

INFLUENCIA DEL NIVEL DE PRETRATAMIENTO DE UN EFLUENTE SECUNDARIO SOBRE LAS MEMBRANAS DE UNA UNIDAD DE ÓSMOSIS INVERSA. CALIDAD DEL PERMEADO Y COSTES DEL PROCESO.

José Antonio López-Ramírez, Diego Sales y José María Quiroga

Resumen:

El interés por la reutilización de las aguas residuales urbanas en España ha alcanzado un interés importante, especialmente en los últimos años. No obstante, los proyectos de demostración realizados son aún escasos. En este artículo se presentan parte de los estudios realizados en una planta piloto experimental para la reutilización de aguas residuales urbanas ubicada en Chiclana de la Frontera, Cádiz. Dicha planta está dotada de la más moderna tecnología para el tratamiento terciario de las aguas residuales. El efluente secundario de la EDAR "La Barrosa" es sometido a tres niveles de pretratamiento antes de su entrada en la ósmosis inversa, con el objetivo de estudiar el funcionamiento de las membranas de acetato de celulosa ante diferentes características del afluente. La calidad del permeado, independientemente del tratamiento efectuado, es elevada permitiendo su reutilización en cualquier tipo de aplicación. Asimismo se presentan los costes asociados al desarrollo de los experimentos. Éstos, junto a todos los datos y resultados recogidos durante los experimentos, aconsejan emplear el pretratamiento intenso del afluente antes de su entrada en la unidad de ósmosis inversa, para proteger a las membranas y la seguridad del proceso de regeneración de aguas residuales.

Palabras clave: regeneración, ósmosis inversa, pretratamiento, reutilización de aguas residuales, costes, permeado.

En numerosos países la reutilización de las aguas residuales es una fuente adicional de recursos de agua, y como tal está incluida en la gestión integral del agua. En España, si bien el interés por dicho recurso es enorme, las acciones llevadas a la práctica son aun demasiado limitadas. La posible explicación puede hallarse en el escaso número de proyectos de demostración desarrollados y en la ausencia de un marco regulador específico para la reutilización segura de las aguas regeneradas.

De entre las distintas aplicaciones posibles que tienen las aguas residuales regeneradas destaca por su especial interés la recarga directa de acuíferos. Ésta exige una calidad muy elevada en el agua regenerada que se inyecta y especialmente un contenido de material disuelto especialmente bajo (Bouwer, 1996). Este tipo de aplicación permite, por un lado, recuperar los acuíferos salinizados y, por otro, aumentar las reservas de aguas subterráneas.

Para conseguir tal objetivo a partir de agua residual tratada es necesario recurrir a la ósmosis inversa, lo cual permite obtener un agua de elevada calidad.

El uso de la ósmosis inversa ha resultado muy exitoso en aquellos proyectos en los que se la ha empleado y que han sido descritos hasta la fecha (Asano y Levine, 1995). No obstante, cuando se emplea la ósmosis inversa tras un tratamiento secundario hay dos problemas que deben ser controlados: la colonización de las membranas por microorganismos (Ghayeni, et al., 1998), y la deposición de sólidos en suspensión sobre las membranas (Elimelech et al., 1997). Ambos fenómenos ensucian la capa activa perjudicando seriamente el rendimiento de las unidades y además incrementan los costes del proceso. La colonización microbiana es particularmente importante cuando las membranas son de acetato de celulosa, puesto que se pueden generar daños irreversibles en las mismas.

Departamento de Ingeniería Química, Tecnología de Alimentos y Tecnologías del Medio Ambiente. Centro Andaluz Superior de Estudios Marinos, CA-SEM, Universidad de Cádiz. Polígono Río San Pedro, s/ n. 11510-Puerto Real, Cádiz, España.
Telf.: 956 016157. Fax: 956 016040. E-mail: juanantonio.lopez@uca.es

Artículo recibido el 11 de noviembre de 2003, recibido en forma revisada el 15 de diciembre de 2003 y aceptado para su publicación el 2 de febrero de 2004. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

Si se usan membranas compuestas de poliamida los procesos de biodegradación no tienen lugar, pero existe una mayor tendencia al ensuciamiento por las propias características de funcionamiento de estas membranas (Zhu y Elimelech, 1997).

El adecuado pretratamiento de los afluentes, antes de entrar en la unidad de ósmosis inversa, es de vital importancia dado que permite la eliminación de todos aquellos agentes perniciosos para el correcto funcionamiento de las membranas: los microorganismos, los sólidos en suspensión y la materia coloidal, de tal manera que hasta donde sea viable técnica y económicamente, las membranas sólo reciban agua con sólidos disueltos. Esto permite a las membranas trabajar en condiciones idóneas que extienden la vida útil de las mismas y hacen asumible económicamente el proyecto de regeneración de aguas residuales.

Partiendo de un efluente secundario, los pretratamientos que sufren las aguas residuales depuradas antes de su desalación suelen consistir en una eliminación de la materia orgánica (de características coloidales fundamentalmente) mediante procesos de coagulación-floculación-sedimentación, una eliminación de microorganismos mediante tratamientos de desinfección y un acondicionamiento químico necesario para el buen funcionamiento de las membranas. Puesto que la calidad de los efluentes secundarios no suele ser uniforme, resulta imprescindible determinar las condiciones óptimas de operación de las unidades de tratamiento físico-químico que se van a emplear como unidades de pretratamiento a la unidad de ósmosis inversa (Asano et al, 1991), por lo que los estudios a escala piloto resultan, hoy en día, todavía fundamentales, mientras no existan modelos matemáticos adecuados que predigan el ensuciamiento en las membranas de ósmosis inversa.

Desde un punto de vista económico el pretratamiento previo que deben sufrir las aguas antes de su entrada en las membranas de ósmosis inversa supone un incremento en el coste del tratamiento final del agua. No obstante, el avance experimentado por las membranas de ósmosis inversa, especialmente en los últimos años que las hacen más permeables, más selectivas, más resistentes y más baratas podría llevar a pensar que es posible reducir, sin mermar las características del efluente para su reutilización, el nivel de pretratamiento necesario repercutiendo el coste de éste mediante la reposición de las membranas.

Ante esta doble situación cabe plantearse la siguiente pregunta: ¿es preferible aumentar la protección de las membranas con un pretratamiento intenso antes de entrar en la unidad de ósmosis inversa, o por el contrario es preferible reducir el grado de este pretratamiento compensándolo con una mayor reposición de membranas?.

En este artículo se muestran parte de los datos obtenidos en la optimización de los distintos tratamientos físico-químicos que se emplean para pretratar un efluente secundario antes de su entrada a una unidad de ósmosis inversa, los costes económicos asociados, así como la influencia que tienen dichos pretratamientos sobre el funcionamiento de las membranas de la unidad de ósmosis inversa.

MATERIAL Y MÉTODOS.

Descripción de la planta.

La instalación en la que se han desarrollado los estudios es una planta piloto experimental (100 metros cúbicos/día) para la reutilización de las aguas residuales urbanas ubicada dentro de la EDAR "La Barrosa" (10.000 m³/día), en Chiclana de la Frontera, Cádiz. Se construyó con el objetivo de llevar a cabo estudios de optimización para la obtención de un agua de alta calidad y perfectamente reutilizable a un coste razonable empleando tecnologías avanzadas de tratamiento. El agua obtenida, de elevada calidad, se inyecta directamente en el acuífero de la zona.

La planta consta de cuatro módulos interconectados entre sí: módulo de decantación, módulo de filtración, módulo de ósmosis inversa y caseta de control y laboratorio. Está completamente automatizada y tiene una gran versatilidad y flexibilidad que le permite emplear o no las distintas unidades de tratamiento de las que consta. En la Figura 1 aparece una vista general de la instalación. Además, dispone de la suficiente instrumentación en campo para llevar el control remoto de las variables de los distintos procesos: caudalímetros, pH-metros, conductímetro, indicadores de presión, termopares, etc. En la Figura 2 aparece el diagrama de flujo de la instalación. El laboratorio permite la realización de análisis para el control y seguimiento diario de los procesos (pH, conductividad, turbidez, alcalinidad permanente y temporal, dureza cálcica, magnésica y total y cloruros).

El resto de los análisis (análisis microbiológicos, DBO₅, DQO, sólidos en suspensión, sulfatos, nitratos, nitritos, calcio, magnesio, fosfatos) se ha llevado a cabo en las instalaciones del Grupo de investigación de Tecnologías del Medio Ambiente en la Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales de la Universidad de Cádiz. Los diferentes parámetros estudiados en las muestras de aguas fueron analizados siguiendo los métodos normalizados para el análisis de aguas (APHA, AWWA, WPCF, 1992). Los valores de SDI (silt density index), parámetro que mide el atascamiento de un filtro de 0,45 micrómetros por los sólidos en suspensión contenidos en un agua, fueron obtenidos utilizando la norma ASTM D 4189-95 (Standard Test Method for Silt Density Index (SDI) of Water). El tiempo transcurrido entre las dos mediciones fue siempre de quince minutos.

Con el objetivo de estudiar el funcionamiento de las membranas de acetato de celulosa ante distintos tipos de calidad de agua se aplicaron tres grados de tratamientos al agua que entraba en la unidad de ósmosis inversa, los cuales se denominaron como: tratamiento intenso, tratamiento moderado y tratamiento mínimo, cuyas características se detallan más adelante.

Previamente a la experimentación en planta se desarrollaron estudios de laboratorio de "jar test" que resultaron muy útiles para la determinación de las concentraciones más adecuadas para su empleo posterior en planta. Dichos ensayos permitieron establecer el valor de pH y las concentraciones óptimas de cloruro férrico, polielectrolito e hipoclorito sódico que fueron utilizadas posteriormente. A continuación se presentan las operaciones que integran cada uno de los tres tratamientos realizados:

Tratamiento intenso.

Se aplicó un tratamiento avanzado convencional que consistió en: coagulación-floculación-sedimentación (lamelar) a alto pH utilizando para ello cal apagada, cloruro férrico y polielectrolito, filtración sobre arena de sílex, desinfección con hipoclorito sódico y por rayos ultravioletas, acondicionamiento químico (añadiendo un anti-incrustante y corrigiendo el pH con ácido clorhídrico), microfiltración de seguridad (5 micrómetros) y ósmosis inversa.

Tratamiento moderado.

Se aplicó el mismo tratamiento que en el caso anterior, pero sin añadir cal. Ello tiene una serie de repercusiones importantes como posteriormente podrán observarse en los resultados y discusión relacionados principalmente con una peor sedimentación de los fangos.

Tratamiento mínimo.

En este tipo de tratamiento sólo se aplicó la sedimentación, la desinfección por cloración y rayos ultravioletas, la filtración en arena, la microfiltración de seguridad y la ósmosis inversa. Este tratamiento trata de mantener las condiciones mínimas requeridas para el adecuado funcionamiento de las membranas.

Los tratamientos aplicados, dependiendo de su grado de intensidad, repercuten de forma diferente sobre el funcionamiento de las membranas. Así, tras cada tipo de tratamiento se llevaron a cabo análisis de las aguas de entrada y de salida de la instalación, de tal manera que pudiese ser evaluada la calidad del efluente final y eficacia del tratamiento.

Las membranas empleadas en el estudio habían sido fabricadas por la marca Hydranautics, modelo 4040-MSY-CAB2 hechas en acetato de celulosa. Se emplearon cuarenta y dos elementos de membranas (40*40) dispuestos en una doble etapa con un setenta y cinco por ciento de conversión y una producción nominal de 100 metros cúbicos por día, a menos que se indique lo contrario. Las membranas de acetato de celulosa fueron elegidas para estos experimentos por poseer una carga superficial casi neutra que las hace, en primera instancia, más adecuadas para los usos con alta tendencia al ensuciamiento (Gerard et al, 1998), y además porque su superficie activa es lisa y tiene menor tendencia a ensuciarse (Zhu y Elimelech, 1997).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

A continuación se presentan los resultados obtenidos durante la experimentación con los tres grados de pretratamiento dados al agua residual antes de su entrada en las membranas de ósmosis inversa. Los resultados se presentan atendiendo a la disposición modular de la planta según el orden de tratamiento seguido por el agua regenerada: módulo de decantación, módulo de filtración y módulo de ósmosis inversa.

TRATAMIENTO INTENSO.

Módulo de decantación.

Durante el periodo de funcionamiento con tratamiento intenso se probaron distintas concentraciones de cloruro férrico (15, 20 y 25 miligramos/L), y distintos valores de pH, que oscilaron entre: 10,2 y 12,1 unidades.

De forma general se observó una relación directa entre la eliminación de coloides y el aumento de cal añadida debido al efecto de atrapamiento o "enmeshment" de los coloides que se produce al aumentar el pH, lo que provoca una notable reducción de la turbidez en el agua. No obstante, trabajar con valores de pH muy altos implica un mayor consumo de cal y un aumento de iones calcio, así como una nula eliminación de los bicarbonatos; además, supone un aumento considerable en el consumo de ácido clorhídrico antes de su entrada en la unidad de ósmosis inversa. El menor consumo de ácido se consigue trabajando a $\text{pH} = 10,5$.

En los ensayos con 15 mg/L de cloruro férrico y con altos valores de pH (10,9-12,1) aunque se obtiene una alta eliminación de sólidos en suspensión, tienen el inconveniente de aumentar la concentración de calcio en el sistema. Esto supone un gran inconveniente dada la naturaleza de esta agua, pues puede producirse la precipitación del calcio con la materia orgánica sobre las membranas de la unidad de ósmosis inversa, ya que se promueve la desestabilización de ésta al transformarla en materia orgánica más hidrofóbica y por ello menos estable en solución. Wiessner y Chellam (1999) han observado que este efecto tiene lugar preferentemente en aguas duras frente a aguas blandas incluso con el mismo valor de SDI en ambos casos. Por ello, valores menores de calcio en solución conducen a un mejor funcionamiento de las membranas. Además, al no producir una buena descarbonatación, el consumo de ácido clorhídrico por parte de los bicarbonatos del agua, en el acondicionamiento previo a la unidad de ósmosis inversa, es elevado. El uso de altos valores de pH conduce a un aumento de la conductividad del agua de aporte, lo que repercute en la del efluente final, incrementándola. Los valores de SDI registrados en el agua a la salida del decantador oscilaron entre 4,0 y 6,2.

Los ensayos con 20 mg/L de cloruro férrico y valores de pH más bajos y comprendidos entre 10,5 y 11,1, aunque mejoran los rendimientos de eliminación de calcio, conductividad y bicarbonatos,

producen una menor eliminación de sólidos en suspensión, por lo que los valores de SDI registrados en el agua a la salida del decantador empeoraron un poco (oscilando entre 5,0 y 6,7). Asimismo, el consumo de ácido clorhídrico, por parte de los bicarbonatos aun presentes en el agua, es algo inferior al experimento anterior.

En los ensayos con 25 mg/L de cloruro férrico y valores de pH comprendidos entre 10,2 y 11,9 los mejores resultados en la eliminación de conductividad, calcio, y de descarbonatación se producen cuando se trabajó con pH próximos a 10,5. El consumo de ácido clorhídrico en estas condiciones es aun menor que en el caso anterior, por producirse una mayor descarbonatación. Los valores de SDI fueron buenos, oscilando entre 3,6 y 6,3.

Módulo de filtración.

La buena eliminación de sólidos en suspensión conseguida en el efluente clarificado permitió que los filtros de arena funcionaran correctamente y que apenas se atascaran, obteniéndose en algunos casos ciclos de funcionamiento de hasta once días. Del mismo modo, los filtros de seguridad colocados antes de la ósmosis inversa funcionaron correctamente y sin ningún tipo de problemas, por lo que no tuvieron que ser repuestos en ningún caso. Los valores de SDI alcanzaron valores muy bajos en todos los experimentos, oscilando entre 0,1 y 1,5.

Módulo de ósmosis inversa.

Las membranas de ósmosis inversa tuvieron un buen comportamiento durante todo el experimento, como consecuencia del buen pretratamiento efectuado. No se observó en ningún momento pérdida de caudal, como reflejó el caudal normalizado, ni se produjo aumento en la pérdida de carga en la unidad, lo cual hace suponer que no se ha producido ensuciamiento relevante dentro de los elementos de membranas.

Calidad del agua obtenida.

Para cada una de las distintas condiciones ensayadas y al objeto de caracterizar la eficacia del tratamiento estudiado, se efectuó una analítica al agua de aporte y al agua destinada a la inyección en el acuífero. A través de esta analítica fue posible determinar el rendimiento de la planta en las condiciones de operación. Los mejores resultados se obtuvieron empleando 25 mg/L de cloruro férrico, un pH de 10,5, 0,5 mg/L de floculante aniónico (Pasafloc) y 8 mg/L de hipoclorito sódico.

Los parámetros determinados en el agua se presentan en la Tabla I y en ella se puede apreciar cómo el agua producto presenta una elevada calidad que la hace que sea perfectamente reutilizable para un gran número de aplicaciones. Así, cabe destacar la ausencia de microorganismos en el efluente, lo que permite el empleo seguro por parte de los usuarios, incluso el riego de vegetales que se consumen crudos. El bajo contenido salino de este agua la hace muy útil para numerosos usos en los que la presencia de sales pueda afectar negativamente a la aplicación deseada. Los bajos valores en la conductividad alcanzados eliminan los problemas de toxicidad iónica específica habituales con el empleo de aguas regeneradas no desaladas. Los valores de materia orgánica encontrados en el efluente son asimismo especialmente bajos. Dado el origen doméstico de las aguas residuales la posible presencia de contaminantes especialmente peligrosos queda minimizada en parte, aunque siempre existe. No obstante, la elevada capacidad de rechazo de las membranas supone una auténtica barrera al paso de éstos. Respecto a los nutrientes, las bajas concentraciones que aparecen en el efluente para su inyección directa, garantizan que no se van a producir fenómenos de contaminación por la adición de nutrientes.

TRATAMIENTO MODERADO.

El empleo de la cal tiene un efecto beneficioso en el tratamiento físico-químico, debido a que estabiliza los fangos de hidróxido férrico y se separan los coloides y sólidos en suspensión presentes en el agua de aporte de forma más eficiente. Esta segunda fase del trabajo experimental tuvo como objetivo estudiar el funcionamiento de la instalación sin añadir la cal en la unidad de decantación y comprobar la repercusión que ello tiene sobre las demás unidades, especialmente en la unidad de ósmosis inversa. Además, y en principio, al añadir un reactivo químico menos, se espera que produzca un cierto abaratamiento en los costes de operación. Las concentraciones de cloruro férrico empleadas fueron de 50, 25 y 20 mg/L, ya que tenían que ser algo superiores a las del anterior tratamiento intenso para compensar la ausencia de la cal.

Módulo de decantación.

En el ensayo con 50 mg/L de cloruro férrico, aunque se conseguía una alta reducción de la turbidez, no se pudieron determinar los valores de SDI pues se producía el atascamiento de los filtros,

Tabla I. Análítica realizada al agua de aporte y al agua producto de inyección al acuífero.

PARÁMETRO	AGUA DE APORTE	AGUA PRODUCTO
pH	8,03	6,98
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1.507	66
D.Q.O. ($\text{mg O}_2/\text{L}$)	34	4
D.B.O. ₅ ($\text{mg O}_2/\text{L}$)	16	-
S.S. (mg/L)	22	0
Turbidez (U.N.T.)	1,7	0,35
Sulfatos (mg/L)	127	5,1
Nitratos ($\text{mg NO}_3^-/\text{L}$)	135	18
Cloruros (mg/L)	226	9
Fosfatos ($\text{mg PO}_4^{3-}/\text{L}$)	6	0,03
Nitritos ($\text{mg NO}_2^-/\text{L}$)	0,22	<0,02
Alcalinidad ($\text{mg Ca}(\text{HCO}_3)_2/\text{L}$)	330	20
Calcio (mg/L)	109	4
Magnesio (mg/L)	39	1
Coliformes Totales UFC/100 mL	$10 \cdot 10^6$	No detectado
Coliformes Fecales UFC/100 mL	$1,5 \cdot 10^6$	No detectado
Aerobios (22°C) UFC/mL	$3 \cdot 10^5$	No detectado

lo que implica alcanzar el valor límite de 6,7. También los valores de conductividad del agua clarificada superaron a los del agua bruta, y como consecuencia de ello, el funcionamiento de esta unidad, en las condiciones ensayadas, no fue el más adecuado. Los ensayos con 25 mg/L, de forma análoga a los anteriores, produjeron una alta eliminación de turbidez, sin embargo, los valores obtenidos de SDI alcanzaron siempre el máximo valor, lo que indica el alto contenido de sólidos y coloides del agua resultante con este tratamiento. Los valores de conductividad fueron superiores a los del agua bruta dado que no se realizaron procesos de descarbonatación y que se están añadiendo reactivos químicos.

El ensayo con 20 mg/L de cloruro férrico, al igual que los otros dos experimentos, presenta una elevada eliminación de turbidez, mostrando a la vez valores de SDI muy altos, lo que indica la existencia de un alto contenido de sólidos en suspensión en el agua clarificada. La conductividad de ésta, por su parte, no sufre el aumento experimentado en los anteriores ensayos, debido a la menor concentración de cloruro férrico empleada. Durante dos días se llevaron a cabo estudios empleando 10 mg/L de cloruro férrico y manteniendo el resto de condiciones pero que no dieron ningún resultado positivo.

Módulo de filtración.

El comportamiento de los filtros de arena y seguridad han estado influenciados por el del decantador. Al no existir una buena estabilización del manto de fangos, se produce una mayor fuga de sólidos en suspensión que ingresan en los filtros de arena. Debido a ello, los ciclos de trabajo han sido más cortos que los del tratamiento intenso y, además, la calidad del agua ha sido inferior, como así lo han demostrado los altos valores de SDI registrados: 6,7. Por este motivo fue necesario sustituir en diversas ocasiones los filtros de seguridad, lo que redundó en mayores costos de operación.

Módulo de ósmosis inversa.

El funcionamiento de la unidad de ósmosis inversa ha sido adecuado en líneas generales, no observándose reducciones significativas de caudal, ni pérdidas de calidad de rechazo de las membranas. Sin embargo ha presentado un aumento importante en la diferencia de presión, lo que indica algún tipo de ensuciamiento en las membranas. Este aumento de pérdida de carga puede suponer, pasado cierto tiempo de operación, que se creen las condiciones para que se reduzcan el caudal de agua producto y el rechazo de sales, lo que disminuye los rendimientos de la unidad.

Tabla II. Analítica realizada al agua de aporte y al agua producto de inyección al acuífero.

PARÁMETRO	AGUA DE APORTE	AGUA PRODUCTO
pH	8,41	7,03
Conductividad (µS/cm)	1.652	76
D.Q.O. (mg O ₂ /L)	29	5
D.B.O. ₅ (mg O ₂ /L)	14	-
S.S. (mg/L)	25	0
Turbidez (U.N.T.)	3,1	0,35
Sulfatos (mg/L)	231	8,3
Nitratos (mg NO ₃ ⁻ /L)	95	14
Cloruros (mg/L)	203	10
Fosfatos (mg PO ₄ ³⁻ /L)	7,5	0,03
Nitritos (mg NO ₂ ⁻ /L)	0,25	<0,02
Alcalinidad (mg Ca(HCO ₃) ₂ /L)	467	31
Calcio (mg/L)	118	6
Magnesio (mg/L)	27	1
Coliformes Totales UFC/100 mL	7,3*10 ⁴	No detectado
Coliformes Fecales UFC/100 mL	9,9*10 ³	No detectado
Aerobios (22°C) UFC/mL	1,1*10 ⁵	No detectado

Además, el color rojizo detectado en los filtros de seguridad cuando eran sustituidos indicaban que había compuestos de hierro en disolución y que pueden estar depositándose sobre las membranas, ya que éstas poseen una cierta carga eléctrica negativa que los atrae (Zhu y Elimelech, 1997). El aumento de la pérdida de carga puede ser debido al desarrollo de una película que crea una mayor resistencia al flujo del agua, y que puede ser aprovechada por los microorganismos para colonizar dentro de ella. No obstante, tampoco se puede descartar que debido a una menor conversión, aumenta el caudal de entrada y por ello la diferencia de presión en la unidad.

Calidad del agua obtenida.

Como en el caso anterior, después de cada ensayo se realizaba el correspondiente análisis del agua producto. Los mejores resultados se obtuvieron empleando 20 mg/L de cloruro férrico, 0,5 mg/L de floculante aniónico (Pasafloc) y 8 mg/L de hipoclorito sódico. En la Tabla II se presentan los resultados obtenidos. La calidad del agua permeada como se observa es similar a la obtenida en los anteriores experimentos y de elevada calidad, lo que permite su reutilización.

TRATAMIENTO MÍNIMO CON UNA ETAPA.

En estos ensayos no se emplearon reactivos coagulantes ni floculantes. El tratamiento aplicado consistió en la decantación lamelar, desinfección con hipoclorito sódico y rayos ultravioletas, filtración sobre sílex y microfiltración de seguridad antes de entrar en la ósmosis inversa.

Dado el peligro de ensuciamiento que para las membranas conlleva el no usar reactivos químicos que eliminen la materia coloidal, cabe esperar un rápido ensuciamiento de éstas, por lo que en un primer momento se trabajó en unas condiciones en las que el daño que se les pudiera causar a las membranas fuera el mínimo posible. Así, se trabajó en una sola etapa con una configuración de siete tubos en paralelo y una conversión aproximada del 55 %. Los resultados obtenidos en esta fase se presentan igual que en anteriores experimentos por módulos.

Módulo de decantación.

Al no realizarse tratamiento físico-químico, los valores de turbidez y SDI registrados en el efluente del decantador han alcanzado su valor máximo.

Tabla III. Analítica realizada al agua de aporte y al agua producto de inyección al acuífero.

PARÁMETRO	AGUA DE APORTE	AGUA PRODUCTO
pH	7,86	6,96
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	2.250	117
D.Q.O. ($\text{mg O}_2/\text{L}$)	43	8
D.B.O. ₅ ($\text{mg O}_2/\text{L}$)	35	-
S.S. (mg/L)	60	0
Turbidez (U.N.T.)	3,6	0,32
Sulfatos (mg/L)	152	6,0
Nitratos ($\text{mg NO}_3^-/\text{L}$)	164	22
Cloruros (mg/L)	703	28
Fosfatos ($\text{mg PO}_4^{3-}/\text{L}$)	8	0,05
Nitritos ($\text{mg NO}_2^-/\text{L}$)	0,21	<0,02
Alcalinidad ($\text{mg Ca}(\text{HCO}_3)_2/\text{L}$)	528	33
Calcio (mg/L)	144	7
Magnesio (mg/L)	15	1
Coliformes Totales UFC/100 mL	$1,3 \cdot 10^6$	No detectado
Coliformes Fecales UFC/100 mL	$1,2 \cdot 10^5$	No detectado
Aerobios (22°C) UFC/mL	$8,6 \cdot 10^6$	No detectado

Módulo de filtración.

Aunque se produce una cierta reducción de la turbidez en los filtros de arena, los valores registrados de SDI también alcanzaron el máximo valor, lo que indica que no se produce una completa eliminación de sólidos en suspensión. Por su parte, los filtros de seguridad tuvieron que ser sustituidos en una ocasión (4 unidades); aún así, no fue posible reducir el valor de SDI del agua que ingresa en la unidad de ósmosis inversa.

Módulo de ósmosis inversa.

En este ensayo pudo constatar una ligera tendencia descendente en el caudal de permeado, a pesar del aumento que sufrió la temperatura. Si ésta no hubiese aumentado, el descenso, probablemente, hubiese sido algo mayor. No obstante, el rechazo salino estuvo en un buen valor, cercano al 96 %.

Calidad del agua obtenida.

Tras la finalización del estudio se realizó una analítica, con objeto de contrastar los rendimientos del funcionamiento de la planta piloto experimental.

La toma de muestras se realizó tras 192 horas de funcionamiento en estas condiciones. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla III. Conviene destacar que la calidad del agua de aporte presenta peores características que en los experimentos anteriores. En cuanto a las características del agua producto es de resaltar de nuevo la calidad de ésta, consiguiéndose de nuevo la ausencia de microorganismos patógenos y de sólidos en suspensión, así como una baja presencia de sales y de materia orgánica. Estas características hacen que el agua pueda ser empleada sin restricciones en cualquier tipo de uso, a pesar del mínimo pretratamiento desarrollado.

TRATAMIENTO MÍNIMO CON DOS ETAPAS.

Una vez comprobado que las membranas no han sufrido daños irreversibles se procedería a trabajar con porcentajes mas altos de conversión (75%) empleando para ello dos etapas.

Tabla IV. Analítica realizada al agua de aporte y al agua producto de inyección al acuífero.

PARÁMETRO	AGUA DE APORTE	AGUA PRODUCTO
pH	7,67	6,96
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	2.010	83
D.Q.O. ($\text{mg O}_2/\text{L}$)	66	6
D.B.O. ₅ ($\text{mg O}_2/\text{L}$)	35	-
S.S. (mg/L)	23	0
Turbidez (U.N.T.)	6	0,32
Sulfatos (mg/L)	193	7,6
Nitratos ($\text{mg NO}_3^-/\text{L}$)	390	24
Cloruros (mg/L)	550	22
Fosfatos ($\text{mg PO}_4^{3-}/\text{L}$)	12,0	0,3
Nitritos ($\text{mg NO}_2^-/\text{L}$)	0,68	<0,02
Alcalinidad ($\text{mg Ca}(\text{HCO}_3)_2/\text{L}$)	557	50
Calcio (mg/L)	152	7
Magnesio (mg/L)	59	3
Coliformes Totales UFC/100 mL	$4,5 \cdot 10^5$	No detectado
Coliformes Fecales UFC/100 mL	$6,2 \cdot 10^4$	No detectado
Aerobios (22°C) UFC/mL	$1,9 \cdot 10^6$	No detectado

INFLUENCIA DE LA ADVECCIÓN DE CALOR INFLUENCIA DEL NIVEL DE PRETRATAMIENTO DE UN EFLUENTE SECUNDARIO SOBRE ...

Tabla V. Propuesta de criterios físico-químicos y biológicos mínimos obligatorios de calidad a conseguir en el agua residual depurada a reutilizar.

Uso del agua residual regenerada		Criterios de Calidad				
		Biológica		Físico-química		
		Huevos de Nemátodos intestinales	Escheríchia coli	Sólidos en suspensión	Turbidez	Otros criterios
1	Usos domiciliarios: riego de jardines privados, descarga de aparatos sanitarios, sistemas de calefacción y refrigeración de aire domésticos, y lavado de vehículos.	< 1 huevo/10 L	0 ufc/100 mL	< 10 mg/L	< 2 NTU	
2	Usos y Servicios urbanos: Riego de zonas verdes de acceso público (campos deportivos, campos de golf, parques públicos, etc.); baldeo de calles; sistemas contra incendios; fuentes y láminas ornamentales.	< 1 huevo/L	< 200 ufc/100 mL	< 20 mg/L	< 5 NTU	
3	Cultivos de invernadero	< 1 huevo/L	< 200 ufc/100 mL	< 20 mg/L	< 5 NTU	Legionella Pneumophila 0 ufc/100mL
4	Riego de cultivos para consumo en crudo. Frutales regados por aspersión	< 1 huevo/L	< 200 ufc/100 mL	< 20 mg/L	< 5 NTU	
5	Riego de pastos para consumo de animales productores de leche o carne.	< 1 huevo/L	< 1.000 ufc/100 mL	< 35 mg/L	No se fija límite	Taenia Saginata y Solium < 1 huevo/L
6	Riego de cultivos destinados a industrias conserveras y productos que no se consuman crudos. Riego de frutales excepto por aspersión	< 1 huevo/L	< 1.000 ufc/100 mL	< 35 mg/L	No se fija límite	
7	Riego de cultivos industriales, viveros, forrajes ensaladas, cereales y semillas oleaginosas.	< 1 huevo/L	<10.000ufc/100 mL	< 35 mg/L	No se fija límite	
8	Riego de bosques, industria maderera, zonas verdes y de otro tipo no accesibles al público.	< 1 huevo/L	No se fija límite	< 35 mg/L	No se fija límite	
9	Refrigeración Industrial, excepto industria alimentarla.	No se fija límite	<10.000ufc/100 mL	< 35 mg/L	No se fija límite	Legionella Pneumophila 0 ufc/100 mL
10	Estanques, masas de agua y caudales circulantes, de uso recreativo en las que está permitido el contacto del público	< 1 huevo/L	< 200 ufc/100 mL	< 35 mg/L	No se fija límite	
11	Estanques, masas de agua y caudales circulantes, de uso recreativo en las que está impedido el contacto del público con el agua.	No se fija límite	No se fija límite	< 35 mg/L	No se fija límite	
12	Acuicultura (Biomasa Vegetal o Animal)	< 1 huevo/L	< 1.000 ufc/100 mL	< 35 mg/L	No se fija límite	
13	Recarga de acuíferos por percolación localizada a través del terreno	< 1 huevo/L	<1.000 ufc/100 mL	< 35 mg/L	No se fija límite	Nitrógeno Total < 50 mg/L
14	Recarga de acuíferos por inyección directa	< 1 huevo/10 L	0 ufc/100 mL	< 10 mg/L	< 2 NTU	Nitrógeno Total < 15 mg/L

Módulo de decantación.

Al no haberse realizado tratamiento físico-químico, los valores de SDI y de turbidez registrados en el efluente del decantador han alcanzado su valor máximo.

Módulo de filtración.

Los filtros de sílex consiguen una cierta eliminación de turbidez, pero los valores registrados de SDI alcanzan el valor máximo, lo que indica que no se produce eliminación de sólidos en suspensión. Por su parte en los filtros de seguridad aunque se sustituyeron en dos ocasiones, no consiguieron reducir el valor de SDI del agua que ingresaba en la unidad de ósmosis inversa.

Módulo de ósmosis inversa.

Aunque existe un cierto ensuciamiento y se registra una reducción de caudal de agua producto, los valores de rechazo de sales alcanzados indican que el ensuciamiento producido no tiene una influencia apreciable en el adecuado funcionamiento de las membranas.

Calidad del agua obtenida.

Después de finalizado el estudio en dos etapas en la unidad de ósmosis inversa, se realizó una analítica cuyos resultados se muestran en la Tabla IV. La toma de muestras se realizó tras 200 horas de funcionamiento. Las condiciones empleadas durante el experimento fueron iguales al anterior de una etapa. Las características del agua obtenida, a pesar del casi nulo pretratamiento dado al agua, vuelven a ser buenas, lo que permite que pueda ser reutilizada con total garantía y sin restricciones de uso.

A efectos de comparación con las anteriores tablas, se presenta en la Tabla V los principales usos y criterios recogidos en el Borrador de Real Decreto de calidades mínimas para la reutilización de efluentes depurados que está desarrollando el Ministerio de Medio Ambiente y que ya han sido aplicados en algunos casos (BOE, nº 102, de lunes, veintinueve de abril de 2002). Como puede apreciarse la calidad conseguida en el efluente, con las tecnologías aplicadas en la planta experimental de Chiclana de la Frontera, supera ampliamente los requisitos establecidos en este borrador de calidades mínimas, incluso en el caso del uso más restrictivo que hay: el de la recarga directa de acuíferos.

ESTUDIO ECONÓMICO COMPARATIVO DE LOS TRES TIPOS DE PRETRATAMIENTO EMPLEADOS.

En la Tabla VI se presentan los costes económicos que supusieron los diversos tratamientos realizados. Se incluyen los costes relativos al consumo energético, consumo de fungibles y reactivos, y no los relativos a amortización y personal. Del análisis de la Tabla VI se comprueba que el tratamiento que sale más rentable económicamente practicar es el denominado tratamiento intenso debido a:

1. Los procesos de coagulación-floculación-sedimentación a alto pH eliminan una gran cantidad de sólidos en suspensión, como demuestran los bajos valores de SDI justo antes de los filtros de cartuchos lo que implica que éstos apenas se colmaten y puedan ser usados durante un largo periodo de tiempo. Su reposición encarece de forma importante el proceso como se refleja en los costes pertenecientes a los otros dos tratamientos.
- 2.-El empleo de la cal en las condiciones consideradas como óptimas (pH=10,5 y 25 mg/L de cloruro férrico) supone una eliminación importante de bicarbonatos del agua lo que reduce el consumo de ácido clorhídrico y con ello se compensa el gasto de cal.

Así pues, los datos procedentes de estas estimaciones económicas aconsejan emplear las condiciones del tratamiento intenso, en detrimento de los que emplean menos reactivos. Esta ventaja económica tiene además una importante repercusión desde el punto de vista de la seguridad del proceso de regeneración de las aguas residuales: el uso de la cal mejora la eliminación de sólidos en suspensión, materia coloidal, bacterias y virus durante el proceso de coagulación, lo que permite a las membranas de ósmosis inversa trabajar en mejores condiciones y garantizar el funcionamiento correcto de éstas. Ello transfiere garantía de seguridad al uso de la ósmosis inversa en cualquier proyecto de regeneración de aguas residuales. Los costes económicos obtenidos son algo superiores a los pocos datos disponibles que se recogen en la bibliografía para experiencias realizadas en España, no obstante es preciso destacar la elevada calidad del agua obtenida tras el paso por la ósmosis inversa. Así, en el caso de reutilización de aguas residuales de Vitoria-Gasteiz el coste total es de 9,45 pts/m³, a pie de planta para un caudal de 35.000 m³/día,

INFLUENCIA DE LA ADVECCIÓN DE CALOR INFLUENCIA DEL NIVEL DE PRETRATAMIENTO DE UN EFLUENTE SECUNDARIO SOBRE ...

tras seguir un tratamiento Title 22 (California Administrative Code, 1978) consistente en coagulación-floculación-sedimentación-filtración-cloración, este precio incluye además de los costes que incluye la Tabla VI, los costes de personal y amortización de las instalaciones (López et al, 1998). En el caso del Consorcio de la Costa Brava y el promotor del campo de golf de Platja d'Aro el precio es de 10 pts/m³, para un caudal de 2.400 m³/día, en el que se incluye un seguimiento de calidad sanitaria y agronómica del agua (Mujeriego, 2000). Los tratamientos aplicados son la radiación UV y cloro. Estos precios hacen que el agua regenerada sea en la actualidad un recurso no convencional competitivo.

CONCLUSIONES.

A la vista de los resultados experimentales obtenidos y de la discusiones realizadas pueden extraerse las siguientes conclusiones:

1. Los ensayos de laboratorio de "jar tests" se han mostrado como herramientas útiles para la obtención de las concentraciones previas de los reactivos que posteriormente se han optimizado en planta.
2. La adición de cal tiene una alta influencia sobre la reducción del contenido de sólidos en suspensión de un agua, no obstante valores muy altos de pH impiden la decarbonatación conduciendo a un alto consumo de ácido clorhídrico para bajar el pH a las condiciones requeridas por las membranas. La concentración de calcio también aumenta de forma importante al hacerlo el pH.



Figura 1. Vista general de la instalación.

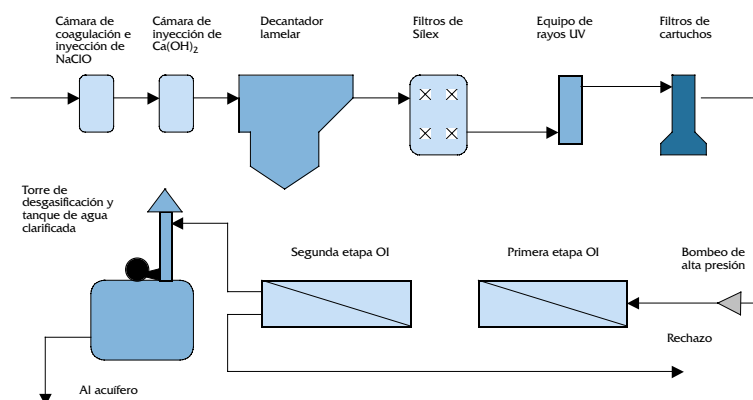


Figura 2. Diagrama de flujo de las secuencias de tratamiento empleadas.

Tabla VI. Costes relativos al gasto de regeneración del efluente secundario según el tipo de tratamiento aplicado y los conceptos mostrados:

	Tratamiento intenso		Tratamiento moderado		Tratamiento mínimo	
	Dosis (mg/L)	Coste unitario (pts/m ³)	Dosis (mg/L)	Coste unitario (pts/m ³)	Dosis (mg/L)	Coste unitario (pts/m ³)
COSTES DE REACTIVOS						
Hipoclorito sódico	8	1,12	8	1,12	14	3,07
Cloruro férrico	25	1,50	20	1,20	---	---
Hidróxido cálcico	300	3,26	---	---	---	---
Floculante	0,5	0,42	0,5	0,4	---	---
Ácido clorhídrico	51	3,63	98	7,01	98	9,5
Bisulfito sódico	1	0,28	1	0,28	1	0,38
Anti-incrustante	2	1,32	2	1,32	---	---
Hidróxido cálcico	2	0,10	2	0,10	2	0,17
Total pts/metro cúbico agua producto		11,63		11,45		13,12
COSTES ENERGÉTICOS						
Kwh/metro cúbico producto		0,45		0,43		0,34
Total pts/metro cúbico agua producto		4,95		4,80		3,82
COSTES DE FUNGIBLES (cartuchos de seguridad)						
Total pts/metro cúbico agua producto		0,0		21,33		20,33
Coste total pts/metro cúbico agua producto		16,58		37,58		37,27
Coste total euros/metro cúbico agua producto		0,10		0,23		0,22

3. El funcionamiento de las membranas de acetato de celulosa en la unidad de ósmosis inversa ha sido adecuado en cuanto a capacidad de rechazo de sales y resistencia al ensuciamiento. Sin embargo, los parámetros de operación, caudales y pérdida de carga, se ven influenciados por el grado de tratamiento previo de las aguas.
4. La calidad de las aguas regeneradas, como lo demuestran los parámetros físico-químicos y microbiológicos realizados a las mismas, es elevada independientemente del tratamiento realizado. Ello permite su utilización en un amplio campo de actividades: recarga de acuíferos, riego agrícola, riego ornamental y uso industrial.
5. Tanto desde el punto de vista económico, como de seguridad del proceso de regeneración, resulta más favorable trabajar con el tratamiento intenso que con los otros tratamientos.
6. Las condiciones de pretratamiento químico declaradas como óptimas fueron las siguientes:
 - pH=10,5.
 - Concentración de cloruro férrico: 25 mg/L.
 - Concentración de hipoclorito sódico: 8 mg/L.
 - Concentración de polielectrolito (PASAFLOC, de carga aniónica): 0,5 mg/L.

AGRADECIMIENTOS.

Queremos agradecer la participación de la empresa Proyectos, Acondicionamiento y Servicios del Agua, S. A. del Grupo PRIDESA, y especialmente la colaboración de Santiago Sahuquillo.

REFERENCIAS.

- APHA, AWWA, WPCF, (1992) Standard methods for examination of water and wastewater, 18th ed. American Public Health Association, Washington, DC.
- Asano, T.; Richard, D.; Crites, R. W.; Tchobanoglous, G. (1991). Evolution of Tertiary Treatment Requirements in California. *Wat. Environ. and Tech.* 4, 2.
- Asano T.; Levine. A. (1995). Wastewater reuse: a valuable link in water resources management. *Water Quality International*, 4, 20-24.
- Bouwer, H. (1996). Issues in artificial recharge. *Water Science and Technology*. 33, 10-11, 381-390.
- California Administrative Code, (1978). Title 22, Division 4, Environmental Health-Wastewater Reclamation Criteria. State of California, Department of Health Services, Berkeley, California.
- Elimelech, M.; Zhu, X.; Childress, A.; Hong, S. (1997). Role of membrane surface morphology in colloidal fouling of cellulose acetate and composite polyamide reverse osmosis membranes. *Journal of Membrane Science* 127, 101-109.
- Gerard, R.; Hashisuka, H.; Hirose, M. (1998). New membrane developments expanding the horizon for the application of reverse osmosis technology. *Desalination*. 119, 47-55.
- Ghayeni, S.; Beatson, P.; Schneider, R.; Fane, A. (1998). Adhesion of wastewater bacteria to reverse osmosis membranes. *Journal of Membrane Science* 138, 29-42).
- López, J.; De Juana, I.; Del Río, F. (1998). La reutilización integral de las aguas residuales urbanas en Vitoria-Gasteiz (España). *Ingeniería Civil*. 110. 211-222.
- Mujeriego, R. (2000). Regeneración de aguas residuales: avances tecnológicos. *Química e Industria*. Febrero 2000. 98-104.
- Wiessner, M. and Chellam, S. (1999). The promise of membrane technology. *Environmental Science and Technology*. 33, 17, 360A-366A.
- Zhu, X. and Elimelech, M. (1997). Colloidal fouling of reverse osmosis membranes: measurements and fouling mechanisms. *Environmental Science and Technology*. 31, 3654-3662.