia desde la ETAP y renovación del agua en tuberías) y la temperatura del agua, como se comentó más arriba, la cual podía aumentar del orden de 2-4°C desde la ETAP hasta los diferentes puntos de la red en tiempo estival, no existiendo en invierno apenas variación de temperatura desde la ETAP hasta la red. Por otra parte, en la distribución zonal por la ciudad de los incrementos

de THMs con relación a los de salida de la ETAP recogida en la figura-7, los aumentos superiores al 30% se focalizaban en zonas de tuberías generales de distribución de menor calibre (diámetro < 100 mm) y menor tasa de renovación (consumos bajos, casas unifamiliares y edificios con menos ocupación) habida cuenta de que la red de la ciudad ha experimentado en los últimos años una importante renovación y globalmente es de materiales poco envejecidos.

#### 4.5.- VALORES RESIDUALES DE CLORO EN RED (DECRETO 70/2009 DE LA JUNTA DE ANDALUCÍA) Y FACTORES RELACIONADOS: CONCENTRACIÓN DE NITRITOS Y MICROBIOLOGÍA

Evaluemos ahora el comportamiento del residual de cloro en la red para cumplir con el Decreto 70/2009 de la Junta de Andalucía. Así, tras un período inicial de unos tres meses se comprobó que el cloro combinado en los puntos finales de red (situados hasta a 25 km de la ETAP) estaba siempre por encima de 0,25-

Tabla 1. Características del agua bruta y tratada de la ETAP de Villa Azul (octubre 2008 a mayo 2010)

Agua bruta	Máx.	Mín.	Med.	Agua tratada	Máx.	Mín.	Med.
Color, mg/L	150	7	19	Color, mg/L	5	0	0,4
Turbidez, UNF	165	1,7	11,1	Turbidez, UNF	0,6	0,02	0,15
Conductividad, μS/cm	270	141	234	Conductividad, μS/cm	285	150	244
pH	7,9	7,0	7,4	pH	7,3	6,8	7,0
Nitritos, mg/L	0,281	0,005	0,044	Nitritos, mg/L	0,046	<0,005	0,006
Amonio, mg/L	0,224	0,02	0,043	Amonio, mg/L	0,485	0,315	0,430
Oxidabilidad (M.O.), mg/L	7,2	3,3	4,5	Oxidabilidad (M.O.), mg/L	3,5	1,3	2,4
Hierro, mg/L	0,586	0,016	0,085	Hierro, mg/L	0,02	<0,01	<0,01
Manganeso, mg/L	0,712	0,029	0,158	Manganeso, mg/L	0,04	<0,03	<0,03



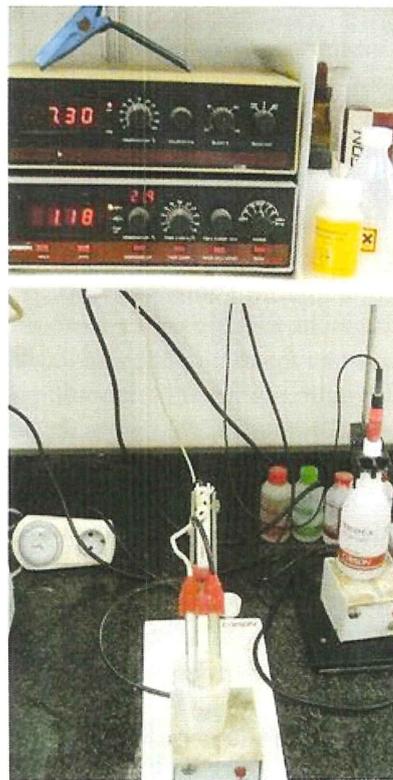
0,35 mg/L. Dado que el requerimiento consensuado con la Autoridad Sanitaria fue mantener un valor de cloro combinado  $\geq 0,2$  mg/L, podemos corroborar que se ha alcanzado el objetivo propuesto.

Como otro efecto colateral positivo, además de cumplir con el nivel de desinfectante exigido, y dado que el mantenimiento del cloro combinado en red se extiende durante más tiempo y se mantiene constante también durante más tiempo que el cloro libre, se han podido suprimir (salvo como elementos de emergencia) las 8 re-cloraciones existentes en la red necesarias mientras se operaba con cloro para mantener niveles de cloro libre superiores o iguales a 0,2 mg/L.

En este sentido, y teniendo en cuenta que los niveles medios de cloro residual combinado en toda la red de distribución de Córdoba se han situado entre 0,6 y 0,8 mg/L, también hemos conseguido, tras el visto bueno de la Autoridad Sanitaria, el poder reducir el número de tomas de muestras para comprobación de cloro residual en el abastecimiento en un 12% (6.200 al año realizadas con cloración) lo que ha supuesto un apreciable ahorro económico y técnico asociado.

	Máximo	Mínimo	Media
Cloro preoxidación	3,0	0,8	1,9
Permanganato	0,67	0,1	0,3
PAX-10	30,0	18,0	23,2
Cloro desinfección	3,0	1,2	1,7
Amoníaco desinfección	0,50(*)	0,35	0,45

(\*) Se llegaron a dosificar hasta 0,6 g/m<sup>3</sup>, hasta ajuste definitivo del tratamiento



Un potencial riesgo de la cloraminación reside en la posible generación de residuales indeseados de nitritos a consecuencia de la oxidación en la red de distribución de cantidades de amonio libre existentes en el agua. En nuestro caso, como en el del resto de abastecimientos que aplican cloraminas, siempre estamos operando con valores de dosificación de amonio en la ETAP inferiores a 0,500 mg/L, y ajustando la estequiometría del proceso a fin de que el contenido de amonio libre sea mínimo. En este sentido, teniendo en cuenta que cada parte de amonio libre sería capaz de generar en condiciones óptimas de oxidación en la red hasta 2,7 partes de nitritos, según la reacción química,



para generar más de 0,500 mg/L de nitritos en red habría de superar concentraciones de amonio libre superiores a 0,185 mg/L. Dado que lo habitual son concentraciones inferiores a 0,050 mg/L, el margen de seguridad existente es más que suficiente. Esto se corrobora asimismo con el dato de que los valores más altos de nitritos detectados en el agua de nuestra red de distribución, en puntos finales y con tiempos de renovación del agua del orden de 5 días, no superan los 0,080 mg/L, cantidad muy inferior

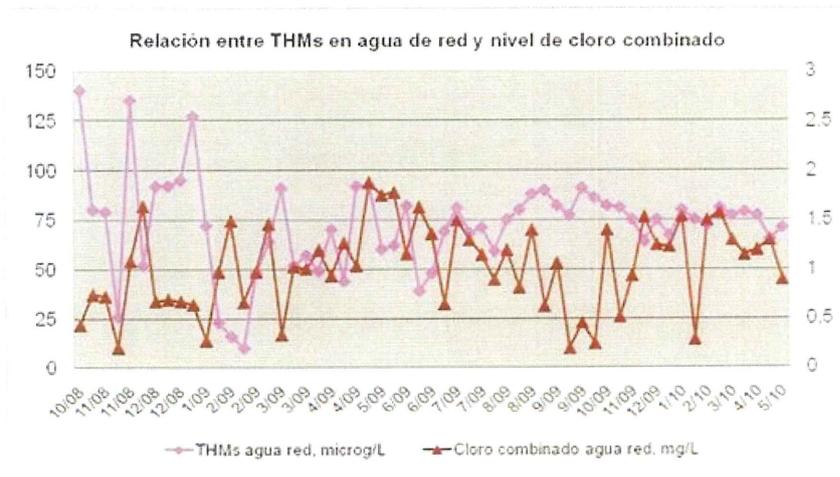


Figura 6. Relación entre THMs en red y cloro residual combinado (octubre 2008 a mayo 2010)

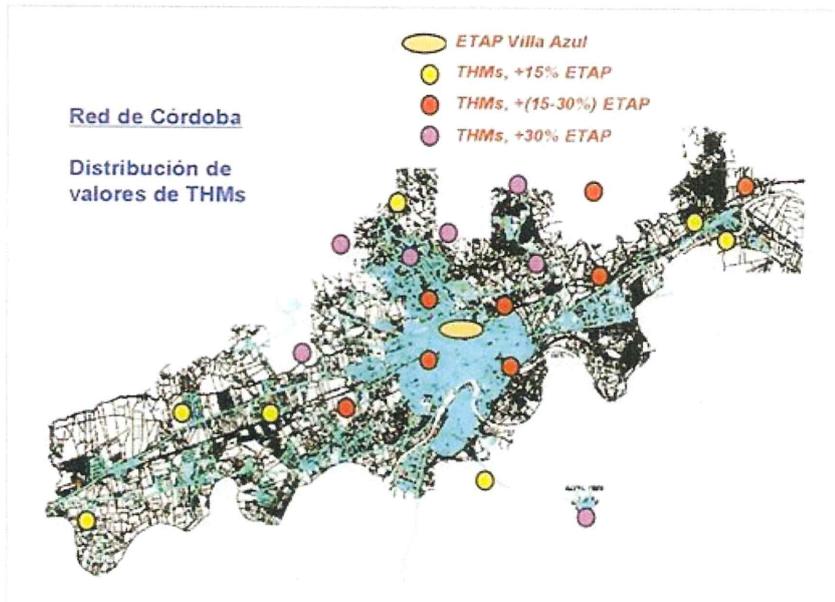


Figura 7. Distribución de THMs por diferentes zonas de la red de la ciudad

al límite establecido en la normativa (0,500 mg/L). Además, el valor medio estadístico del nivel de nitratos en el agua de la red de distribución es de 0,017 mg/L.

Cuestión crítica a fin de validar totalmente la idoneidad de la cloraminación es la microbiológica. Respecto a esto, durante los tres primeros meses desde la implantación del sistema se observaron valores de aerobios totales a 37°C de hasta 20 colonias/mL en salida de la ETAP y de hasta 50 colonias/mL en la red. Estos valores, dentro de la normalidad, informaban sobre cambios adaptativos del bio-film de las tuberías de la red (e incluso dentro de la propia instalación interior de la ETAP). En todo caso, la positividad en la detección de aerobios a 37°C fue progresivamente desapareciendo tras los primeros meses de la cloraminación hasta situarse desde entonces en 0 colonias/mL.

Por último, no se han detectado otras incidencias microbiológicas en nuestra agua de consumo (*Escherichia coli*, enterococos, *clostridium*

*perfringens* y/o coliformes totales) desde la implantación de las cloraminas. Con esta evidencia, se deduce que la eficacia en el mantenimiento de la idoneidad microbiológica del agua lograda con las cloraminas se muestra sensiblemente similar a la conseguida con el cloro libre.

#### 4.6.- OTROS ASPECTOS A CONSIDERAR

Debe significarse necesariamente la percepción generalizada del consumidor de que el agua de grifo ya no presenta el sabor a cloro habitual, lo que para un sector importante de la población representaba un cierto hándicap para su consumo. En resumen, la opinión generalizada del consumidor es la de que el agua ha mejorado su calidad, lo cual se corrobora con un menor número de quejas por calidad de agua recibidas en EMACSA tras la implantación de las cloraminas, con relación a la situación anterior.

No obstante, cabe indicar que la presencia de cloraminas en el agua

de la red puede tener un cierto aspecto negativo sobre la vida piscícola en acuarios domésticos, lo que requiere modificar el producto para de-cloración normalmente empleado a tal fin.

En el plano económico, el coste de la implantación de la cloraminación en la ETAP se ha cifrado en 626.000 €, además de la necesidad de controlar la seguridad de un nuevo proceso de tratamiento y un nuevo reactivo en la planta, lo que ha supuesto la obligada formación del personal en esta nueva tecnología.

Respecto al coste de mantenimiento frente a la cloración, el gasto de cloro en desinfección (para dosis medias de 1,3 g/m<sup>3</sup>) era de 1,023 €/1.000 m<sup>3</sup>, y el de la re-cloración en red (0,8 g/m<sup>3</sup> -dosis medias- para el 50% del caudal consumido por la ciudad) de 0,315 €/1.000 m<sup>3</sup>, mientras que el coste de la cloraminación (1,8 g/m<sup>3</sup> de Cl<sup>2</sup> + 0,48 g/m<sup>3</sup> de NH<sup>3</sup>) está siendo de 2,089 €/1.000 m<sup>3</sup>.

Por otra parte, debe considerarse como aspecto positivo el actual menor número de tomas de muestras de control de cloro en red, que expresado como coste (728 tomas/año x 17 €/toma, para 25x106 m<sup>3</sup> de agua) podría cifrarse en 0,495 €/1.000 m<sup>3</sup>.

En resumen, el coste de la desinfección en nuestro abastecimiento ha pasado desde los 1,338 €/1.000 m<sup>3</sup> con cloro, a los 1,594 €/1.000 m<sup>3</sup> aplicando cloraminas, es decir, un 19% más elevado.

#### CONCLUSIONES

- La cloraminación del agua de Córdoba ha permitido conseguir niveles de THMs totales en el agua producida en la ETAP de 57 µ/L y de 73 µ/L en el agua de la red de distribución, sensiblemente más bajos que con cloro.



- En la generación de THMs en la ETAP no influyó el pre-oxidante empleado ( $\text{Cl}_2$  o  $\text{KMnO}_4$ ) pero sí se obtuvo una correlación entre más THMs y más altas dosis de cloro total: cada  $\text{g/m}^3$  de cloro total suponía un aumento de unos  $28 \mu\text{L}$ .

- Temperatura y oxidabilidad (M.O.) afectaban también a la tasa de THMs: por cada  $^\circ\text{C}$  estos aumentaban  $2,4 \mu\text{L}$ , y por cada  $\text{mg/L}$  de M.O. lo hacían en  $8 \mu\text{L}$ .

- No detectándose influencia sobre THMs formados del cloro residual del agua de la red, los incrementos más altos de THMs en red frente a los de la ETAP se ubicaban en zonas de la red de la ciudad con bajas tasas de renovación del agua y más bajos consumos.

- Los niveles de nitritos asociados a la cloraminación (salida de ETAP y red de distribución) están muy por debajo de los límites aplicables, exhi-

biendo las cloraminas una potencia microbicida esencialmente similar a la del cloro libre.

- Se ha logrado cumplir con la exigencia sanitaria sobre desinfectante residual, pudiéndose mantener el residual en finales de red en  $0,25\text{-}0,35 \text{ mg/L}$  de  $\text{Cl}_2$  combinado, con la supresión (salvo como emergencia) de las ocho re-cloraciones existentes en la red.

- Por último, el coste de la planta de cloraminación ha sido de  $626.000 \text{ €}$ , y el coste de la dosificación de cloraminas se ha cifrado en  $1.594 \text{ €}/1.000 \text{ m}^3$  (19% más que con cloro) lo que coincide con los datos obtenidos previamente a escala de laboratorio.



#### AGRADECIMIENTOS

A los integrantes de la Subárea de Control de Calidad, Calidad y Medio Ambiente de EMACSA, al Canal de Isabel II y a todos los miembros de la Comisión II de AEAS. Especialmente a D. José Antonio González Carballo, de EMASESA, por su aportación e ilustrativas ideas sobre el estudio presentado.



#### BIBLIOGRAFÍA

Francisco Ramírez Quirós. Desinfección del agua con cloro y cloraminas. *TÉCNICA INDUSTRIAL*, 260, Diciembre (2.005).

R. Marín Galván, M. de la Fuente Darder y M<sup>a</sup>. del Mar González Jiménez. Utilidad práctica de diferentes reactivos aptos para potabilización de aguas. *INFOENVIRO*, 9, (2.005), pp. 63-69.

Decreto 70/2009 de 31-3-2.009, de la Consejería de Salud de la Junta de Andalucía.

R. Marín Galván. Aplicación práctica de las cloraminas en la desinfección del agua de abastecimiento a Córdoba. *XXX Jornadas Técnicas de AEAS* (2.010), Actas, pp. 103-116.

# RETEMA

Revista Técnica de Medio Ambiente

WWW.RETEMA.ES

Nº 146

SEPTIEMBRE - OCTUBRE 2010



**DESALADORA DE TORREVIEJA (ALICANTE). • EVALUACIÓN Y PRESENCIA DE CONTAMINANTES EMERGENTES EN AGUAS. RECUPERADORES DE ENERGÍA EN PLANTAS DE ÓSMOSIS INVERSA. • EDAR DE BENS (A CORUÑA). DESALADORA DE BENI SAF (ARGELIA). • RECUPERACIÓN DE AZÚCARES Y AGUA MEDIANTE NANOFILTRACIÓN EN LA INDUSTRIA AGROALIMENTARIA. • PRÁCTICA DE LA CLORAMINACIÓN COMO DESINFECCIÓN FINAL DEL AGUA DE CÓRDOBA. • MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES (MTDs) EN LA INDUSTRIA LACTEA.**