



**Departamento de Ingeniería
Química y Tecnologías
del Medio Ambiente**
Universidad Zaragoza

Estudio de alternativas de reutilización de las aguas residuales de Zaragoza

Autor: M^a Rosa Pardo Pérez

Directora: M^a Peña Ormad Melero

Ingeniería Química

**CENTRO POLITÉCNICO SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA**

ABRIL 2011

ESTUDIO DE LAS ALTERNATIVAS DE REUTILIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES DE ZARAGOZA

RESUMEN

En este trabajo se ha realizado el estudio para la implantación de un sistema de regeneración y reutilización de las aguas residuales depuradas de la ciudad de Zaragoza. El punto de partida se ha establecido teniendo en cuenta los antecedentes en materia de abastecimiento y saneamiento del municipio, con el fin de aproximarse dentro de lo posible a un escenario real. De esta forma, se ha llevado a cabo el diseño del sistema de manera análoga a como se haría en una situación práctica.

El proyecto se divide en:

- optimización de la línea de tratamiento propuesta para la regeneración de las aguas residuales depuradas de Zaragoza
- dimensionamiento de la planta de regeneración
- planteamiento del sistema de reutilización de las aguas regeneradas

La línea de regeneración propuesta consiste en un tratamiento de coagulación-floculación, seguido de decantación, filtración en arena y desinfección por cloración. Se han seleccionado las condiciones óptimas para el tratamiento de coagulación-floculación-decantación (tipo y dosis de coagulante, pH de tratamiento y conveniencia del uso de polielectrolitos). A continuación, se ha llevado a cabo la filtración de los efluentes del proceso anterior, constatando la reducción de los principales parámetros indicadores de la eficacia del proceso (COT, SS y DQO). Por último, se ha sometido a las muestras filtradas a una cloración que asegure la desinfección del agua tratada.

Tras la optimización del tratamiento se ha realizado el dimensionamiento, a escala real, de las instalaciones de regeneración de las aguas residuales depuradas.

Finalmente, se ha plantado el sistema de distribución de las aguas regeneradas para su reutilización en riego de zonas verdes y para el baldeo y limpieza de calles y contenedores.

Agradecimientos

A mi padre, porque por fin lo he logrado.

A mi madre, porque siempre creyó en mí.

A mi tía Consue, por ser más madre que tía.

A mis “tatos”, Consuelito y Javi, que han cuidado tanto de su hermana pequeña.

A Mónica y el “peque”, Álvaro, que llegaron después, pero que son también parte indispensable.

A José, Mertxe y su gran familia, en la que me han acogido con tanto cariño.

A los “pequeñajos” Iraia, Oier, Maddi, Arnau, Amets, Isotz y Denis, por hacerme reír tanto.

A Peña y Luis, por su apoyo y comprensión, y por prestarme siempre cuanto ayuda estaba en su mano.

A Gau, mi peludita, que tanta compañía me proporciona.

A Xabier, por su cariño, por haberme apoyado y acompañado, compartiendo tantas cosas durante todo este tiempo.

A Iane

Índice

ÍNDICE DE LA MEMORIA

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
2. LA REUTILIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES URBANAS	3
2.1. Introducción	3
2.2. Directrices y normativas sanitarias a nivel mundial	4
2.3. Depuración y reutilización de las aguas residuales en España	5
2.3.1. Marco legislativo: punto de partida normativo	5
2.3.2. RD 1620/2007	6
2.3.3. Principales actuaciones de reutilización en España	8
2.3.4. Situación actual y perspectivas futuras de reutilización en España	8
2.4. Tratamiento para la reutilización de agua	10
2.4.1. Línea de tratamiento de una EDAR	10
2.4.2. Procesos de regeneración del agua	12
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	17
3.1. Toma y caracterización de las muestras	17
3.2. Tratamiento de coagulación-floculación-decantación (ensayo de Jar Test)	18
3.2.1. Reactivos empleados	18
3.2.2. Parámetros indicadores de la eficiencia del proceso	19
3.2.3. Resultados de los ensayos	20
3.2.4. Interpretación de los resultados del tratamiento físico-químico	23
3.3. Filtración en arena del efluente del ensayo de coagulación-floculación	25
3.3.1. Parámetros indicadores de la eficiencia del proceso	26
3.3.2. Resultados de los ensayos	26
3.3.3. Interpretación de los resultados del tratamiento de filtración	27
3.4. Cloración del efluente filtrado	29
3.4.1. Parámetros evaluados	30
3.4.2. Procedimiento experimental	30
3.4.3. Resultados e interpretación del tratamiento de cloración	30
3.5. Resumen de los resultados del tratamiento de regeneración	31
4. APLICACIÓN A LA CIUDAD DE ZARAGOZA	32

4.1. Situación actual de Zaragoza	32
4.1.1. Abastecimiento	32
4.1.2. Saneamiento	34
4.2. Aplicación del sistema de reutilización a Zaragoza	35
4.2.1. Planta de tratamiento de regeneración	36
4.2.2. Redes de distribución de agua regenerada	39
5. CONCLUSIONES	42
6. BIBLIOGRAFÍA	45

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A. NORMATIVA	50
• A.1. Criterios de calidad microbiológica recomendados por la OMS para la reutilización de las aguas residuales	51
• A.2. Directrices propuestas por la USEPA para la reutilización del agua	52
• A.3. Normativa del Estado de California	53
• A.4. Real Decreto 1620/2007, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas	54
• A.5. Concentración de cloro residual indicada para distintos usos del agua	56
• A.6. Ordenanza Municipal para la Ecoeficiencia y la Calidad de la Gestión Integral del Agua	57
ANEXO B. PRINCIPALES ACCIONES DE REUTILIZACIÓN A NIVEL NACIONAL	61
ANEXO C. PRINCIPALES CONTAMINANTES DE LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS Y PROBLEMAS DERIVADOS DE SU PRESENCIA EN EL AGUA	63
ANEXO D. PARTE EXPERIMENTAL	65
• D.1. Ensayo de Jar Test. Descripción de la instalación	66
• D.2. Reactivos empleados en el tratamiento de coagulación-floculación	67
• D.3. Parámetros indicadores de la eficiencia del tratamiento de coagulación-floculación	70
• D.4. Resultados de los ensayos de Jar Test para la optimización de la dosis de coagulante	72
• D.5. Resultados de los ensayos de Jar Test para la optimización del pH	75

• D.6. Resultados de los ensayos de Jar Test para estudiar la influencia del uso de polielectrolitos	78
• D.7. Filtración en arena del efluente de coagulación-floculación-decantación. Descripción de la instalación	81
• D.8. Parámetros indicadores de la eficiencia del proceso de filtración	83
• D.9. Resultados de los ensayos de filtración	87
• D.10. Métodos analíticos del ensayo de cloración	90
• D.11. Resultados del ensayo de cloración	93
ANEXO E. INFRAESTRUCTURAS DEL AGUA EN LA CIUDAD DE ZARAGOZA	97
• E.1. Planta potabilizadora de Casablanca y red distribución de aguas potables	98
• E.2. Estación depuradora de aguas residuales de La Almozara	101
• E.3. Estación depuradora de aguas residuales de La Cartuja	102
ANEXO F. PARQUES, JARDINES Y ZONAS VERDES DE LA CIUDAD DE ZARAGOZA	103
ANEXO G. CÁLCULO DE LAS INFRAESTRUCTURAS DE REGENERACIÓN Y REUTILIZACIÓN DE AGUAS	106
• G.1. Cálculo de las infraestructuras de regeneración	107
• G.2. Red de aguas regeneradas. Infraestructuras de reutilización	112
ANEXO H. ELEMENTOS DE CONTROL Y SEÑALIZACIÓN DEL SISTEMA DE REUTILIZACIÓN	113

Capítulo1.

Introducción y objetivos

El rápido aumento de la población mundial, con tendencia creciente a concentrarse en grandes centro urbanos, trae consigo un notable aumento en la demanda de agua para usos agrícolas, urbanos e industriales. Unido a ello, el desarrollo económico de las comunidades lleva consigo un incremento en la demanda individual de agua. Por otra parte, el cambio climático conduce a una mayor aridez y a una disminución de la disponibilidad hídrica en muchas regiones. A todo esto hay que sumar el impacto negativo que la escasez y la contaminación del agua generan sobre el medio ambiente. Para solucionar este problema es necesaria una gestión eficiente del agua que permita paliar la insuficiencia de recursos. Teniendo siempre en cuenta la importancia del ahorro de agua y el uso efectivo de los recursos, otra alternativa interesante es la reutilización de aguas residuales urbanas.

El objetivo del presente trabajo es el estudio de las distintas posibilidades técnicas de reutilización de las aguas residuales de la ciudad de Zaragoza para su aprovechamiento en usos beneficiosos, examinando las distintas opciones aplicables a la ciudad y sus alrededores.

Se plantea, por tanto, la reutilización directa o planificada mediante el aprovechamiento de los efluentes tratados (en mayor o menor grado, según la calidad requerida) en usos beneficiosos (riego, usos urbanos, usos industriales, recarga de acuíferos, etc.)

Los estudios se han realizado partiendo de muestras de agua de la depuradora de La Almozara, una de las depuradoras municipales de Zaragoza, a partir de las cuales se han llevado a cabo los análisis oportunos para la evaluación de los posibles usos finales del agua recuperada.

De forma más específica, los objetivos concretos que contempla este proyecto son los siguientes:

- ✓ proponer un sistema adecuado para la reutilización de las aguas de salida de las depuradoras del municipio

- ✓ emplear las aguas regeneradas como fuente alternativa de abastecimiento en usos que no requieran calidad potable, liberando así una cantidad importante de recursos hídricos para ser aprovechados en usos potables, ya que el uso de aguas regeneradas para este propósito está expresamente prohibido en la legislación española, salvo situaciones de emergencia transitorias
- ✓ reducción del consumo de agua y disminución de los vertidos de aguas residuales del municipio, al ser empleados parte de ellos en usos beneficiosos
- ✓ protección y conservación de las aguas subterráneas empleadas actualmente para el riego de parques y jardines públicos

Capítulo2.

La reutilización de las aguas residuales urbanas

2.1. INTRODUCCIÓN

La demanda de agua ha ido en aumento debido al incremento de la población mundial y al desarrollo económico. Esto ha provocado que los efluentes de las plantas depuradoras supongan una fuente extra de recursos hídricos nada desdeñable, principalmente en áreas donde el agua es un bien escaso, o en aquéllos otros donde la contaminación de las fuentes de agua empieza a ser un grave problema.

La reutilización permite mejorar la calidad de los recursos de aguas continentales, al permitir la utilización de un agua de calidad adecuada al uso, liberando aguas de calidad superior para otros usos más estrictos y preservando asimismo los recursos naturales. De hecho, el agua regenerada sólo puede ser considerada y contabilizada como un recurso alternativo cuando se resta de los caudales naturales que se vierten al medio.

A la hora de definir un proyecto de reutilización de aguas, hay que partir de dos premisas básicas:

- ✓ definir el nivel de calidad adecuado según el uso al que se destine el agua
- ✓ establecer la línea de tratamiento a aplicar

Para que la reutilización sea posible como fuente alternativa de abastecimiento y ofrezca seguridad desde el punto de vista sanitario y ambiental, es imprescindible que el agua residual se depure hasta que reúna las características de calidad apropiadas a su nuevo uso.

A pesar de sus evidentes ventajas, la reutilización va ligada al coste y disponibilidad del agua. Existe la tecnología necesaria para acondicionar la calidad del agua según el uso que se requiera, pero también hay considerar aspectos económicos, sociales, medioambientales, sanitarios y legales. Sobre todo en el ámbito económico, el uso de aguas recuperadas debe suponer un ahorro monetario, bien sea derivado del ahorro de recursos o de una menor necesidad de tratamiento de los vertidos finales, al verse reducida la carga contaminante de éstos.

No obstante, en el presente proyecto se deja en un segundo plano la cuestión económica, para resaltar los beneficios sociales y medioambientales que puede proporcionar la reutilización de aguas.

2.2. DIRECTRICES Y NORMATIVAS SANITARIAS A NIVEL MUNDIAL

Actualmente no existe una normativa unificada a nivel mundial que regule la reutilización del agua de salida de las depuradoras. Obviamente, los criterios recomendados para la reutilización deben depender del uso específico al que va a ser destinada el agua. Al ser el riego agrícola una actividad vital para la sociedad, es aquí donde se ha realizado un mayor esfuerzo hasta la fecha en la elaboración de guías para la aplicación del agua residual. Estas directrices se centran, principalmente, en aspectos relativos a la protección de la salud y del medio ambiente.

A nivel internacional, la única guía disponible son las recomendaciones de la OMS, que sólo considera criterios microbiológicos, si bien se ha comenzado a trabajar en los aspectos químicos (Bulletin of the World Health Organization, 2000).

Mucho más restrictivos son los criterios de regeneración del agua residual establecidos en el Título 22 del Código Administrativo de California de 1978 (revisado en el año 2000), que especifican un tratamiento biológico convencional de las aguas residuales seguido por un tratamiento terciario, filtración y desinfección por cloración para dar lugar a un efluente susceptible de ser utilizado para riego. Sin embargo, los nutrientes eliminados en el tratamiento terciario ya no pueden ser empleados como fertilizantes (State of California, 2000).

En la misma línea restrictiva, cabe citar las directrices elaboradas por la Agencia de Protección Medioambiental de los Estados Unidos de América (USEPA, 2004), que recomienda una calidad sanitaria del agua de riego similar a la del agua potable en aquellos usos donde no exista restricción respecto al posible contacto del agua con el público (State of California, 2001).

Los criterios establecidos por la OMS son más realistas en cuanto a su aplicación en los países menos desarrollados, ya que marcan los mínimos valores que aseguran la protección sanitaria y proponen la consecución de las calidades indicadas mediante lagunas de estabilización, método más asequible en países con pocos recursos económicos. Los criterios de California, bastante conservadores, están basados en tecnologías de tratamiento intensivas y que podrían resultar demasiado costosas para estos países, lo cual podría ser óbice para su aplicación.

La tendencia en muchos países sigue siendo la aplicación de los estándares de California, aunque las directrices marcadas por la OMS son cada vez más aceptadas. La mayor parte de los países que disponen de normas de reutilización se han basado bien en los criterios de la OMS, o bien en los estándares de California.

En la tabla 1 se comparan los criterios utilizados para reutilización en riego agrícola en distintas normativas. Las recomendaciones de la OMS, la USEPA y la normativa del Estado de California se recogen en el anexo A (A.1, A.2 y A.3).

Tabla 1. Comparación de los criterios de reutilización de aguas para riego agrícola en diferentes normativas

	OMS	California	USEPA	Francia	Israel	Sudáfrica
Parámetro (coliformes totales o fecales)	200 a 1000 UFC/100 ml según el tipo de riego y cultivo	2,2 a 23 UTC/100 ml según el tipo de cultivo	0 a 200 UFC/100 ml + cloro residual > 1 ppm	200 a 1000 UFC/100 ml	12 a 250 UFC/100 ml	0 a 1000 UFC/100 ml
Observaciones	Indica el grupo de exposición	Establece el tratamiento en función del uso	Establece el tratamiento en función del uso	Indica tipo de riego en función del cultivo	Criterios de calidad en función del cultivo	Establece el tratamiento en función del uso. Para uso humano, estándares del agua potable

Fuente: Adaptada de Guidelines for the microbiological quality of treated wastewater used in agriculture (Bulletin of the World Health Organization, 2000), The Purple Book. California Health Laws Related to Recycled Water, (State of California 2001) y Guidelines for Water Reuse (USEPA, 2004)

2.3. DEPURACIÓN Y REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES EN ESPAÑA

2.3.1. Marco legislativo: punto de partida normativo

La Directiva 91/271/CEE (modificada por la Directiva 98/15/CE) sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas ha supuesto un fuerte impulso en la construcción y mejora de las estaciones depuradoras. La transposición de ésta y otras normas comunitarias a la legislación española se halla recogida en el Plan Nacional de Saneamiento y Depuración (1995-2005) y en el Plan Nacional de Calidad de las Aguas: Saneamiento y Depuración (2007-2015) (Serrano (2007), MARM (2007)). A raíz de su aplicación, el volumen de aguas residuales urbanas depuradas ha experimentado entre los años 1996 y 2005 un incremento del 150%. En 1991, el 60% de la población estaba conectada a algún sistema de depuración. Esta cifra pasó en el año 2005 a ser el 92% (INE, 2008). Con el incremento del número y capacidad de estaciones depuradoras, aumentan las posibilidades de reutilización, ya que se puede disponer de un mayor volumen de efluentes tratados, susceptibles de ser empleados en proyectos de reutilización. No obstante, existen otras normas, tanto a nivel estatal como autonómico, en las que se hace referencia a la reutilización, en concreto:

- ✓ Reglamento de Dominio Público Hidráulico (RD 849/1986)
- ✓ Real Decreto Ley 11/1995 y Real Decreto 509/1996 (transposiciones al ordenamiento jurídico español de la DIR 91/271)

- ✓ Directiva Marco de Aguas (Directiva 2000/60/CE), transpuesta al ordenamiento español mediante el artículo 129 de la Ley 62/2003
- ✓ Ley de Aguas (texto refundido aprobado por Real Decreto Legislativo 1/2001) y su desarrollo (Reales Decretos 849/1988, 927/1988, 1315/1992, 1541/1994, 995/2000, 606/2003)
- ✓ Plan Hidrológico Nacional (Ley 10/2001)
- ✓ Ley 11/2005, por la que se modifica la Ley 10/2001 del PHN
- ✓ Normas de Reutilización en Planes Hidrológicos de Cuenca: Tajo (1999) y Guadalquivir (1999)
- ✓ Normativa específica que regula la reutilización en algunas CCAA: Andalucía, Cataluña, Baleares, Comunidad Valenciana, Islas Canarias y Región de Murcia (MARM, 2009)
- ✓ Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de aguas depuradas

2.3.2. RD 1620/2007

Este Real Decreto da cumplimiento a lo exigido por la Ley de Aguas de 1985 (derogada por el Real Decreto Legislativo 1/2001) y el Reglamento del Dominio Público Hidráulico de 1986 que establecían la obligación de que el Gobierno regulara las condiciones básicas para la reutilización de las aguas.

Los aspectos más destacados del texto son:

- ✓ fijar los criterios de calidad exigida al agua regenerada para cada tipo de uso
- ✓ procedimiento de vigilancia y control sanitarios de la calidad del agua regenerada
- ✓ establecer un procedimiento de solicitud de concesión y autorización de reutilización de aguas depuradas
- ✓ impulsar planes y programas de fomento de reutilización de aguas y un uso más eficiente del recurso hídrico

Hay 13 tipos de usos autorizados por el Real Decreto, divididos en 5 categorías generales, tal y como se muestra en la tabla 2. En función del uso previsto se exigen unas condiciones de calidad, lo que a su vez determina el tratamiento más adecuado en cada caso. Los criterios sanitarios establecidos para cada uno de los usos autorizados se

basan en parámetros físico-químicos y biológicos, para los que se fijan calidades mínimas (anexo A.4).

Tabla 2. Usos previstos para la reutilización del agua residual depurada

Usos	Categorías de uso
1. Uso urbano	1.1. Residencial: riego jardines privados, descarga de aparatos sanitarios 1.2. Servicios: riego zonas verdes, limpieza de calles, incendios, lavado industrial de vehículos
2. Uso agrícola	2.1. Riego de cultivos de productos comestibles en fresco para alimentación humana 2.2. Productos de consumo humano no fresco, pastos para consumo de animales, acuicultura 2.3. Cultivos leñosos, flores ornamentales, viveros, cultivos industriales no alimentarios
3. Uso industrial	3.1. Aguas de proceso y limpieza, otros usos industriales 3.2. Torres de refrigeración y condensadores evaporativos
4. Uso recreativo	4.1. Riego campos de golf 4.2. Estanques, caudales circulantes con acceso al público prohibido
5. Uso ambiental	5.1. Recarga de acuíferos por percolación 5.2. Recarga de acuíferos por inyección directa 5.3. Riego de bosques, zonas verdes no accesibles al público, silvicultura 5.4. Otros usos: mantenimiento de humedales, caudales mínimos

Fuente: Adaptado del RD 1620/2007 (BOE, 2007)

No obstante, se establece la prohibición de reutilización para ciertos usos que puedan suponer un riesgo para la salud humana o ser perjudiciales para el medioambiente:

- ✓ consumo humano, salvo situaciones de catástrofe, como ya establecía en la Ley de Aguas, en las cuales la autoridad sanitaria fijaría los niveles de calidad exigibles y los usos
- ✓ usos propios de la industria alimentaria (RD 140/2003), salvo las excepciones recogidas en el Anexo I.A.3 calidad 3.1c) del RD 1620/2007, para el uso de aguas de proceso y limpieza en la industria alimentaria
- ✓ usos en instalaciones hospitalarias y otros usos similares
- ✓ cultivo de moluscos filtradores en acuicultura
- ✓ uso recreativo como agua de baño
- ✓ uso en torres de refrigeración y condensadores evaporativos, excepto los usos recogidos en el Anexo I.A.3 calidad 3.2
- ✓ uso en fuentes y láminas ornamentales en espacios públicos o interiores de edificios públicos
- ✓ cualquier otro uso que la autoridad sanitaria o ambiental considere un riesgo para la salud de las personas o un perjuicio para el medio ambiente, cualquiera que sea el momento en el que se aprecie dicho riesgo o perjuicio

2.3.3. Principales actuaciones de reutilización en España

El consumo de agua en España se reparte de forma que el uso en riego agrícola supone alrededor del 75 %, el abastecimiento urbano un 12 % y el uso industrial ronda el 10 %. El 3% restante corresponde a servicios (Instituto nacional de Estadística, 2008).

Según datos del Libro Blanco sobre el Agua, en el año 2000 existían en España unas 125 actuaciones de reutilización directa de aguas residuales urbanas depuradas, que cubrían una demanda de unos 230 hm³/año. En el periodo 2000-2005 el volumen de agua reutilizada aumentó un 69%. Las instalaciones están ubicadas, en su mayor parte, en Baleares, Canarias, Andalucía y el litoral mediterráneo, sobre todo en las cuencas de los ríos Júcar y Segura, con gran escasez de recursos hídricos. Según datos estimados por el MARM, en 2006 se alcanzó un volumen de reutilización de 450 hm³/año. Dichas acciones de reutilización se aplican principalmente en riego agrícola (75% del consumo total), donde existen excelentes oportunidades debido a los grandes volúmenes requeridos en irrigación. El resto de los usos de aguas depuradas se reparten entre usos municipales (12%), recreativos (6%) y usos ecológicos (4%) e industriales (3,7%) (Hernández, 2009).

En los próximos años (horizonte 2015) se prevén nuevas actuaciones en estas y otras zonas, que permitirán atender una demanda de 1200 hm³/año con agua residual tratada, es decir, se triplicará la capacidad de reutilización de aguas depuradas.

En el anexo B se recogen algunas de las actuaciones de mayor importancia a nivel nacional en cuanto a reutilización de las aguas residuales.

2.3.4. Situación actual y perspectivas futuras de la reutilización en España

La reutilización de las aguas depuradas en España tiene un futuro prometedor. Es evidente que hay una tendencia creciente en el uso de efluentes depurados, potenciada por el nuevo marco legal existente:

- ✓ Plan Nacional de Calidad de las Aguas, Saneamiento y Depuración (2007-2015):
 - cumplir las exigencias de la Directiva 91/271/CEE y su transposición, continuando la labor del anterior Plan de Saneamiento y Depuración (1995-2005)
 - cumplir para el año 2015 los objetivos ambientales de la Directiva Marco del Agua (Directiva 2000/60/CE)
- ✓ Programa AGUA (Actuaciones para la Gestión y la Utilización del Agua)

- ✓ RD 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de aguas depuradas
- ✓ Plan Nacional de Reutilización (en elaboración)

Con respecto a este último punto, el Plan Nacional de Reutilización, tiene como objetivo fomentar la utilización de las aguas regeneradas como línea estratégica para el uso sostenible del agua y promover el aprovechamiento integral de los recursos. El Plan propuesto por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MARM), que se ilustra en la figura 1, prevé regenerar el 37% de las aguas depuradas, y así poder aprovechar más de 1.200 Hm³ de agua para distintos usos como el regadío de tierras de cultivo, campos de golf, la limpieza de calles, etc.

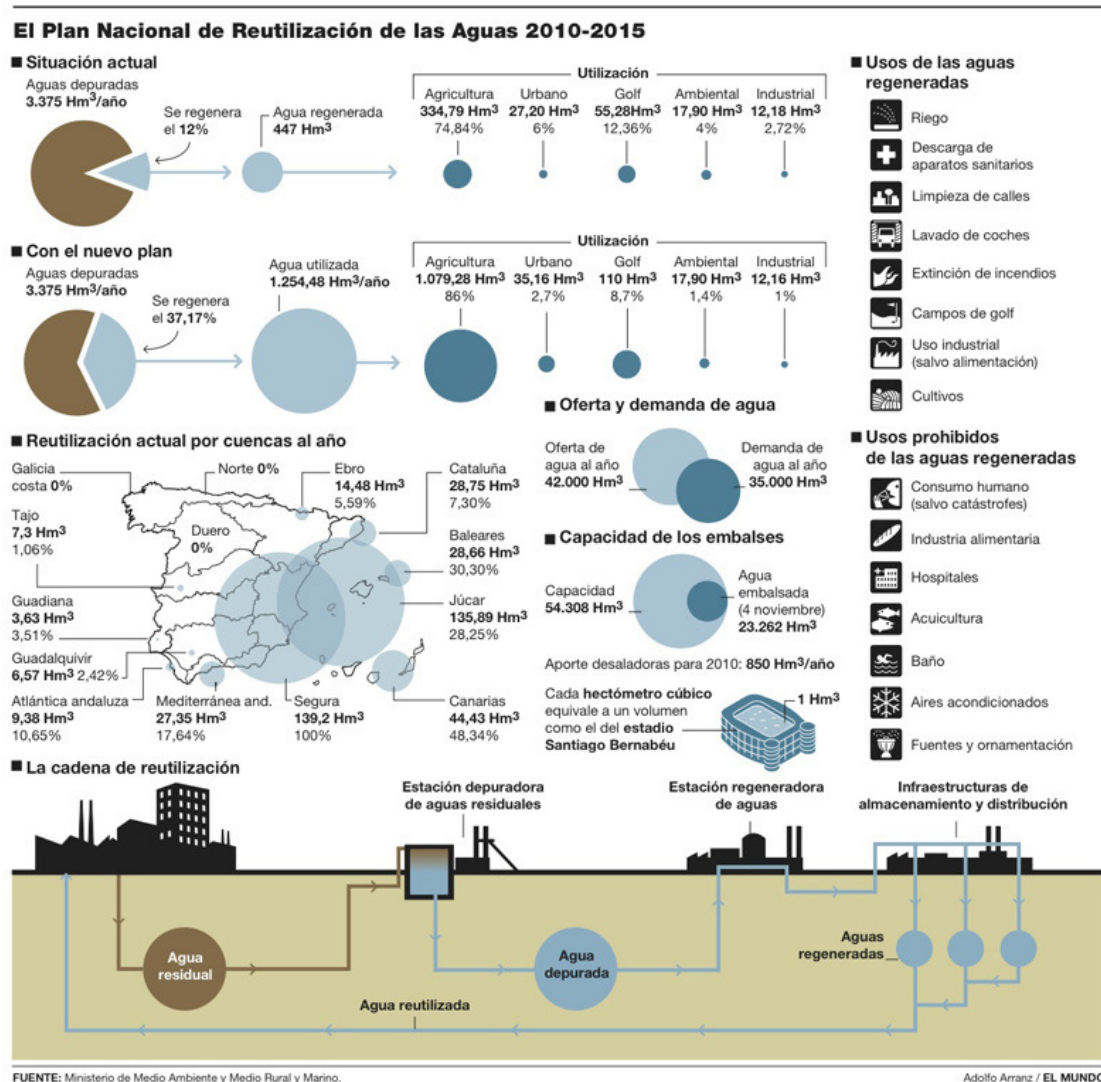


Figura 1. Plan Nacional de Reutilización de las aguas propuesto por el MARM

2.4. TRATAMIENTO PARA LA REUTILIZACIÓN DE AGUA

2.4.1. Línea de tratamiento en una EDAR

En todo sistema de reutilización se deben satisfacer los requisitos de los usuarios en cuanto a la calidad y cantidad de agua, pero es igualmente importante asegurar la protección del medio ambiente y de la salud pública, que no han de verse afectadas de manera negativa por el uso de estas aguas. El grado de tratamiento proporcionado al agua residual para su reutilización debe ser mayor cuanto más alta sea la probabilidad de exposición del público al agua recuperada.

La presencia de tóxicos químicos y microorganismos patógenos en las aguas residuales crudas supone un riesgo sanitario donde exista contacto, inhalación o ingestión de estos constituyentes. Para el control de estos efectos, se trata el agua residual de forma que el producto no contenga estas sustancias o su concentración sea mucho menor. Además, siempre que sea posible, es conveniente prevenir el contacto directo o indirecto con estas aguas.

Para la mayor parte de los usos, un tratamiento convencional es capaz de reducir la concentración de estos componentes a unos niveles aceptables, en muchos casos eliminándolos casi en su totalidad. Ciertos usos, como el uso indirecto para abastecimiento de agua potable, requieren un nivel de tratamiento avanzado, que afine lo conseguido con el tratamiento convencional.

La depuración convencional de las aguas residuales urbanas comprende una serie de procesos en los cuales se eliminan los contaminantes incorporados al agua durante su uso. La figura 2 muestra la línea de tratamiento más usual que se sigue en una estación depuradora de aguas residuales urbanas (EDAR).

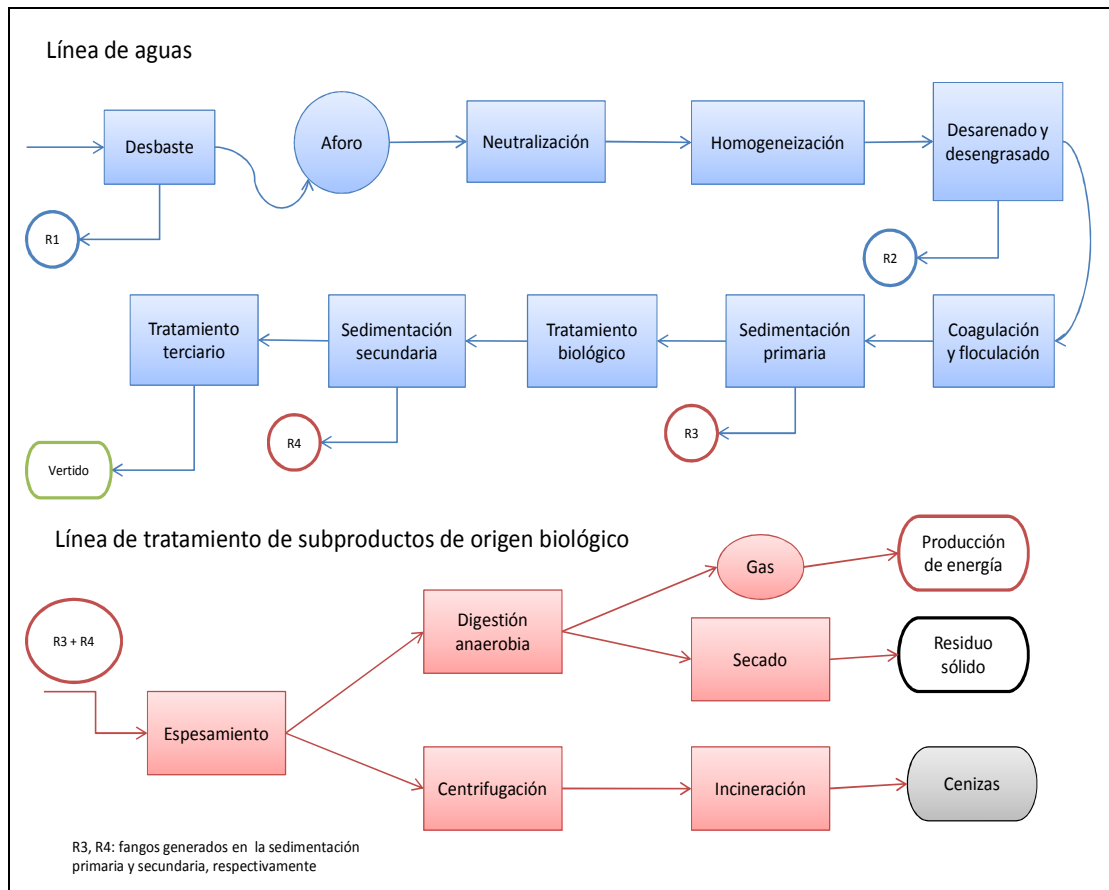


Figura 2. Esquema de la línea de tratamiento en una EDAR convencional

La clasificación más común divide los procesos de tratamiento en cuatro grandes grupos:

- ✓ pretratamiento o tratamiento previo
- ✓ tratamiento primario
- ✓ tratamiento secundario
 - procesos biológicos de alta carga: fangos activados, filtros percoladores, soportes biológicos rotativos (biodiscos o biocilindros), MBR o biorreactores de membrana
 - procesos biológicos de baja carga: lagunas aireadas, lagunas de estabilización
- ✓ tratamiento terciario o avanzado

En las aguas residuales urbanas pueden aparecer gran cantidad de sustancias que es preciso eliminar antes de su disposición final, bien sea pensando en un aprovechamiento posterior o, simplemente, para realizar el vertido a un curso natural de agua. Si se quiere reutilizar un agua residual ya tratada, generalmente hasta nivel primario o secundario, se

han de eliminar una serie de contaminantes, para lo cual se aplica un tratamiento terciario adecuado al uso posterior que se vaya a hacer de las aguas. Existen tecnologías muy diversas que permiten adaptar el sistema de depuración a las instalaciones ya existentes, la cantidad de terreno disponible, el caudal de las aguas residuales y el grado de tratamiento deseado. Así, el tratamiento avanzado del agua residual tiene como objetivo la eliminación de los sólidos suspendidos y de las sustancias disueltas que permanecen en el agua tras el tratamiento secundario. Los principales procesos aplicados en el tratamiento avanzado para reutilización de agua son:

- ✓ filtración
- ✓ nitrificación
- ✓ desnitrificación
- ✓ eliminación de fósforo
- ✓ coagulación-sedimentación
- ✓ adsorción sobre carbón activo
- ✓ procesos de membrana (ósmosis inversa (OI), nanofiltración (NF), ultrafiltración (UF), microfiltración (MF), electrodiálisis (ED), biorreactores de membrana (MBR))
- ✓ desinfección (hipoclorito, rayos UV, ozonización, membranas, tratamientos extensivos (lagunaje, infiltración percolación, ...))
- ✓ otros procesos de tratamiento avanzado para la eliminación de ciertos constituyentes (stripping de amoníaco, cloración al breakpoint, intercambio iónico selectivo para la eliminación de nitrógeno, etc.)

En el anexo C se presenta un resumen de los principales contaminantes presentes en el agua residual, así como de los posibles tratamientos de eliminación.

2.4.2. Procesos de regeneración del agua

La fase de regeneración del agua consiste fundamentalmente en la eliminación de la materia en suspensión del afluente secundario, generalmente seguida por una desinfección.

Se va a escoger la línea de tratamiento más adecuada para conseguir un efluente de la calidad deseada. Los procesos incluidos en dicha línea pueden ser distintas combinaciones de varias de las operaciones unitarias indicadas anteriormente, desde métodos convencionales muy tecnificados hasta tecnologías de tratamiento natural

sobre el terreno. No obstante, la línea a seguir depende esencialmente del contenido en sales del agua a tratar:

- ✓ si sólo es necesaria la desinfección, se implementa un tratamiento biológico (extensivo o intensivo en función del tamaño de la planta) seguido de la técnica de desinfección pertinente (cloro, UV, ozono, tratamientos extensivos, etc.)
- ✓ si es necesaria una desalación de las aguas, será preciso aplicar un tratamiento de membranas, asociadas o no a tratamiento biológico (situado tras el tratamiento secundario o formando parte del mismo (biorreactor de membranas-MBR)) y seguidas, si se considera conveniente, por un tratamiento de desinfección

En la tabla 3 se refleja la combinación de operaciones unitarias a implementar en función de la salinidad del agua de partida.

Tabla 3. Líneas de tratamiento a aplicar

DESINFECCIÓN		DESALACIÓN
Plantas de tamaño pequeño (menos de 2000 m ³ /día)	Plantas de tamaño relevante (más de 2000 m ³ /día)	<ul style="list-style-type: none"> - laminación de caudal - coagulación-floculación - decantación - filtración lenta - microfiltración (MF) o ultrafiltración (UF) - nanofiltración (NF), electrodiálisis reversible (EDR) u ósmosis inversa (OI) - desinfección con cloro - almacenamiento previo a distribución
<ul style="list-style-type: none"> - laminación de caudal - infiltración-percolación - desinfección UV y/o cloro - almacenam. previo a distribución 	<ul style="list-style-type: none"> - laminación de caudal - coagulación-floculación - decantación - filtración lenta - desinfección UV y/o cloro - almacenam. previo a distribución 	

Fuente: adaptado de Rougé (2005), Yartu (2008), Batanero (2008) y Hassani (2010)

En la mayor parte de las acciones de reutilización de las aguas residuales se emplean, por tanto, cuatro líneas básicas:

- ✓ línea físico-química tradicional: consiste en un tratamiento intensivo de coagulación, floculación y decantación y/o filtración, seguido por la desinfección del efluente. En el caso de aguas sin toxicidad y con salinidad bajas, el tratamiento puede reducirse simplemente a un filtrado seguido de desinfección. Para plantas de tratamiento terciario de pequeño tamaño (menos de 2000 m³/día) suele ser más conveniente sustituir

el tratamiento físico-químico por un tratamiento extensivo, generalmente de infiltración-percolación

✓ línea físico-química + OI/EDR: es indispensable implementar un tratamiento previo que asegure permanentemente la calidad del agua que entra al módulo de membranas. La EDR elimina sales disueltas, pero no microorganismos (es necesaria una desinfección previa y posterior); no obstante, esta técnica admite un tratamiento físico-químico convencional. Por el contrario, para la OI el pretratamiento aconsejado es una MF/UF previa

✓ línea MF/UF + OI/EDR/NF: la MF o la UF actúan como pretratamiento de la OI o la EDR, reduciendo la concentración de compuestos de alto peso molecular, el COT y la turbidez. De esta forma se alarga la vida de las membranas y se contribuye a la economía de la planta, además de obtenerse un efluente de calidad superior

✓ línea de reactores biológicos de membrana: constituyen una modificación de los procesos convencionales de tratamiento biológico, mediante la sustitución de los depósitos de sedimentación secundaria por unidades de membranas. En ellos se integra la degradación biológica aerobia con la filtración por membranas. Entre otras ventajas, el uso de membranas permite una mayor concentración de biomasa en el reactor y puede eliminar la necesidad de un proceso de desinfección posterior, dejándolo como simple precaución. Por otra parte, esa mayor concentración de biomasa permite un menor volumen en el reactor, menor producción de fangos, mejor calidad del agua de salida y elimina los problemas asociados a la decantabilidad del fango, ya que la clarificación se realiza por filtración, sin necesidad de que exista un decantador secundario

En el momento de realizar un proyecto de reutilización, los aspectos principales son:

- ✓ la calidad del agua de partida y su origen (urbana, industrial, mixta)
- ✓ la calidad del agua tratada y especialmente sus condiciones sanitarias su composición química y régimen de producción
- ✓ las garantías de suministro, almacenamiento y distribución
- ✓ las modalidades de aplicación y utilización del agua regenerada

La línea más extendida es el tratamiento recomendado por el Título 22 del Código Administrativo de California, que propone un tratamiento biológico convencional de las aguas residuales seguido por un tratamiento terciario, filtración y desinfección por cloración (State of California, 2000). Esta es la línea propuesta en el presente proyecto,

si bien en las nuevas actuaciones de reutilización es más frecuente usar la radiación UV como método de desinfección e, incluso, una combinación de cloración y rayos UV. Con este tratamiento se consiguen efluentes de gran calidad, como se desprende de los valores reflejados en la tabla 4.

Tabla 4. Calidad del efluente tras el tratamiento indicado en Título 22 del código Administrativo de California

SS (mg/)	Turbidez (NTU)	E. Coli (UFC/100ml)	Nemátodos (nº huevos/10L)	Costes de explotación (€/m ³)
< 10	< 5	< 10	Ausencia	0,10-0,20

Fuente: Ortega e Iglesias (2008)

En las zonas de Levante se utilizan mucho las líneas que incluyen filtración con membranas para la eliminación de sales. Las más extendidas son:

- ✓ filtración por membranas (UF ó MF) + Ósmosis Inversa (OI)
- ✓ físico-químico con decantación lamelar y filtración + Electrodiálisis Reversible (EDR)

Los valores normales asociados a los tratamientos con membranas son los que aparecen en la tabla 5.

Tabla 5. Valores normales de los efluentes desalados

	SS (mg/)	Turbidez (NTU)	E. Coli (UFC/100ml)	Nemátodos (nº huevos/10L)	Reducción de salinidad (%)
UF + OI	< 0,5	< 0,3	Ausencia	Ausencia	80-90
FQ + EDR	< 5	< 2	< 10	Ausencia	70-80

Fuente: Ortega e Iglesias (2008)

Las tecnologías extensivas no son muy utilizadas en España. Las más difundidas son: lagunaje, infiltración-percolación y humedales artificiales. Se usan principalmente con fines medioambientales, para riego de cultivos leñosos y como tratamiento de afino de efluentes secundarios. Su inconveniente principal es la gran extensión necesaria para su implantación. Además, la normativa es cada vez más estricta en cuanto a los límites de patógenos, lo que inhabilita a estos tratamientos como procesos destinados a la regeneración de aguas (salvo en ciertos usos menos exigentes) si no es en combinación con otros métodos que permitan al efluente alcanzar la calidad adecuada. Como comparación con las tablas anteriores, se exponen en la tabla 6 los valores característicos del tratamiento de infiltración-percolación.

Tabla 6. Rendimientos de la infiltración-percolación

SS (mg/)	Turbidez (NTU)	E. (UFC/100ml)	Coli	Nemátodos (n° huevos/10L)
< 10	< 5	> 1000		Ausencia

Fuente: Ortega e Iglesias (2008)

Capítulo 3.

Metodología experimental. Resultados y discusión

La secuencia de tratamiento escogida debe ensayarse previamente a escala de laboratorio, de forma que puedan determinarse las condiciones óptimas y los reactivos necesarios para que las aguas así tratadas cumplan con los requisitos exigidos.

En este capítulo se lleva a cabo la descripción y el análisis de los ensayos realizados en el laboratorio:

- ✓ ensayos de Jar Test (tratamiento de coagulación-floculación-decantación)
 - optimización del tipo y dosis de coagulante
 - optimización del pH
 - uso de polielectrolitos
- ✓ filtración en arena del efluente del ensayo de coagulación-floculación-decantación
- ✓ cálculo de la demanda de cloro de las aguas tratadas
- ✓ cloración

3.1. TOMA Y CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS

El objetivo de la toma de muestras es la obtención de un volumen de efluente que pueda ser trasladado y manipulado en el laboratorio con facilidad, sin que por ello deje de representar con exactitud al efluente del que procede.

Para la preparación de las muestras utilizadas, se toma agua del canal de salida de la depuradora de La Almozara, en Zaragoza. Este efluente secundario se caracteriza por su color ligeramente grisáceo-amarillento, y la presencia de partículas en suspensión de tamaño medio. En cuanto a sus características físicas y químicas, se recogen las más relevantes en la tabla 7.

Tabla 7. Características del agua de salida de la depuradora de La Almozara

Parámetro	Valor medio obtenido en el laboratorio
pH	8,29
Dureza	244 ppm CaCO ₃
Conductividad	1324 µS/cm
Sólidos suspendidos (SS)	34 mg/l
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	7 mg/l
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	30 mg/l**
Demanda química de oxígeno (DQO)	102 mg/l
Carbono orgánico total (COT)	7,7 mg/l

** Valor proporcionado por la depuradora

Fuente: elaboración propia según los resultados de los ensayos analíticos realizados siguiendo los métodos descritos en los anexos D.3 y D.8

Todos estos parámetros han sido evaluados en el laboratorio con el agua de salida de la depuradora que se ha recogido como muestra para realizar los ensayos de este estudio.

3.2. TRATAMIENTO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN-DECANTACIÓN (ENSAYO DE JAR-TEST)

En primer lugar, se lleva a cabo el estudio y optimización del tipo de coagulante, dosis, pH de tratamiento y conveniencia del uso de floculantes químicos. Este análisis se va a realizar mediante ensayos de Jar Test, tal y como se describe en el anexo D.1.

Una vez obtenidas las condiciones óptimas para cada coagulante, se mide la cantidad de sólidos suspendidos y sólidos suspendidos volátiles, así como la humedad de los lodos. Por otra parte, también se miden las características del líquido clarificado, comparándolas con las de la muestra inicial para obtener el rendimiento de depuración.

3.2.1. Reactivos empleados

En estos ensayos se utilizan diversos coagulantes y floculantes disponibles en el laboratorio, suministrados por distintas empresas de tratamiento de aguas. Para ajustar el pH en los casos requeridos se utiliza NaOH, cuando se precisa un aumento, y HCl en caso de que sea necesaria su reducción.

En la tabla 8 se muestra una lista de los agentes químicos empleados y las correspondientes empresas suministradoras. Una descripción más extensa de las características de cada reactivo puede consultarse en el anexo D.2.

Tabla 8. Reactivos químicos empleados

EMPRESA	COAGULANTE
ACIDEKA, S. A. Lantarón (Vitoria)	dKfloc RI-105 (base hierro) dKfloc RI-125 (base hierro) dKfloc RI-605 (base aluminio) dKfloc RI-615 (base aluminio) WAC (base aluminio) SAMO-64 (base aluminio)
KEMIRA IBÉRICA, S. A. (Tarragona)	Pax 18 (base aluminio) FeCl ₃ (base hierro) Ferriclar (base hierro) SAL 8.2 (base aluminio)
IDAGUA, S. A. (Barcelona)	IDT-680 (base aluminio)
FLOCULANTE	
Comercial RIBA, S. A. Cornellà de Llobregat (Barcelona)	Magnafloc 1017 (aniónico) Magnafloc 155 (aniónico) Magnafloc 7027 (no-iónico) Zetag 50 (catiónico) Zetag 47 (catiónico)

3.2.2. Parámetros indicadores de la eficiencia del proceso

Los parámetros analizados se exponen a continuación. Los métodos utilizados en este trabajo se describen en el anexo D.3. En la mayoría de los casos se han seguido métodos estándar (APHA, 2005):

- ✓ velocidad de sedimentación (v_s , cm/min)
- ✓ volumen de lodos (cm^3/l de muestra)
- ✓ sólidos suspendidos totales (SST, mg/l)
- ✓ sólidos suspendidos volátiles (contenido orgánico de los lodos) (SSV, mg/l):
nulos tras los ensayos de coagulación-floculación-sedimentación
- ✓ carbono orgánico total (COT, mg/l) y porcentaje de eliminación de carbono orgánico total con respecto al agua de salida de la EDAR

Los factores considerados en la optimización del tratamiento son los siguientes:

- ✓ transparencia del agua tras el ensayo: el agua tratada debe quedar transparente.
Se rechazan los coagulantes que dejan el agua turbia
- ✓ velocidad de sedimentación: la velocidad de decantación debe ser lo más elevada posible

- ✓ volumen de fangos: interesa un volumen de fangos pequeño (índice volumétrico de lodos (IVL) lo menor posible, ya que será necesario gestionar los fangos generados durante el tratamiento)
- ✓ coste del coagulante: en caso de que las condiciones anteriores sean idénticas para dos coagulantes distintos, primará aquél cuyo coste sea menor
- ✓ pH: es preferible aquel coagulante que deje, tras el tratamiento, un pH dentro del intervalo 7,5-9,5, pH al que está permitido verter el agua al alcantarillado público según la Ordenanza Municipal para el Control de la Contaminación de las Aguas Residuales (13/02/1986)
- ✓ eliminación de carbono orgánico total: el COT proporciona una información precisa de la carga orgánica total del agua. Puesto que la mezcla va a ser clorada y los THMs (trihalometanos) se forman por cloración acuosa de la materia orgánica presente en el agua, es interesante disminuir al máximo la presencia de dicha materia orgánica en el agua (Consorti Sanitari de Barcelona (2008), Mosquera (2009), Rodríguez (2007) y Sarasa (1999))

3.2.3. Resultados de los ensayos

Elección de los coagulantes de ensayo

En primer lugar, es necesario determinar cuáles de los aditivos propuestos son aptos para clarificar el agua problema. Así, antes de hallar la dosis y el pH óptimo para todos los coagulantes sugeridos, se realizan los ensayos pertinentes para saber si puede descartarse alguno de ellos de antemano. Para ello, se parte de una concentración de coagulante elevada. Aquellos que dejen el agua turbia a dicha concentración, se descartan, puesto que la dosis óptima de los mismos se hallará por encima de la concentración ensayada, suponiendo esto un notable aumento en los costes de tratamiento. Hay que señalar, que todos los ensayos realizados para optimizar la dosis de coagulante deben efectuarse a un mismo pH; en este caso, se ha escogido un valor de pH = 6.

Se ensayan todos los coagulantes a una concentración de 1200 mg/l. Los reactivos que dejen el agua turbia a dicha concentración son descartados, y con los restantes se realizan ensayos a una dosis de 600 mg/l, a fin de establecer el intervalo de concentraciones donde se encuentra la dosis óptima de cada uno de ellos.

El único reactivo para el que el agua queda turbia a la concentración ensayada es el PAX 18, según refleja la tabla 9, de modo que dicho coagulante se descarta para los ensayos siguientes.

Con el resto de las sustancias, como ya se ha señalado, se realizan ensayos a una concentración de 600 mg/l (ver tabla 9).

Tabla 9. Resultados para los coagulantes a 600 mg/l y pH = 6

Coagulante	Clarificación del agua
dKfloc RI-105	Agua turbia
dKfloc RI-125	Agua turbia
dKfloc RI-605	Agua turbia
dKfloc RI-625	Agua turbia
WAC	Agua transparente
SAMO-64	Agua turbia
FeCl ₃	Agua transparente
Ferriclar	Agua transparente
Sal 8.2	Agua turbia
IDT-680	Agua transparente

Aquellos coagulantes para los que el agua queda turbia en este ensayo, tienen una dosis óptima comprendida entre 1200-600 mg/. Si bien podría optimizarse la dosis para estos reactivos, se ha considerado más conveniente no efectuar dichos ensayos, ya que los restantes coagulantes poseen una dosis óptima menor de 600 mg/l, mucho más conveniente desde el punto de vista económico.

Así pues, se seleccionan los reactivos FeCl₃, Ferriclar, WAC e IDT-680. Los dos primeros son sales de hierro y los restantes, de aluminio.

Optimización de la dosis de coagulante

Se realizan ensayos de jarras con los coagulantes seleccionados en la fase anterior, a pH 6. En el anexo D.4 se recogen los resultados correspondientes a cada uno de estos ensayos. En este caso, no fue necesario el ajuste de pH, ya que la propia adición de los reactivos adecuaba el pH de la disolución. Para cada uno de los cuatro coagulantes, se varían las dosis de ensayo (600 ppm, 400 ppm, 300ppm, 200 ppm, 100 ppm). Los factores considerados en la optimización del tratamiento son los relacionados en el apartado 2.2.2.

En la tabla 10, se muestran las dosis óptimas seleccionadas para los coagulantes ensayados.

Tabla 10. Dosis óptima para cada uno de los coagulantes seleccionados tras los ensayos de Jar Test

Coagulante	Dosis (ppm)
FeCl ₃	300
Ferriclar	600
WAC	400
IDT-680	400

Optimización del pH

Con la dosis óptima de cada uno de los coagulantes, se realizan una serie de ensayos enfocados a determinar el pH óptimo de coagulación. En el anexo D.5 se recogen los resultados correspondientes a dichos ensayos. Los valores de prueba van a ser 5, 6, 7, 9, 11. En la determinación del pH óptimo se va a considerar, además de la claridad del agua, la velocidad de sedimentación de las partículas, el volumen de fangos generado y el COT. Si es necesario, se ajusta el pH de la disolución con NaOH, cuando se requiere su aumento, o con HCl si lo que se desea es reducirlo.

En la tabla 11 se resumen las condiciones óptimas (dosis y pH) para cada uno de los coagulantes.

Tabla 11. Dosis y pH óptimos de los coagulantes de ensayo

Coagulante	Dosis (ppm)	pH
FeCl ₃	300	6
Ferriclar	600	6
WAC	400	6
IDT-680	400	6

En estas condiciones se mide la humedad de los lodos generados. Los valores obtenidos se muestran en la tabla 12.

Tabla 12. Humedad de los lodos en condiciones óptimas

Coagulante	Humedad de los lodos (%)
FeCl ₃	81,03
Ferriclar	74,89
WAC	79,81
IDT-680	80,22

Influencia del uso de polielectrolitos

En esta nueva serie de ensayos, se trabaja en las condiciones óptimas de dosis y pH para cada uno de los coagulantes. En este caso, se trata de probar si la presencia de polielectrolitos mejora el proceso de coagulación-floculación. Para cada coagulante, en las condiciones óptimas, se ensayan cinco floculantes de distintas características. La

concentración de polielectrolito añadida al agua va a ser, en todos los casos, de 1 mg/l. En el anexo D.6 se recogen los resultados correspondientes a cada uno de los ensayos realizados.

Una vez realizados los experimentos, se selecciona el polielectrolito que mejor funcione para un coagulante determinado, y se comparan los resultados obtenidos sin la aplicación de agente floculante.

La tabla 13 recoge, a modo de resumen, los polielectrolitos más adecuados para cada uno de los coagulantes.

Tabla 13. Polielectrolitos escogidos para los coagulantes propuestos

Coagulante	Polielectrolito
FeCl ₃	Magnafloc 155
Ferriclar	Magnafloc 155
WAC	Zetag 50
IDT-680	Magnafloc 155

En estas condiciones se mide la humedad de los lodos generados. Los valores obtenidos se muestran en la tabla 14.

Tabla 14. Humedad de los lodos en condiciones óptimas

Coagulante	Humedad de los lodos (%)
FeCl ₃	72,24
Ferriclar	75,64
WAC	76,89
IDT-680	65,29

3.2.4. Interpretación de los resultados del tratamiento físico-químico

Una vez obtenidos los resultados del tratamiento, tanto con polielectrolitos como en ausencia de ellos, se procede a su análisis a fin de extraer las conclusiones que se desprenden de ellos. Para ello, se tienen en cuenta los parámetros ya indicados: porcentaje de eliminación de COT, velocidad de sedimentación, volumen y humedad de los lodos y aspecto de las disoluciones finales, el cual mejora de forma apenas perceptible con la adición de un agente floculante.

Los resultados del tratamiento se reflejan en la figura 3.

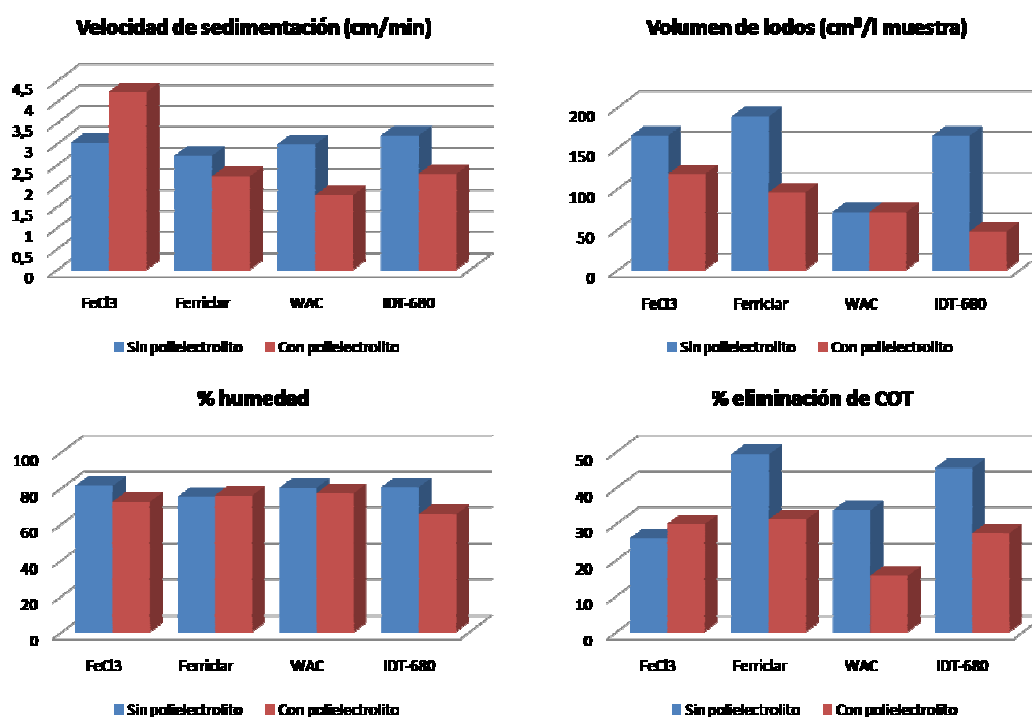


Figura 3. Gráficas comparativas de los resultados del tratamiento físico-químico

Si se analizan individualmente cada uno de los coagulantes, se llega a las conclusiones siguientes:

- ✓ el porcentaje de eliminación de COT disminuye notablemente con el uso de polielectrolito, excepto en el caso del FeCl₃ donde se observa un ligero aumento
- ✓ la misma tendencia se observa en el caso de la velocidad de sedimentación, que sólo aumenta al usar un polielectrolito en los ensayos con el coagulante FeCl₃
- ✓ el volumen de lodos generado es notablemente mayor cuando no se usa polielectrolito, exceptuado el WAC, donde éste permanece constante
- ✓ la humedad de los lodos no sufre grandes variaciones, si bien se observa una pequeña disminución de la misma cuando se hace uso de un floculante, siendo esta disminución más acusada en el caso del IDT-680, y no observándose cambios significativos (tal vez un ligero aumento) para los ensayos con Ferriclar

Así, el único coagulante que parece funcionar mejor con ayuda de polielectrolito es el FeCl₃. Por tanto, las condiciones óptimas para cada uno de los coagulantes ensayados quedan como se expone en la tabla 15.

Tabla 15. Condiciones óptimas para los distintos coagulantes

Coagulante	Dosis (ppm)	pH	Polielectrolito utilizado
FeCl ₃	300	6	Magnafloc 155, aniónico
Ferriclar	600	6	Ninguno
WAC	400	6	Ninguno
IDT-680	400	6	Ninguno

Las condiciones establecidas en la tabla 15 son las que se van a aplicar el resto de los ensayos, a fin de optimizar la línea de tratamiento propuesta, incluyendo cloración y filtración.

A modo de resumen, la tabla 16 refleja las condiciones óptimas para cada uno de los coagulantes ensayados y los valores de los parámetros de optimización en cada caso.

Tabla 16. Valores de los parámetros de optimización para las condiciones óptimas de los distintos coagulantes

Coagulante	Velocidad de sedimentación (cm/min)	Volumen de lodos (cm ³ /l muestra)	% Humedad de los lodos	COT _{final} (mg C/l)	% Eliminación de COT
FeCl ₃ , 300 ppm, pH6, magnafloc 155 aniónico	4,23	118	72,24	5,4	29,87
Ferriclar, 600 ppm, pH6, sin polielectrolito	2,71	189	74,89	3,9	49,35
WAC, 400 ppm, pH6, sin polielectrolito	2,98	71	79,81	5,1	33,77
IDT-680, 400 ppm, pH6, sin polielectrolito	3,19	165	80,22	4,2	45,45

3.3. FILTRACIÓN EN ARENA DEL EFLUENTE DEL ENSAYO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN

Se someten a filtración los efluentes obtenidos en el proceso de coagulación-floculación en las condiciones óptimas establecidas para cada coagulante en la serie de ensayos descrita en el apartado 3.2. El filtrado se recoge a fin de determinar la eficacia del proceso.

La descripción de la instalación y el procedimiento de ensayo se describen en el anexo D.7.

3.3.1. Parámetros indicadores de la eficiencia del proceso

Los métodos analíticos utilizados en este trabajo se describen en el anexo D.8. Los parámetros analizados se señalan a continuación:

- ✓ dureza (ppm de CaCO_3)
- ✓ DQO ($\text{mg O}_2/\text{l}$)
- ✓ Sólidos suspendidos totales, SST (mg/l)

Para el filtrado correspondiente a cada una de las disoluciones ensayadas se miden, el pH, la conductividad y la dureza. Por otra parte, también se miden la DQO y el COT del líquido clarificado, valores que se comparan con los correspondientes a la muestra inicial para obtener el rendimiento de depuración.

3.3.2. Resultados de los ensayos

Tras filtrar los efluentes obtenidos en las condiciones óptimas correspondientes a los coagulantes seleccionados se miden en el líquido clarificado los parámetros recogidos en la tabla 17. Los cálculos detallados de los parámetros indicadores se recogen en el anexo D.9.

Tabla 17. Parámetros de caracterización de los efluentes filtrados

Óptimo del tratamiento físico-químico, seguido por filtración en arena	pH final	Conductividad final ($\mu\text{S/cm}$)	Clarificación del agua	COT _{final} (mg C/l)	% eliminación de COT con respecto al agua de salida de la depuradora	Dureza Total (ppm CaCO_3)	DQO (mg O_2/l)	SST (mg/l)
Muestra de agua de salida de la EDAR	8,29	1324		7,7		244	102	34
FeCl_3 , 300 ppm, pH=6, Magnafloc 155 aniónico	7,05	1622	Transparente	4,0	48,05	160	77	11
Ferriclar, 600 ppm, pH=6, sin polielectrolito	7,23	1574	Transparente	3,1	59,74	164	85	13
WAC, 400 ppm, pH=6, sin polielectrolito	7,18	1618	Transparente	3,6	53,25	184	45	7
IDT-680, 400 ppm, pH=6, sin polielectrolito	7,11	1598	Transparente	3,8	50,65	200	31	5

En todos los casos, el efluente filtrado es una disolución transparente y carente de partículas en suspensión apreciables a simple vista.

3.3.3. Interpretación de los resultados del tratamiento de filtración

Se analizan en este apartado los resultados obtenidos tras la filtración en arena de las muestras tratadas con cada uno de los coagulantes seleccionados en las condiciones óptimas establecidas en el ensayo de coagulación-floculación. Dicho análisis proporciona datos adicionales para la selección del coagulante óptimo, así como para conocer la calidad del agua tras el tratamiento, permitiendo precisar los usos potenciales del efluente.

En todos los casos, el líquido clarificado es transparente (a simple vista no se aprecian partículas en suspensión), con un pH aproximado de 7 y una conductividad en torno a 1500 $\mu\text{S/cm}$. El valor de COT es bajo en todos los casos, ya que oscila entre 3 y 4, lo que supone unos porcentajes de eliminación elevados (de más del 50% en la mayoría de los casos) con respecto al agua de salida de la depuradora.

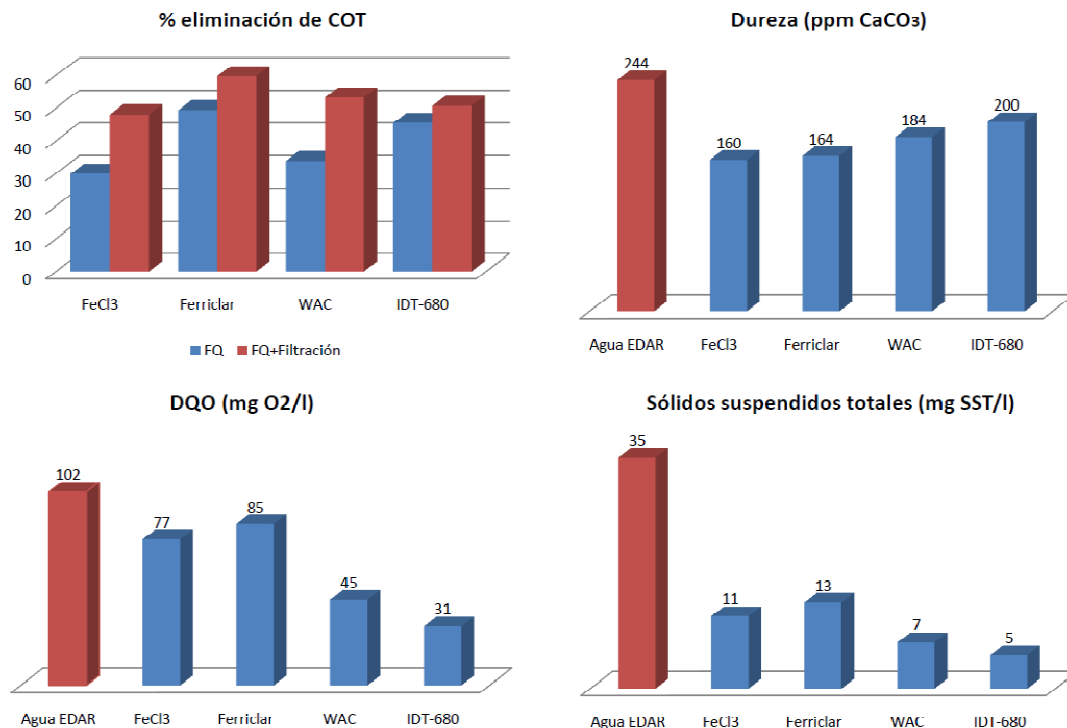


Figura 4. Gráficas comparativas de los resultados del tratamiento de filtración en arena

De la tabla 17 y de las gráficas (figura 4) se desprende:

- ✓ en todos los casos se da una eliminación adicional de COT tras la operación de filtración (en comparación con la obtenida aplicando únicamente un tratamiento físico químico de coagulación-floculación-decantación). El mayor porcentaje de eliminación corresponde al uso de ferriclar, mientras que el menor rendimiento se da en el caso de usar FeCl₃. Para los coagulantes basados en el aluminio, el porcentaje de eliminación de COT es superior en el caso de usar IDT-680 antes de la filtración, pero pasa a ser más alto para el caso del WAC tras hacer pasar la muestra a través del filtro de arena
- ✓ la conductividad de las disoluciones finales, si bien es elevada, se encuentra dentro del límite de tolerancia de la mayor parte de los cultivos, aunque quizá habría que considerar condiciones de drenaje que minimizasen la posibilidad de salinización de los suelos regados con esta agua. No obstante, podría pensarse en un tratamiento con membranas que permita disminuir el valor de este parámetro. Sin embargo, los ensayos se realizaron cuando el agua de abastecimiento se tomaba del Canal Imperial de Aragón y del Ebro. Hay que tener en cuenta que con el nuevo suministro de agua a Zaragoza, procedente de Yesa, se han

rebajado la salinidad y la dureza del agua, por lo que sería necesario realizar nuevos ensayos para poder evaluar los cambios

- ✓ el tratamiento al que ha sido sometida el agua durante los ensayos rebaja en cierto grado la dureza, disminuyendo su capacidad para producir incrustaciones y obturación en las conducciones. También la dureza de las aguas de abastecimiento se ha visto reducida con la traída de aguas del Pirineo, por lo que cabe esperar una reducción de este parámetro al tratar las aguas de la EDAR con la línea aquí propuesta, ya que las aguas de partida son más blandas
- ✓ en todos los casos se produce una reducción de la DQO con respecto al agua sin tratar. Dicha reducción es bastante discreta cuando se utilizan coagulantes férricos; por el contrario, con los coagulantes basados en el aluminio se observan porcentajes de reducción elevados, siendo el mayor de ellos el correspondiente al tratamiento con IDT-680
- ✓ tras la filtración de las muestras se observa una importante reducción en la cantidad de sólidos suspendidos, que sitúa a las muestras tratadas dentro de los niveles permitidos para muchas de las aplicaciones de reutilización. Como puede apreciarse, tras la filtración, todas las muestras tienen un nivel de SST totales inferior a 20 mg/l. En el caso de los coagulantes con base de aluminio, el nivel es aún menor, situándose por debajo de los 10 mg/l

3.4. CLORACIÓN DEL EFLUENTE FILTRADO

Para el ensayo de cloración se parte de los efluentes obtenidos tras la filtración en lecho de arena. Para cada uno de los coagulantes utilizados, en sus condiciones óptimas, se tiene una disolución tratada y filtrada, a la que se adiciona la cantidad exacta de reactivo de cloración que se considere conveniente para asegurar la desinfección del agua durante su distribución por la red. De esta forma se garantiza el mantenimiento de cierta concentración de cloro residual.

La medida del cloro residual se lleva a cabo por el método del DPD (dietil-p-fenilen diamina) para la valoración del cloro residual libre presente en las muestras filtradas. Una explicación detallada se recoge en el anexo D.10.

3.4.1. Parámetros evaluados

En los ensayos de cloración se va a determinar:

- ✓ la demanda de cloro de la muestra bruta, es decir, del agua de salida de la depuradora
- ✓ el cloro residual de las muestras tras el tratamiento de cloración

Los métodos analíticos empleados se describen en el anexo D.10.

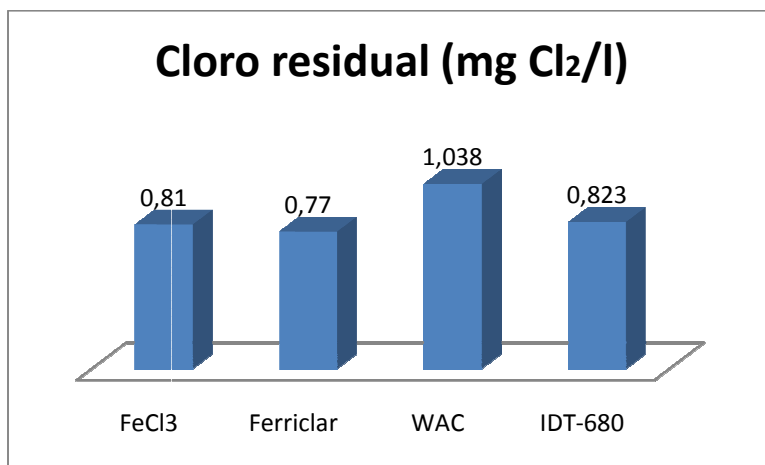
3.4.2. Procedimiento experimental

La demanda de cloro del agua de salida de la depuradora tiene un valor de 7 mg Cl_2/l .

Por otra parte, tras clorar la muestra (sometida a tratamiento físico-químico con los distintos coagulantes y filtración) con una dosis de cloro correspondiente a su demanda (7 mg/l), se calcula la concentración de cloro residual. Los resultados se presentan en la gráfica 4. Los cálculos detallados se recogen en el anexo D.11.

3.4.3. Resultados e interpretación del tratamiento de cloración

Todos los efluentes deben tener una concentración de cloro residual que asegure la calidad microbiológica del agua.



Gráfica 4. Cloro residual presente en los efluentes

Las concentraciones de cloro residual recomendadas varían ligeramente según el uso que se vaya a dar al efluente. Como puede verse en la gráfica 4, en todos los casos se obtiene una concentración de cloro residual dentro del rango recomendado para aguas de riego (0,5-1 mg/l) y para la prevención y control de la legionelosis (0,2-1 mg/l). Por tanto, una dosis de cloro igual a la demanda de cloro del agua de salida de la depuradora

(7 mg/l) permite una desinfección total y mantiene una dosis de cloro residual que evita el recrecimiento bacteriano. No obstante, sólo en caso de emplear WAC como coagulante, se alcanza una dosis de cloro residual de 1 mg/l, recomendada para el caso de aguas potables (ver anexo A.5).

3.5. RESUMEN DE LOS RESULTADOS DEL TRATAMIENTO DE REGENERACIÓN

La aplicación de la línea de tratamiento propuesta (coagulación-floculación-decantación, filtración y cloración) al agua de salida de la EDAR con cada uno de los coagulantes seleccionados en condiciones óptimas proporciona unos resultados que se resumen en la tabla 18.

Tabla 18. Resultado del tratamiento

Coagulante	COT (mg/l)	% elimin. COT	V _{sedimentación} (cm/min) (F-Q)**	V _{lodos} (cm ³ /min) (F-Q)**	DQO (mg O ₂ /l)	% elimin. DQO	SST (mg/l)	% elimin. SST
FeCl ₃ , 300 ppm, pH=6, Magnaflow 155 aniónico	4,0	48,05	4,23	118 (72,24 % de humedad)	77	24,51	11	67,64
Ferriclar, 600 ppm, pH=6, sin polielectr.	3,1	59,74	2,71	189 (74,89 % de humedad)	85	16,67	13	62,76
WAC, 400 ppm, pH=6, sin polielectr.	3,6	53,25	2,98	71 (79,81 % de humedad)	45	55,88	7	79,41
IDT-680, 400 ppm, pH=6, sin polielectr.	3,8	50,65	3,19	165 (80,22 % de humedad)	31	69,61	5	85,29

** (F-Q): indica que estos datos se han tomado a partir del tratamiento de coagulación-floculación-decantación, es decir, del tratamiento físico-químico previo a la filtración

Capítulo 4.

Aplicación a la ciudad de Zaragoza

4.1. SITUACIÓN ACTUAL EN ZARAGOZA

El término municipal de Zaragoza tiene una superficie de 105.895 ha (Ayto. Zaragoza. Observatorio Municipal de Estadística, 2008) y un censo de población de 675.121 habitantes (BOE, 2010). El clima de la ciudad es de tipo continental, con altas temperaturas en verano y medias-bajas en invierno, escasa pluviometría, con un promedio anual de 315 mm que se concentran en primavera, y un régimen de vientos muy continuo que, canalizados por la Depresión del Ebro, proceden generalmente del noroeste. En la figura 5 se muestra un mapa de Zaragoza con los principales distritos de la ciudad.

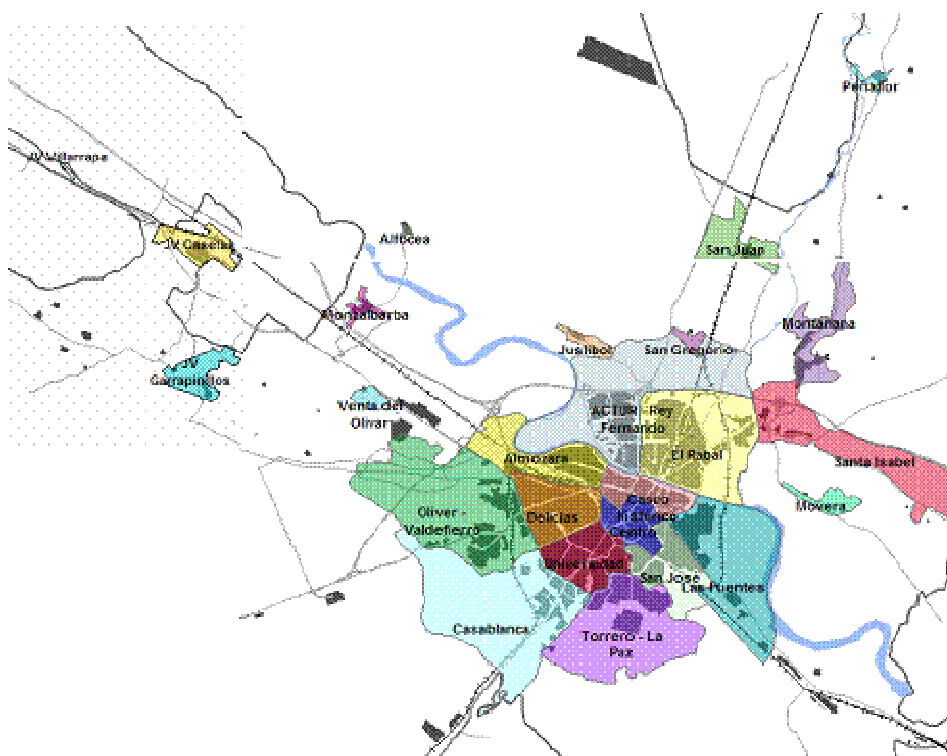


Figura5. Mapa de distritos de Zaragoza

4.1.1. ABASTECIMIENTO

Zaragoza recibe agua del Pirineo desde junio de 2009 a través del sistema Yesa-Bardenas ($1\text{m}^3/\text{s}$), mezclada al 50 % con agua del Canal Imperial de Aragón (desde donde se venía tomando hasta esa fecha). No obstante, a partir del 1 de julio de 2010 el abastecimiento a Zaragoza se realiza al 100% con agua procedente del embalse de Yesa,

cloro en la red sin necesidad de una hipercloración en cabecera. Éstas se sitúan en la carretera de Logroño, el puente del Gállego y en el de las Fuentes, así como en distintos depósitos de la red de abastecimiento. Recientemente, se ha iniciado la construcción de otras dos nuevas estaciones de cloración, una en el Parque Oliver y otra en el puente de La Almozara. La ciudad cuenta con una red de 1.230 Km de tuberías de abastecimiento. En la figura 7 se presenta el esquema de la red municipal de distribución de agua potable. Asimismo, en el anexo E.1 se expone de forma detallada el proceso de potabilización de agua que se lleva a cabo en la planta de Casablanca.



Figura 7. Red de distribución de agua potable (Ayuntamiento de Zaragoza)

4.1.2. SANEAMIENTO

Las aguas residuales del municipio se tratan en las depuradoras de La Almozara y de La Cartuja, reduciendo la contaminación de los vertidos antes de devolverlos al río Ebro. Se recogen prácticamente la totalidad de las aguas consumidas en la ciudad, incluyendo los colectores de los ríos Huerva y Gállego y el polígono de Malpica.

La estación de tratamiento de aguas residuales (EDAR) de La Almozara, en funcionamiento desde 1989, tiene una capacidad de tratamiento de 100.000 habitantes equivalentes y recoge las aguas residuales del oeste de la ciudad (de los barrios Oliver,

Valdefierro, Montecanal, Miralbueno, parte de las Delicias y el entorno de la carretera de Logroño). La capacidad teórica de tratamiento de la planta es de 34.560 m³/día (400 l/s), y en promedio el caudal tratado es de 32760 m³/día (Ayuntamiento de Zaragoza. Agenda Local 21, 2009). El destino final del agua depurada es el río Ebro. La planta está dotada de un sistema de producción de energía eléctrica a partir del biogás generado en la digestión anaerobia que supone un aprovechamiento de aproximadamente el 60% del consumo de electricidad de la planta.

La EDAR de La Cartuja entró en funcionamiento en 1993 con una capacidad de tratamiento de 1.200.000 habitantes. La totalidad de los procesos a los que se someten las aguas y los fangos tiene lugar en el interior de instalaciones cerradas, lo que elimina molestias por malos olores o ruidos. Tiene una capacidad teórica de tratamiento de 259.200 m³/día (3 m³/s) y el caudal promedio tratado es de 156.250 m³/día (Ayuntamiento de Zaragoza. Agenda Local 21, 2009). Las aguas depuradas se vierten al Ebro. Dispone de un sistema de incineración de fangos con recuperación de energía y lavado de humos.

En ambas EDAR se depuran las aguas hasta nivel secundario, contando además en la Cartuja con un proceso adicional de eliminación de fósforo.

En el anexo E (E.2 y E.3) se da una explicación más extensa acerca del funcionamiento de ambas depuradoras.

4.2. APLICACIÓN DEL SISTEMA DE REUTILIZACIÓN A ZARAGOZA

La reutilización de las aguas residuales de la ciudad de Zaragoza está prevista para su aplicación como aguas de riego en zonas verdes y para el baldeo y limpieza de calles y contenedores.

El riego de parques y jardines públicos en Zaragoza se realiza mediante agua de pozo (96%) y de red (4%) (García, 2006). Utilizando aguas regeneradas para riego pueden sustituirse estos consumos, lo que contribuye a la protección del acuífero y a un ahorro de agua de la red de abastecimiento. Se enlaza así con programas de ahorro de agua y aprovechamiento de recursos no convencionales, como el Proyecto Optimizagua (CONAMA (2006), Romero (2006) y Tribuna del Agua (2008)).

Por otra parte, la Ordenanza Municipal para la Ecoeficiencia y la Calidad de la Gestión Integral del Agua, aprobada definitivamente en enero de 2011 (Ordenanza Municipal, BOP, 2011), trae consigo una serie de cambios entre los que se incluye la obligación de impulsar el aprovechamiento de recursos hídricos alternativos para riego de zonas

verdes, baldeo de calles u otros usos que no requieren agua de calidad potable (anexo A.6).

Los caudales necesarios para satisfacer estas demandas son los que se recogen en la tabla 20.

Tabla 20. Caudal empleado en riego de zonas verdes, baldeo y limpieza de calles y contenedores

Riego de zonas verdes		6902880 m³/año
Baldeo y limpieza:		330400 m ³ /año
✓ lavado de contenedores	1.400 m ³ /año	
✓ baldeo de calles	149.000 m ³ /año	
✓ limpieza viaria (incluido el barrido)	180.000 m ³ /año	
TOTAL		7233280 m³/año

El consumo en baldeo y limpieza de calles y contenedores ha sido facilitado por la Delegación en Aragón de la empresa FCC, S.A., adjudicataria de los servicios de limpieza y recogida de basuras del municipio.

El caudal de riego de zonas verdes se ha estimado extrapolando los datos disponibles del año 2005, donde se tenía un consumo de 7.880 m³/día para una superficie de 200 ha. En 2010, la superficie de parques urbanos del municipio supera las 480 ha (incluidas las intervenciones en las riberas). En el anexo F se recoge una relación de los parques y zonas verdes de la ciudad, con su extensión.

Tomando como base estas demandas que se pretenden satisfacer, se han dimensionado las instalaciones de tratamiento terciario, impulsión y conducciones para un caudal de 275 l/s, lo que supone un sobredimensionamiento del 20 % en previsión de atender nuevas demandas futuras para las aguas regeneradas.

No se plantea la reutilización de la totalidad de las aguas depuradas del municipio, ya que actualmente no existe mercado para tales volúmenes. No está justificado el gasto para una planta de tratamiento terciario de capacidad tan grande si no se van a consumir estas aguas.

4.2.1. PLANTA DE TRATAMIENTO DE REGENERACIÓN

El agua residual que llega a la depuradora se somete a un tratamiento biológico de fangos activados, obteniendo tras el proceso un efluente secundario cuyas características son las señaladas en la tabla 7 (apartado 2.1).

Esta planta de tratamiento terciario se situaría en una de las dos depuradoras de la ciudad. Por cuestiones de proximidad al centro urbano y, sobre todo, al Parque del Agua

(que actualmente es de mayor extensión del municipio), convendría situar la planta en la EDAR de La Almozara. Por otra parte, las necesidades de espacio para la planta de tratamiento terciario, podrían hacer aconsejable su instalación en la EDAR de La Cartuja, pero las conducciones desde allí hasta los puntos de consumo serían más largas, con el consiguiente aumento de costes para las redes de distribución. Además, pensando en una menor necesidad de bombeos, la topografía de Zaragoza aconseja situarla en la EDAR de La Almozara (cota 200 m) en lugar de en La Cartuja (cota 196 m).

No obstante, sería necesario realizar un estudio detallado de la topografía del terreno, el coste de las conducciones y de los bombeos y la disponibilidad de espacio, antes de decidir definitivamente el emplazamiento de la planta. Dado que este análisis queda fuera del alcance del presente proyecto, se ha seleccionado como posible ubicación la EDAR de La Almozara, considerando que el coste de la red de distribución será menor. Las infraestructuras de regeneración se han diseñado para un caudal de 275 l/s, y se han dimensionado a partir de los resultados de optimización de las pruebas de laboratorio.

El proceso de tratamiento escogido para la regeneración de las aguas es el definido como “full treatment” en el Código Administrativo de California, conocido como “Title 22” (State of California, 2000). De esta forma se obtiene un agua con unos niveles de calidad aptos para el riego de parques públicos. Se trata, en definitiva, de aplicar un tratamiento de potabilización a un efluente secundario.

A grandes rasgos, la línea de tratamiento escogida es la siguiente:

- captación y bombeo del agua proveniente del tratamiento biológico
- coagulación y floculación
- sedimentación
- filtración sobre arena
- desinfección

No hay precloración para evitar la formación de productos organoclorados, ya que el agua de entrada al tratamiento terciario tiene una concentración de sólidos en suspensión en torno a los 35 mg/l.

Un esquema de la planta se expone en la figura 8.

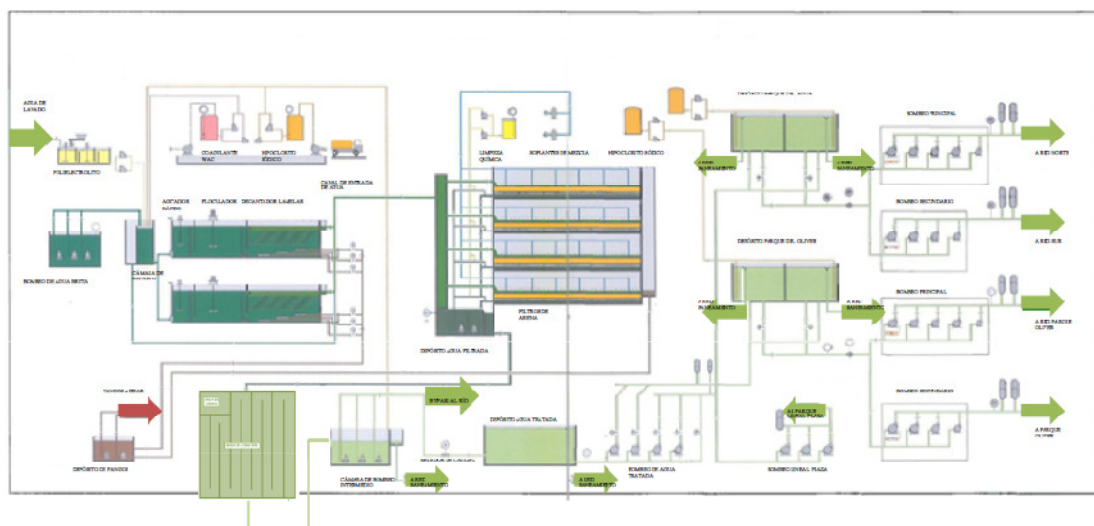


Figura 8. Tratamiento de regeneración y bombeo a los parques urbanos

El cálculo de los equipos que componen la línea de tratamiento se ha realizado según los parámetros de diseño recomendados para estas unidades (Metcalf & Eddy, 1995 y WEF-ASCE, 1998). En el anexo G.1 se recogen los cálculos detallados de las infraestructuras de regeneración de aguas y se expone, a mayor tamaño, el esquema de la planta de regeneración.

Captación y bombeo de aguas

Se realiza al final de la línea del secundario de la EDAR, mediante 3 bombas centrífugas sumergibles en paralelo (una se dejaría en reserva) con una capacidad unitaria de 137,5 l/s.

Tratamiento físico-químico

Se compone de dos líneas, cada una de ellas formada por:

- ✓ 2 cámaras de coagulación de $24,75 \text{ m}^3$ cada una (2,5 m de altura, 3 m de anchura y 3,3 m de longitud), con agitadores rápidos
- ✓ 2 cámaras de floculación de $123,75 \text{ m}^3$ cada una (2,5 m de altura, 3 m de anchura y 16,5 m de longitud), con agitadores lentos
- ✓ 2 decantadores circulares de 990 m^3 cada uno (20,5 m de diámetro), con rasquetas de fondo y bombas de extracción de fangos

Esta instalación incluye una estación de almacenaje y dosificación de reactivos.

Filtros de arena

- ✓ 4 filtros de arena de $20,625 \text{ m}^2$ cada uno, con una velocidad máxima de filtración de $12 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ ($200 \text{ l}/\text{m}^2/\text{min}$)
- ✓ equipos de lavado de filtros con agua y aire, en función de la pérdida de carga, con sus correspondientes bombas y soplantes
- ✓ bombas de recuperación de agua de lavado, que la mezclan en cabeza de la instalación con el influente

Desinfección con hipoclorito

- ✓ cámara de cloración con laberinto, de 1.485 m^3 (se establece un tiempo de contacto de 90 minutos, consiguiendo un alto grado de desinfección)

Depósitos y bombeos

- ✓ estación de bombeo para la impulsión del agua hasta la balsa de regulación mediante 3 bombas (una se dejaría en reserva) sumergibles con una capacidad unitaria de $137,5 \text{ l/s}$
- ✓ balsa de regulación, con un volumen de 23.760 m^3 , correspondiente a la producción total diaria de aguas regeneradas

El agua, una vez tratada y desinfectada, se almacena en el depósito regulador de 23.760 m^3 , y es bombeada desde allí a los depósitos de cabecera de la red de aguas regeneradas.

4.2.2. REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA REGENERADA

Desde el depósito situado a la salida del tratamiento terciario, de 23.760 m^3 , se bombea el agua a los parques urbanos del municipio. Se propone la distribución mediante dos arterias independientes. Los depósitos de cabecera de cada una de estas líneas se sitúan, uno en el Parque Metropolitano del Agua, y el otro en el Parque Oliver o del Oeste. Desde allí se abastecen todos los puntos de entrega mediante nuevos bombeos y depósitos o dársenas (depósitos enterrados) donde se acumula el agua.

El Parque Lineal de Plaza, en torno a la Plataforma Logística de Zaragoza, dispone de bombeo independiente, tomando el agua directamente del depósito de La Almozara. Se considera que es lo más adecuado para este espacio, debido a que se encuentra alejado

del resto de los puntos de consumo, y no demasiado alejado de la EDAR de La Almozara. En todo caso, la conducción desde el depósito de La Almozara hasta este parque se puede realizar casi en línea recta paralela al trazado de la autovía A-2, sin entrar en el casco urbano.

En la figura 8 se presenta el esquema de la red de abastecimiento propuesta. Este mismo esquema, a mayor tamaño, se expone asimismo en el anexo G.2.

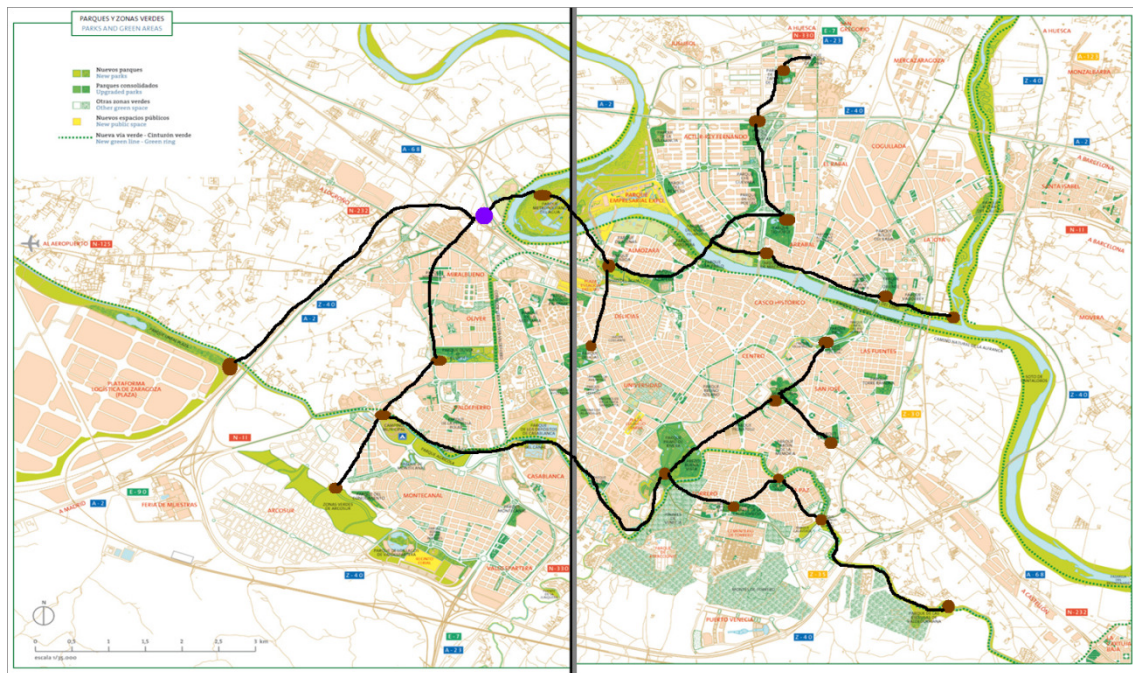


Figura 9. Red de aguas regeneradas (Ayuntamiento de Zaragoza. Atlas de la ciudad)

El conjunto formado por la planta terciaria, los depósitos y los centros de impulsión se controlan desde una sala de mando situada en el recinto de la EDAR de La Almozara.

En el interior de cada parque (o bien en aquellos dónde haya un depósito o dársena de suficiente capacidad) se va a realizar la instalación de redes independientes de la del agua potable destinadas a la conducción de aguas recicladas. Para evitar riesgos sanitarios, la doble red (potables-recicladas) debe ir convenientemente señalizada e incluir todos los elementos necesarios y todas las especificaciones de diseño reglamentarias para evitar conexiones cruzadas o el uso inadecuado de las aguas (anexo H).

Se incorporan, además, las plataformas de carga de los camiones cisterna para el baldeo de viales. El agua acumulada en las dársenas se lleva a estos puntos mediante un sistema de bombeo. Estos hidrantes o puntos de toma se instalan en aceras o zonas ajardinadas próximas a las dársenas, para su empleo en riego y limpieza.

Aguas regeneradas para lavado de contenedores, baldeo de calles y limpieza viaria

El agua para limpieza puede bombearse, como se ha señalado, desde las dársenas hasta los hidrantes o bien tomarse con camiones cisterna directamente de la planta de regeneración. En caso de considerar la última posibilidad, sería necesario evaluar tanto el coste de transporte como las posibles molestias ocasionadas por el aumento de tráfico rodado en una vía que ya cuenta con gran circulación.

Capítulo 5.

Conclusiones

En este capítulo se resumen las principales conclusiones obtenidas tras la realización de este proyecto, tanto en lo que respecta al tratamiento de regeneración aplicado como en lo referente a su aplicación concreta en la reutilización del agua residual en la ciudad de Zaragoza.

Conclusiones relativas al análisis de las aguas de salida de la EDAR y al tratamiento de regeneración ensayado:

- ✓ el agua de salida de la EDAR contiene una concentración elevada de sólidos en suspensión, DQO y COT, por lo que no es apta para muchos de los usos de reutilización establecidos en el RD 1620/2007 sin la aplicación de un tratamiento previo
- ✓ la línea de regeneración propuesta en este proyecto consiste en la aplicación, tras la depuración de las aguas residuales hasta nivel secundario, de un tratamiento de coagulación-floculación, seguido de decantación, filtración en arena y desinfección mediante cloración
- ✓ en relación a los sólidos en suspensión, los coagulantes basados en el aluminio (WAC e IDT-680) conducen a unos porcentajes de eliminación sensiblemente mayores que los coagulantes férricos
- ✓ en líneas generales, los coagulantes con los que se obtienen mejores resultados de clarificación del agua son los basados en el aluminio (altos grados de eliminación de COT, DQO y SST, simultáneamente)
- ✓ los coagulantes férricos pueden dar lugar a una cierta coloración del agua, empeorando sus características organolépticas; en consecuencia, y por todos los motivos enumerados anteriormente, no se recomienda su uso en regeneración de aguas residuales de salida de depuradora
- ✓ si se comparan los resultados para el uso de WAC e IDT-680 se observa que:
 - el WAC consigue una mayor eliminación de COT y un menor volumen de fangos, así como unos niveles elevados de eliminación de sólidos suspendidos y DQO

- en el caso del IDT-680, se da una eliminación de COT ligeramente inferior, pero la eliminación de DQO es mayor que para el WAC. Además, la eliminación de sólidos suspendidos también es elevada

A la vista de lo expuesto anteriormente y de las características del agua a la salida del tratamiento completo de regeneración, se considera que el coagulante que da mejores resultados globales es el WAC.

Por tanto, se concluye que utilizando WAC como coagulante a pH 6 y con una dosis de 400 mg/l, la línea de tratamiento propuesta para la planta de regeneración (coagulación-floculación-decantación, filtración y cloración), da lugar a un producto apto para la mayor parte de las aplicaciones de reutilización según el RD 1620/2007.

Conclusiones relativas a las aplicaciones de reutilización de las aguas regeneradas en la ciudad de Zaragoza:

- ✓ tras la aplicación, a escala de laboratorio, de un tratamiento de regeneración del agua de salida de la EDAR de La Almozara, se ha comprobado que es viable su aplicación en usos municipales (limpieza viaria, de contenedores y riego urbano en sustitución de aguas potables que requieren mayor tratamiento
- ✓ dado que el agua de salida de las depuradoras municipales de La Almozara y La Cartuja presenta unas características similares, se asume que el tratamiento es aplicable con idéntico resultado, a las aguas depuradas del municipio, con independencia de si las aguas que se pretenden regenerar se toman de una u otra depuradora
- ✓ se estima que se reutilizaría un volumen anual de 6902880 m³/año en riego de zonas verdes y de 330400 m³/año para baldeo y limpieza, cubriendo la totalidad de la demanda de agua que se utiliza en la ciudad para usos municipales
- ✓ el riego de parques y jardines públicos en Zaragoza se realiza mediante agua de pozo (96%) y de red (4%). Utilizando aguas regeneradas para riego urbano pueden sustituirse estos consumos, lo que contribuye a la protección del acuífero y a un ahorro de agua de la red de abastecimiento

- ✓ el sobredimensionamiento del 20% sobre el caudal anual aplicado en riego urbano adquiere sentido en previsión de atender nuevas demandas futuras para las aguas regeneradas, en una ciudad en plena expansión y desarrollo urbanístico
- ✓ el uso de las aguas regeneradas a nivel local soslaya la necesidad de disponer de nuevas fuentes de abastecimiento o retirar un caudal mayor de las ya disponibles, especialmente en el caso de Zaragoza, cuya fuente de recursos hídricos se encuentra lejos del lugar de consumo (abastecimiento desde el embalse de Yesa). Por tanto, la reutilización del agua residual depurada del municipio ofrece perspectivas de ahorro monetario. Asimismo, al no ser necesario un aumento del suministro, se produce un ahorro en inversiones de abastecimiento y necesidades de energía (nuevas conducciones y bombeos y necesidad de ampliación de las instalaciones de potabilización)

De acuerdo con los resultados obtenidos en el desarrollo del proyecto, queda demostrado que el agua residual de salida de las depuradoras de Zaragoza pueden ser empleadas, tras el tratamiento de regeneración propuesto, para su reutilización en riego de riego en zonas verdes y para el baldeo y limpieza de calles y contenedores

Por último, subrayar que se ha dejado en segundo plano el aspecto económico, centrando el proyecto en el diseño y dimensionamiento de las estructuras de regeneración y reutilización.

Por tanto, este trabajo puede tomarse como base tanto para un análisis profundo en materia de costes como para la implementación de modificaciones en el diseño que conduzcan a nuevas aplicaciones beneficiosas de las aguas residuales depuradas, como el riego agrícola o los usos industriales.

Capítulo 6.

Bibliografía

- ❖ APHA, AWWA and WEF (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 21th edition. Washington D.C.
- ❖ Ayuntamiento de Zaragoza (2009) *Agenda Local 21. Indicadores de sostenibilidad locales*. Concejalía del Medio Ambiente.
Disponible en:
<http://www.zaragoza.es/ciudad/medioambiente/agenda21/observatorio/indicadoreslocales.htm>
- ❖ Ayuntamiento de Zaragoza (2009) *Atlas de la Ciudad. Parte F: Zaragoza verde*.
Disponible en:
http://www.zaragoza.es/contenidos/Atlas_Zaragoza_2009/Atlas_A.pdf
- ❖ Ayuntamiento de Zaragoza (2008). *Observatorio Municipal de Estadística, 2008*.
Disponible en: <http://www.zaragoza.es/ciudad/estadistica/obsv8.htm>
- ❖ Ayuntamiento de Zaragoza (2007) *Texto Refundido del Plan General de Ordenación Urbana de Zaragoza*.
Disponible en:
<http://www.zaragoza.es/ciudad/urbanismo/planeamiento/pgouz/index.htm>
- ❖ Batanero Bernabeu, J. G. (CEDEX, 2008) *Implantación de tratamientos terciarios en España. Tipos y condiciones de funcionamiento*. IV Jornadas Técnicas de Saneamiento y Depuración. Tratamientos Avanzados para la Regeneración de Aguas Residuales (Murcia, 12 y 13 de noviembre de 2008).
Disponible en: <http://www.esamur.com:81/ponencias/ponencia70.pdf>
- ❖ Bulletin of the World Health Organization. Vol. 78 (9), pp. 1104-1116. September 2000.
Disponible en: <http://www.who.int/bulletin/archives/volume78/en/index.html>
- ❖ CONAMA (2006) *El proyecto LIFE OPTIMIZAGUA un modelo europeo de referencia para la gestión eficiente del agua*. Comunicación técnica de la Fundación CONAMA.
Disponible en:
<http://www.conama8.org/modulodocumentos/documentos/CTs/CT89.pdf>

- ❖ Consorci Sanitari de Barcelona. Agència de Salut Pública (2008) *Los trihalometanos (THMs) en el agua de consumo*.
Disponible en: http://www.aspb.es/quefem/docs/thms_esp.pdf
- ❖ Directiva del Consejo 91/271/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas. DOUE nº 135 de 30.05.1991, p.40-52
- ❖ Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas, de 23 de octubre de 2000 (Directiva Marco del Agua). DOUE nº 327 de 22.12.2000, p.1-73
- ❖ García, J. (Ayuntamiento de Zaragoza, 2006) *Las tarifas del agua como herramienta de gestión de la demanda en Zaragoza*. Convención Hidronómica 2006. Los costes y el precio del agua. (Barcelona, 13 y 14 de noviembre de 2006)
- ❖ Hassani Zerrouk, M. (2010) *Reutilización de Aguas Residuales, Disponibilidad y Posibles usos*. Jornada de Agua Agricultura y Medio Ambiente en la UE. Vélez Málaga 18 y 19 de Marzo 2010
- ❖ Hernández Sancho, F. (2009) *La reutilización de aguas regeneradas como fuente alternativa de recursos hídricos*. Curso Universitat de Gandía (julio, 2009): L'aigua: Reptes de Present i de Futur.
Diponible en: <http://www.uv.es/sala/Gandia/Hernandez.pdf>
- ❖ Instituto Nacional de Estadística, INE 2008. *Estadísticas e Indicadores del Agua*. Boletín Informativo del Instituto Nacional de Estadística (2008). ISSN: 1579-2277.
- ❖ Metcalf & Eddy, Inc. (1995) *Ingeniería de Aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización*. McGraw-Hill. 3ª edición. Nueva York
- ❖ Ministerio del Medio Ambiente (2007). *Memoria del Medio Ambiente en España 2006 Presentación e Índice. Balance de 2006*. NIPO: 310-07-075-6
- ❖ Ministerio del medio Ambiente (2007) *Plan Nacional de Calidad de las Aguas, Saneamiento y Depuración (2007-2015)*. Dirección general del Agua, Madrid
- ❖ Ministerio de Medio Ambiente, MARM (2009) *Plan Nacional de Reutilización de las Aguas Regeneradas. Documento Inicial: Evaluación Ambiental Estratégica del Plan Nacional de Reutilización de Aguas Regeneradas*
- ❖ Ministerio del medio Ambiente, MARM (2004). *Programa AGUA (Actuaciones para la Gestión y Utilización del Agua)*

- ❖ Mosquera Adell, M. N., Hidalgo Contioso, J. F. y Forjan Lozano, E. *Evaluación del contenido en trihalometanos en aguas de consumo de municipios pertenecientes a una misma zona de abastecimiento*. Revista electrónica Higiene y Sanidad Ambiental, vol. 9: 404-411 (2009)
Disponible en: <http://www.ugr.es/>
- ❖ Ordenanza Municipal para la Ecoeficiencia y la Calidad de la Gestión Integral del Agua. BOP Zaragoza nº 29 de 7 de febrero de 2011. *Anuncio relativo a la aprobación definitiva de la Ordenanza sobre la ecoeficiencia y la calidad en la gestión integral del agua*
- ❖ Ortega de Miguel, E. e Iglesias Esteban, R. (2008) *La reutilización de las aguas depuradas en España: normativa y tecnologías más utilizadas*. Retema: Revista técnica de medio ambiente, año 21, nº 124, pp. 8-24, (enero-febrero, 2008). ISSN: 1130-9881
- ❖ Ramos, C. (1997) *El uso de aguas residuales en riegos localizados y en cultivos hidropónicos*. Fórum Internacional de Horticultura y Tecnología. “La Automatización de la Hidroponía y Fertirrigación”, Valencia 14, 15 y 16 de octubre
- ❖ Real Decreto 865/2003, de 4 de julio, por el que se establecen los criterios higiénico-sanitarios para la prevención y control de la legionelosis. BOE nº 171 de 18.07.2003
- ❖ Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. BOE nº 45 de 21.02.2003
- ❖ Real Decreto 1620/2007 de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. BOE nº 294 de 8.12.2007
- ❖ Real Decreto 1621/2010, de 7 de diciembre, por el que se declaran oficiales las cifras de población resultantes de la revisión del padrón municipal referidas al 1 de enero de 2010. BOE nº 331 de 23.12.2010
- ❖ Rodríguez, M. J., Rodríguez, G., Serodes, J. et al. (2007) *Subproductos de la desinfección del agua potable: formación, aspectos sanitarios y reglamentación*. Interciencia, vol.32, no.11, pp.749-756. Caracas, noviembre 2008. ISSN 0378-1844
- ❖ Romero Tierno, C. (Fundación San Valero, 2006) *El Proyecto LIFE Optimizagua. Un modelo europeo de referencia para la gestión eficiente del agua*. Gobierno de La Rioja, Consejería de Turismo, Medio Ambiente y Política Territorial

- ❖ Romero Tierno, C. (2006) *I+D+i: agua, innovación y medio ambiente: el proyecto LIFE 'OPTIMIZAGUA' un modelo europeo de referencia para la gestión eficiente del agua*. Ambienta: la revista del Ministerio de Medio Ambiente, nº58. p. 66-69., Madrid, septiembre 2006. ISSN: 1577-9491
- ❖ Romero Tierno, C. (2008) *El proyecto LIFE OPTIMIZAGUA un modelo europeo de referencia para la gestión eficiente del agua en usos de riego*. Tribuna del Agua. Semana temática 2: Agua y Ciudad. Pautas de los gobiernos locales para la sostenibilidad. Zaragoza, del 25 al 28 de junio. Exposición Internacional 2008
Disponible en: http://www.zaragoza.es/contenidos/medioambiente/cajaAzul/S9-P1-Cesar_Romero-PPTACC.pdf
- ❖ Rougé, P. (2005) *Evaluación técnica y económica de las tecnologías de regeneración de aguas*. Jornadas Técnicas: La integración del agua regenerada en la gestión de los recursos. Lloret de Mar, Girona, Octubre de 2005
- ❖ Sarasa, J., Gracia, R., Cortés, S., Ormad, P. y Ovelleiro, J. L (1999) *Tratamientos oxidativos en la potabilización del agua: la ozonización catalítica como técnica complementaria a la cloración*. Tecnología del Agua, no. 188, p. 34-45, mayo 1999. ISSN 0211-8173
- ❖ Serrano, A. (2007) *Plan Nacional de Calidad de las Aguas: Saneamiento y Depuración (2007-2015)*. Ambienta: la revista del Ministerio de Medio Ambiente, nº69. p. 6-13. Madrid, septiembre 2007. ISSN: 1577-9491. NIPO: 310-07-002-7
- ❖ State of California (2000). *Title 22. Code of Regulations. Division 4: Environmental Health. Chapter 3. Water Recycling Criteria*. Dept. of Health Services. Sacramento, California
- ❖ State of California (2001). *The Purple Book. Health Laws Related to Recycled Water*. Dept. of Health Services. Division of Drinking Water and Environmental Management. California (USA)
- ❖ USEPA. (2004). *Guidelines for Wastewater Reuse*. US Environmental Protection Agency. EPA/625/R04/108. Washington, DC.
Disponible en: www.epa.gov/ORD/NRMRL/pubs/625r04108/625r04108.htm
<http://www.epa.gov/ORD/NRMRL/pubs/625r04108/625r04108chap4.pdf>
- ❖ Uche, J., Valero, V. y Serra, L. (2002) *La desalación y reutilización como recursos alternativos*. Colección Documentación Administrativa. Gobierno de Aragón. Zaragoza

- ❖ Water Environment Federation (1998) *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants*. WEF-ASCE. 4th Edition
- ❖ Yartu, M. (2008) *Agua nueva: retos y oportunidades*. Innovación y medio ambiente. Oportunidades y Realidades. Organizada por Acciona (SD-ACC), 2 de diciembre de 2008

ANEXO A

NORMATIVA

A.1. Criterios de calidad microbiológica recomendados por la OMS para la reutilización de las aguas residuales

En la tabla A.1 se presentan las directrices de calidad propuestas por la OMS para el riego agrícola con aguas recicladas.

Tabla A.1. Recomendaciones revisadas de calidad microbiológica de aguas recicladas para riego agrícola^a (OMS, 2000)

Categoría	Uso	Grupo expuesto	Técnica de irrigación	Nemátodos ^b (huevos/l)	Coliformes fecales por 100 ml ^c (UFC/100 ml)	Tratamiento necesario
A	Riego de cultivos para consumo en crudo, campos de deporte, parques públicos ^e	Trabajadores, consumidores, usuarios	Cualquiera	$\leq 0,1^f$	$\leq 10^3$	En lagunas de estabilización, o tratamiento secundario seguido por filtración y desinfección, o tratamiento equivalente
B	Riego de cereales, frutales, forrajes y cultivos industriales ^g	Trabajadores (pero no menores de 15 años expuestos) y comunidades cercanas	Aspersión o Sprinkler	≤ 1	$\leq 10^5$	En lagunas de estabilización, incluida una de maduración, o tratamiento secundario seguido por filtración, o tratamiento equivalente
		Trabajadores (pero no menores de 15 años expuestos) y comunidades cercanas	Inundación	≤ 1	$\leq 10^3$	Como en la categoría A
		Trabajadores y comunidades cercanas	Cualquiera	$\leq 0,1$	$\leq 10^3$	Como en la categoría A
C	Riego localizado de los cultivos de la categoría B si no hay exposición de trabajadores y público	Nadie	Riego por goteo, por fuente	No aplicable	No aplicable	Pretratamientos necesarios para la tecnología de riego; al menos, decantación primaria
(a) Las recomendaciones tienen que ser modificadas cuando las condiciones particulares locales, tanto técnicas como socioculturales, ambientales o epidemiológicas, lo aconsejen						
(b): Ascaris, Trichuris y protozoos parásitos (c): Durante el periodo de riego no se necesita monitorizar la calidad si las lagunas están diseñadas para lograr este número de huevos (d): Durante el periodo de riego es recomendable el recuento semanal de coliformes fecales, como mínimo se realizará mensualmente (e) tiene que tomarse un valor más exigente (≤ 200 UFC/100 ml) en el caso de riego de jardines públicos en los que las personas puedan tener contacto directo con el agua (f): El límite puede situarse en ≤ 1 huevo/l si (i) si las condiciones son cálidas y secas y no se usa irrigación superficial o (ii) si el tratamiento requerido se complementa con quimioterapia antihelmíntica en las áreas de reutilización (g): En el caso de frutales el riego ha de parar dos semanas antes de la recolección, rechazando los frutos caídos al suelo. No tiene que utilizarse para la aspersión.						

Fuente: Bulletin of the World Health Organization (2000)

A.2. Directrices propuestas por la USEPA para la reutilización del agua

En la tabla A.2 se han seleccionado algunas guías sugeridas por USEPA (2004) para la reutilización del agua depurada. Estas guías se complementan con recomendaciones para el seguimiento de la calidad del agua, establecimiento de distancias mínimas y observaciones específicas para cada parámetro y reuso.

Tabla A.2. Directrices propuestas por la USEPA en función de la categoría de reutilización

USOS		Calidad del agua	Tratamiento
URBANO	No restringido	pH = 6.9 DBO ₅ ≤ 10 ppm Turbidez ≤ 2 NTU E. coli: no detectable Cl ₂ residual > 1 ppm	Secundario Filtración Desinfección
	Restringido	pH = 6.9 DBO ₅ ≤ 30 ppm SS < 30 ppm E. coli ≤ 200 UFC/100 ml Cl ₂ residual > 1 ppm	Secundario Desinfección
RIEGO AGRÍCOLA	Consumo humano	pH = 6.9 DBO ₅ ≤ 10 ppm Turbidez ≤ 2 NTU E. coli: no detectable Cl ₂ residual > 1 ppm	Secundario Filtración Desinfección
	Consumo no humano Consumo humano después de procesado	pH = 6.9 DBO ₅ < 30 ppm SS < 30 ppm E. coli ≤ 200 UFC/100 ml Cl ₂ residual > 1 ppm	Secundario Desinfección
RECREATIVO	No restringido	pH = 6.9 DBO ₅ ≤ 10 ppm Turbidez ≤ 2 NTU E. coli: no detectable Cl ₂ residual > 1 ppm	Secundario Filtración Desinfección
	Restringido	DBO ₅ ≤ 30 ppm SS < 30 ppm E. coli ≤ 200 UFC/100 ml Cl ₂ residual > 1 ppm	Secundario Desinfección
MEDIOAMBIENTAL		DBO ₅ ≤ 30 ppm SS < 30 ppm E. coli ≤ 200 UFC/100 ml Cl ₂ residual > 1 ppm	Secundario Desinfección (como mínimo, varía según el caso)
RECARGA DE ACUÍFEROS		Requisitos variables según el sitio específico y en función del uso	Depende del uso y del tratamiento
INDUSTRIAL		Requisitos variables según el tipo de industria y el uso	Secundario Desinfección Puede requerir coagulación y filtración (en usos de refrigeración)
INDIRECTO COMO AGUA POTABLE		Estandares de agua potable	Secundario Desinfección Filtración/tratamiento avanzado

Fuente: Adaptado de "Guidelines for Water Reuse US Environmental Protection Agency

A.3. Normativa del Estado de California

En la tabla A.3 se muestran los criterios del Estado de California para el riego con aguas residuales.

Tabla A.3. Guía de calidad microbiológica y criterios para riego con aguas residuales en el Estado de California (1978)

Aplicación	Técnica de riego	Coliformes totales o fecales ^b (UFC/100 ml)	Tratamiento recomendado
Riego de cultivos para consumo en crudo	Aspersión	< 2.2 ^a	Tratamiento secundario, coagulación, clarificación, filtración y desinfección
Riego de cultivos para consumo en crudo	Superficial	< 2.2 ^a	Tratamiento secundario y desinfección
Frutales y viñedos	Superficial	No se fija límite	Tratamiento primario
Forraje, producción de fibras y semillas	Superficial o aspersión	No se fija límite	Tratamiento primario
Pastos para animales productores de leche	Superficial o aspersión	< 23 ^a	Tratamiento secundario y desinfección
Campos de golf, cementerios, medianas de autopista y otros elementos paisajísticos con similar acceso público	Superficial o aspersión	< 23 ^{a, c}	Tratamiento secundario y desinfección
Parques, jardines públicos, patios de colegio y otras áreas con similar acceso público	Superficial o riego	< 2.2 ^a	Tratamiento secundario, coagulación, clarificación, filtración y desinfección

^aLos criterios de regeneración de aguas de California están expresados como la media del número de coliformes totales por 100 cm³, como se deriva de los resultados de los análisis microbiológicos de los últimos 7 días.

^bLa concentración de coliformes no debe exceder de 23 en 100 cm³ en más de una muestra durante un periodo de 30 días.

^dLa concentración de coliformes no debe exceder de 240 en 100 cm³ en más de una muestra durante un periodo de 30 días.

Fuente: California Health Laws, 2001

A.4. Real Decreto 1620/2007, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas

Los criterios de calidad para la reutilización de las aguas según los usos aparecen en el anexo 1.A del RD 1620/2007, que se muestra en la figura A.4.

El documento completo puede consultarse en el BOE número 294 con fecha del sábado 8 de diciembre de 2007.

USO DEL AGUA PREVISTO	VALOR MÁXIMO ADMISIBLE (VMA)				
	NEMATODOS INTESTINALES ¹	ESCHERICHIA COLI	SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN	TURBIDEZ	OTROS CRITERIOS
1.- USOS URBANOS					
CALIDAD 1.1: RESIDENCIAL ² a) Riego de jardines privados. ³ b) Descarga de aparatos sanitarios. ³	1 huevo/10 L	0 (UFC ⁴ /100 mL)	10 mg/L	2 UNT ⁵	OTROS CONTAMINANTES ⁶ contenidos en la autorización de vertido aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas ⁷ deberá asegurarse el respeto de las NCAs. ⁸
CALIDAD 1.2: SERVICIOS a) Riego de zonas verdes urbanas (parques, campos deportivos y similares). ⁹ b) Baldeo de calles. ⁹ c) Sistemas contra incendios. ⁹ d) Lavado industrial de vehículos. ⁹	1 huevo/10 L	200 UFC/100 mL	20 mg/L	10 UNT	<i>Legionella spp.</i> 100 UFC/L (si existe riesgo de aerosolización)

USO DEL AGUA PREVISTO	VALOR MÁXIMO ADMISIBLE (VMA)				
	NEMATODOS INTESTINALES	ESCHERICHIA COLI	SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN	TURBIDEZ	OTROS CRITERIOS
2.- USOS AGRÍCOLAS¹					
CALIDAD 2.1 ² a) Riego de cultivos con sistema de aplicación del agua que permita el contacto directo del agua regenerada con las partes comestibles para alimentación humana en fresco.	1 huevo/10 L	100 UFC/100 mL Teniendo en cuenta un plan de muestreo a 3 clases ³ con los siguientes valores: n = 10 m = 100 UFC/100 mL M = 1.000 UFC/100 mL c = 3	20 mg/L	10 UNT	OTROS CONTAMINANTES contenidos en la autorización de vertido de aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs. <i>Legionella spp.</i> 1.000 UFC/L (si existe riesgo de aerosolización) Es obligatorio llevar a cabo la detección de patógenos Presencia/Ausencia (<i>Salmonella</i> , etc.) cuando se repita habitualmente que c=3 para M=1.000

USO DEL AGUA PREVISTO	VALOR MÁXIMO ADMISIBLE (VMA)				
	NEMATODOS INTESTINALES	ESCHERICHIA COLI	SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN	TURBIDEZ	OTROS CRITERIOS
CALIDAD 2.2 a) Riego de productos para consumo humano con sistema de aplicación de agua que no evita el contacto directo del agua regenerada con las partes comestibles, pero el consumo no es en fresco sino con un tratamiento industrial posterior. b) Riego de pastos para consumo de animales productores de leche o carne. c) Acuicultura.	1 huevo/10 L	1.000 UFC/100 mL Teniendo en cuenta un plan de muestreo a 3 clases ³ con los siguientes valores: n = 10 m = 1.000 UFC/100 mL M = 10.000 UFC/100 mL c = 3	35 mg/L	No se fija límite	OTROS CONTAMINANTES contenidos en la autorización de vertido aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs. <i>Taenia saginata</i> y <i>Taenia solium</i> : 1 huevo/L (si se riegan pastos para consumo de animales productores de carne) Es obligatorio llevar a cabo detección de patógenos Presencia/Ausencia (<i>Salmonella</i> , etc.) cuando se repita habitualmente que c=3 para M=10.000
CALIDAD 2.3 a) Riego localizado de cultivos leñosos que impida el contacto del agua regenerada con los frutos consumidos en la alimentación humana. b) Riego de cultivos de flores ornamentales, viveros, invernaderos sin contacto directo del agua regenerada con las producciones. c) Riego de cultivos industriales no alimentarios, viveros, forrajes ensilados, cereales y semillas oleaginosas.	1 huevo/10 L	10.000 UFC/100 mL	35 mg/L	No se fija límite	OTROS CONTAMINANTES contenidos en la autorización de vertido aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs. <i>Legionella spp.</i> 100 UFC/L

USO DEL AGUA PREVISTO	VALOR MÁXIMO ADMISIBLE (VMA)				
	NEMATODOS INTESTINALES	ESCHERICHIA COLI	SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN	TURBIDEZ	OTROS CRITERIOS
3.- USOS INDUSTRIALES					
CALIDAD 3.1¹ a) Aguas de proceso y limpieza excepto en la industria alimentaria. b) Otros usos industriales.	No se fija límite	10.000 UFC/100 mL	35 mg/L	15 UNT	OTROS CONTAMINANTES contenidos en la autorización de vertido aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs. <i>Legionella spp.</i> : 100 UFC/L
c) Aguas de proceso y limpieza para uso en la industria alimentaria	1 huevo/10 L	1.000 UFC/100 mL Teniendo en cuenta un plan de muestreo a 3 clases ² con los siguientes valores: n = 10 m = 1.000 UFC/100 mL M = 10.000 UFC/100 mL c = 3	35 mg/L	No se fija límite	OTROS CONTAMINANTES contenidos en la autorización de vertido aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs. <i>Legionella spp.</i> : 100 UFC/L Es obligatorio llevar a cabo detección de patógenos Presencia/Ausencia (<i>Salmonella</i> , etc.) cuando se repita habitualmente que c=3 para M=10.000
CALIDAD 3.2 a) Torres de refrigeración y condensadores evaporativos.	1 huevo/10 L	Ausencia UFC/100 mL	5 mg/L	1 UNT	<i>Legionella spp.</i> : Ausencia UFC/L Para su autorización se requerirá: - La aprobación, por la autoridad sanitaria, del Programa específico de control de las instalaciones contemplado en el Real Decreto 865/2003, de 4 de julio, por el que se establecen los criterios higiénico-sanitarios para la prevención y control de la legionelosis. - Uso exclusivamente industrial y en localizaciones que no estén ubicadas en zonas urbanas ni cerca de lugares con actividad pública o comercial.

USO DEL AGUA PREVISTO	VALOR MÁXIMO ADMISIBLE (VMA)				
	NEMATODOS INTESTINALES	ESCHERICHIA COLI	SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN	TURBIDEZ	OTROS CRITERIOS
4.- USOS RECREATIVOS					
CALIDAD 4.1¹ a) Riego de campos de golf.	1 huevo/10 L	200 UFC/100 mL	20 mg/L	10 UNT	OTROS CONTAMINANTES contenidos en la autorización de vertido aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs. Si el riego se aplica directamente a la zona del suelo (goteo, microaspersión) se fijan los criterios del grupo de Calidad 2.3 <i>Legionella spp.</i> : 100 UFC/L (si existe riesgo de aerosolización)
CALIDAD 4.2 a) Estanques, masas de agua y caudales circulantes ornamentales, en los que está impedido el acceso del público al agua.	No se fija límite	10.000 UFC/100 mL	35 mg/L	No se fija límite	OTROS CONTAMINANTES contenidos en la autorización de vertido aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs. P _T : 2 mg P/L (en agua estancada)

USO DEL AGUA PREVISTO	VALOR MÁXIMO ADMISIBLE (VMA)				
	NEMATODOS INTESTINALES	ESCHERICHIA COLI	SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN	TURBIDEZ	OTROS CRITERIOS
5.- USOS AMBIENTALES					
CALIDAD 5.1 a) Recarga de acuíferos por percolación localizada a través del terreno.	No se fija límite	1.000 UFC/100 mL	35 mg/L	No se fija límite	N _T ¹ : 10 mg N/L NO ₃ : 25 mg NO ₃ /L
CALIDAD 5.2 a) Recarga de acuíferos por inyección directa.	1 huevo/10 L	0 UFC/100 mL	10 mg/L	2 UNT	Art. 257 a 259 del RD 849/1986
CALIDAD 5.3 a) Riego de bosques, zonas verdes y de otro tipo no accesibles al público. b) Silvicultura.	No se fija límite	No se fija límite	35 mg/L	No se fija límite	OTROS CONTAMINANTES contenidos en la autorización de vertido aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs.
CALIDAD 5.4 a) Otros usos ambientales (mantenimiento de humedales, caudales mínimos y similares).	La calidad mínima requerida se estudiará caso por caso				

Figura A.4

Fuente: Extraído del RD 1620/2007 (BOE, 2007)

A.5. Concentración de cloro residual indicada para distintos usos del agua

Las concentraciones de cloro residual recomendadas varían ligeramente según el uso que se vaya a dar al efluente.

Tabla A.5. Concentración de cloro residual indicada para distintos usos del agua

TIPO DE APLICACIÓN	DOSIS RECOMENDADA (mg Cl ₂ /l)
RIEGO (Ramos, 1997)	0,5-1,0
AGUAS POTABLES (RD 140/2003)	1,0
PREVENCIÓN LEGIONELLA (RD 865/2003)	0,2-1,0 (según casos)

Fuente: elaboración propia, a partir de la legislación

Así, para usos de riego la dosis recomendada de cloro residual (0,5-1,0 mg/l) previene el crecimiento bacteriano sin afectar a los cultivos. En el caso de las aguas potables, una concentración de cloro libre residual superior a 1,5 mg Cl₂/l confiere mal olor y sabor al agua, y puede irritar los ojos y afectar a los tejidos.

A.6. Ordenanza Municipal para la Ecoeficiencia y la Calidad de la Gestión Integral del Agua

La redacción de esta ordenanza surge a raíz de la necesidad de adaptar la Directiva Marco del Agua de la Unión Europea a la gestión, incorporando en un mismo texto la normativa existente en otras administraciones (Unión Europea, Gobierno Central o Diputación General de Aragón). Se recoge de esta forma la totalidad de las prescripciones relativas a la gestión del agua en el municipio de Zaragoza, sistematizando los criterios aplicables a todas las fases del ciclo y estableciendo con precisión derechos y obligaciones para todos los estamentos que intervienen en el proceso.

El primer objetivo marcado es el acceso a los servicios del Ciclo Integral del Agua dentro del término municipal en condiciones óptimas de calidad y cantidad. Aplica criterios de sostenibilidad ambiental orientados hacia ahorro del recurso y el aumento de la eficiencia. Asimismo obliga a adoptar determinados hábitos, mecanismos e instalaciones, tras contrastar su eficacia y eficiencia a través de diferentes experiencias piloto.

La Ordenanza se inspira en los principios de:

- Sostenibilidad, para tender a una disminución progresiva de los consumos, a la eficiencia en el uso de los recursos naturales y al mantenimiento del sistema hídrico para asegurar su preservación
- de servicio público, para prestar los servicios a la colectividad en las mejores condiciones
- de sistema integral, teniendo en cuenta los aspectos medioambientales, económicos, administrativos, técnicos y legales de la gestión
- de sistema urbano, señalando que las actuaciones deben ser integradas y coordinadas con la planificación urbana

Así, señala que las intervenciones que deban hacerse en el futuro para mantener y mejorar las infraestructuras, para modificar los hábitos en el uso del agua, para mejorar la eficiencia en la utilización de los recursos disponibles o para reutilizar las aguas depuradas se concretarán en un Plan Marco de futura redacción y se articularán en programas sectoriales de infraestructuras, de gestión de la demanda, de ahorro y eficiencia, de adecuación de la calidad al uso y de previsión de desabastecimiento.

Reducir los consumos

Se pone énfasis en potenciar medidas de ahorro. Estas normas serán de obligado cumplimiento en viviendas de nueva creación y en las que se sometan a una rehabilitación integral. Como aspectos más destacables cabe señalar:

- aprovechamiento de los recursos hídricos alternativos para el riego, la descarga de cisternas, el baldeo de calles u otros usos similares, que están sujetos a unas condiciones de calidad adaptadas para el uso, pero menos exigentes que las que rigen para el agua de boca. Este tipo de depósitos deberán ser independientes de la red y nunca dedicarse al consumo humano
- adopción de mecanismos ahorradores de acuerdo a las nuevas tecnologías disponibles, que permitan economizar agua (temporizadores de cierre y limitaciones de descarga en grifos de uso público, inodoros con doble descarga o con volumen máximo de 6 litros, limitaciones en los procesos de lavado de vehículos)
- sistema de reutilización del agua de nuevas piscinas públicas o privadas con capacidad superior a 200 m³, evitando que se pierda en los colectores municipales y posibilitando su uso como recurso alternativo
- evitar el uso de agua potable en el baldeo de calles, recurriendo al uso de aguas pluviales o a la reutilización de aguas residuales
- ahorro del recurso en los parques, limitando la superficie de césped en favor de especies de menor consumo de agua, aumentando las zonas de árboles o plantas tapizantes e incorporando recubrimientos al suelo que impidan la evaporación, así como la implantación de sistemas de riego más eficientes y el control de la humedad del suelo y la frecuencia y horarios de riego
- obligación de renovar anualmente un porcentaje suficiente de las infraestructuras y de avisar a los afectados de los cortes del servicio con 24 horas de antelación como mínimo y dando difusión al aviso

Derechos y deberes

Se especifican en el texto los derechos y deberes tanto de la administración como de los beneficiarios del servicio.

Tarifas

Se deben cumplir criterios de suficiencia (que los ingresos recuperen los costes del servicio) y equidad (el coste debe ser proporcional al beneficio). Además, se asegura el acceso universal a un servicio de agua básico a precios asequibles y se aplica la máxima de que “quien contamina, paga”, tanto por exceso de consumo como por carga contaminante.

Vertidos

Se establecen los tipos y concentraciones admisibles de contaminantes, las actuaciones de emergencia y la concesión de autorizaciones de vertido tanto para aguas residuales domésticas como industriales. Todo ello, con el fin de garantizar el buen funcionamiento de las depuradoras y la mejora de la calidad de las aguas del río Ebro.

Prevención de inundaciones y cambio climático

Aporta recomendaciones para los edificios de nueva construcción con el fin de prevenir inundaciones en los puntos bajos. El Ayuntamiento de Zaragoza se compromete a desarrollar medidas de protección frente a las avenidas de los ríos, así como acciones en los aliviaderos de la red de alcantarillado para evitar la entrada del agua del río en la red.

Derecho a la información

La información sobre la gestión del agua debe estar disponible en la página web municipal, disponiendo también los abonados de información clara y sencilla acerca de la facturación. Además, deben promoverse campañas educativas y de sensibilización orientadas al uso racional del agua y se debe informar a los ciudadanos de los mecanismos de ahorro en las viviendas.

Criterios técnicos

Se especifican las condiciones técnicas que deben regir en los bombeos de agua, almacenamiento, cloración, tanques de tormentas, requisitos de las instalaciones, contadores, características de los mecanismos ahorradores y pormenorizan los datos para tramitar solicitudes de alta y baja del servicio, tipologías de usos, consumos medios en función del calibre y uso de las conducciones, limitaciones de vertido, etc.

Igualmente debe destacarse que los sistemas recogidos en la Ordenanza suponen una importante evolución para lograr que la gestión se lleve a cabo en condiciones de máxima eficiencia energética.

Los aspectos técnicos más destacables son los siguientes:

- obligación de prever en las nuevas urbanizaciones redes de distribución con calidades de agua diferenciadas en función del uso a que se destina el agua contenida en ellas
- redes separativas de alcantarillado en las nuevas urbanizaciones, para evitar la contaminación del medio natural por vertido de aguas residuales que se produce en redes unitarias en momentos de lluvias intensas. Esto permite un funcionamiento más estable de las depuradoras
- medición individualizada por vivienda del consumo de agua potable
- batería doble de contadores
- criterios para el diseño de depósitos de regulación e instalaciones de bombeo y refuerzo de la cloración
- criterios de diseño para tanques de tormenta y depósitos de laminación que constituyen elementos que cada vez van a ser más utilizados para evitar vertidos contaminantes al medio natural y para evitar inundaciones en momentos de lluvia intensa
- contadores de tipo electrónico, con telelectura desde la fachada del edificio en el que están instalados

Sanciones

- Hasta 750 euros por infracciones leves: emplear el agua en otros usos de los consignados en la póliza (por ejemplo, el agua de boca para riego) o ceder el uso a favor de un tercero
- De 750 a 1.500 euros por infracciones graves: vertidos que carezcan de autorización, obstaculizar las inspecciones de los técnico municipales negándoles el acceso a la vivienda y la reincidencia en dos infracciones leves
- De 1.500 a 3.000 euros: contadores digitales que avisan de fugas y exceso de consumo

ANEXO B
**PRINCIPALES ACTUACIONES DE
REUTILIZACIÓN A NIVEL NACIONAL**

En la tabla B de este anexo se recogen algunas de las actuaciones de mayor importancia a nivel nacional en cuanto a reutilización de las aguas residuales.

Tabla B. Principales actuaciones de reutilización en España

Situación	Volumen anual (hm ³)	Tratamiento	Aplicación
Alicante	3 2,8	EDAR El Rincón del León EDAR Monte de Orgegia	Riego y campos de golf
Baleares (total)	25,85 (32% ARU)	Varios	Varios
Bajo Llobregat	66	Desinfección	Varios (proyecto)
Campo Dalias (Almería)	9	MF + OI	Riego
Canarias (total)	20,18 (38% ARU)	Varios	Varios
Cartagena	6,5	Lagunaje profundo	
Chiclana (Cádiz)	2,2	FQ + Cloración	Campos de golf y usos municipales
Costa del Sol	5,5	—	Campos de golf
Gran Canaria (total)	8,4	—	Riego
Lanzarote (total)	3,8	—	Zonas verdes y riego
Madrid	8	FQ + UV	Zonas verdes
Matalascañas	3,5	FQ + UV	Ambiental
Murcia	11,1	—	Riego
Pulpi (Almería)	1,5	FQ + MF + OI	Riego
Valencia	25	EDAR Pinedo	Riego
Valencia	14,6	UV	Riego
Valle San Lorenzo (Tenerife)	8,7	Filtro + EDR + Cloración	Riego
Vilaseca-Salou	6,1	FQ + Cloración	Zonas verdes
Vitoria-Gasteiz	2,5	FQ	Riego
Vitoria-Gasteiz (2ª fase)	25,5	—	Riego y ambiental

Fuente: Uche et al. (2002)

ANEXO C

PRINCIPALES CONTAMINANTES DE LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS Y PROBLEMAS DERIVADOS DE SU PRESENCIA EN EL AGUA

En este anexo se presenta la tabla C como resumen de los principales contaminantes presentes en el agua residual, así como de los posibles tratamientos de eliminación.

Tabla C. Principales contaminantes de las ARU tratadas y problemas derivados de su presencia en las aguas

Contaminante	Consecuencias	Operación unitaria, proceso unitario o sistema de tratamiento	
SS/MES y coloidales	<ul style="list-style-type: none"> Deposiciones de sólidos Fermentaciones Disminución de la transparencia de las aguas receptoras (turbiedad) 	<ul style="list-style-type: none"> Desbaste y aireación Desarenado Sedimentación Filtración 	<ul style="list-style-type: none"> Flotación Adición de polímeros o reactivos químicos Coagulación/ sedimentación Sistemas naturales (evacuación al terreno)
Materia orgánica biodegradable	<ul style="list-style-type: none"> Proliferación biológica (algas y microorganismos) Aumento en la demanda de cloro Aumento en la demanda de oxígeno (pueden agotarse las reservas de oxígeno disponible) 	<ul style="list-style-type: none"> Fangos activados Película fija (filtros bacterianos, biodiscos, biocilindros) Lagunaje 	<ul style="list-style-type: none"> Humedales artificiales Filtración intermitente en arena Infiltración al terreno Sistemas físico-químicos
Metales pesados y otros contaminantes prioritarios	<ul style="list-style-type: none"> Tóxicos para el hombre; carcinógenos Tóxicos para el entorno acuático (desequilibrios en la cadena trófica) 	<ul style="list-style-type: none"> Precipitación química Intercambio iónico Sistemas de tratamiento por evacuación al terreno 	
Compuestos orgánicos volátiles (COVs)	<ul style="list-style-type: none"> Tóxicos para el hombre; carcinógenos Forman oxidantes fotoquímicos (smog) 	<ul style="list-style-type: none"> Arrastre por aire Tratamiento de gases Adsorción en carbón activo 	
Nutrientes <ul style="list-style-type: none"> NH_3 (NH_4^+) 	<ul style="list-style-type: none"> Proliferación biológica Aumento en la demanda de cloro (formación de cloraminas) Puede transformarse en NO_3^- y agotar los recursos de oxígeno Tóxico para peces Corrosión en aleaciones de cobre 	<ul style="list-style-type: none"> Cultivo en suspensión con nitrificación y desnitrificación Cultivo en película fija con nitrificación y desnitrificación Arrastre de NH_3 (stripping) Adición de sales metálicas Coagulación y sedimentación Eliminación biológica de nutrientes Intercambio iónico Cloración al breakpoint Sistemas naturales por evacuación al terreno 	
NO_3^-	<ul style="list-style-type: none"> Proliferación biológica Riesgos para la salud pública (metahemoglobinemia) 	<ul style="list-style-type: none"> Eliminación biológica de fósforo Eliminación bioquímica de fósforo Sistemas naturales por evacuación al terreno 	
PO_4^{3-}	<ul style="list-style-type: none"> Proliferación biológica Interfiere con la coagulación Interfiere con el ablandamiento cal-sosa 		
Patógenos	<ul style="list-style-type: none"> Riesgos para la salud pública Ensuciamiento de superficies 	<ul style="list-style-type: none"> Cloración, hipocloración Cloruro de bromo Ozonización 	<ul style="list-style-type: none"> Radiación UV Lechos filtrantes (sistema natural) Membranas
Compuestos no biodegradables, incluyendo microcontaminantes (materia orgánica refractaria)	<ul style="list-style-type: none"> Los agentes tensioactivos generan espumas y pueden interferir en la coagulación Aumento en la demanda de cloro u ozono (organoclorados) Riesgos para la salud pública 	<ul style="list-style-type: none"> Oxidación química Adsorción en carbón activo Ozonización terciaria 	<ul style="list-style-type: none"> Sistemas naturales por evacuación al terreno Ultrafiltración Nanofiltración
**Otros compuestos inorgánicos (sólidos inorgánicos disueltos) <ul style="list-style-type: none"> Ca^{++} y Mg^{++} Cl^- SO_4^{2-} 	<ul style="list-style-type: none"> Aumento de la dureza y los sólidos disueltos Imparte sabor salado Interfiere en usos agrícolas e industriales Acción corrosiva 	<ul style="list-style-type: none"> Intercambio iónico Precipitación química Ultrafiltración 	<ul style="list-style-type: none"> Osmosis inversa Electrodialisis

**La salinidad provoca corrosión y destrucción de la estructura del suelo agrícola

Fuente: Adaptado de Metcalf & Eddy, INC. (1995). Ingeniería de Aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. McGraw-Hill. Tercera edición

Estos tratamientos se aplican suponiendo que se parte de un efluente secundario, sometido a tratamiento biológico y sedimentación posterior, es decir, de un efluente procedente de una depuradora convencional.

ANEXO D
PARTE EXPERIMENTAL

D.1. Ensayo de Jar Test. Descripción de la instalación

El equipo utilizado en este ensayo (figura D.1) consta de una serie de recipientes de vidrio colocados sobre una base translúcida iluminada desde abajo. Cada recipiente incorpora un agitador de paleta accionado por un motor de velocidad variable, para permitir tanto la coagulación (agitación rápida), como la floculación (agitación lenta). Los agitadores pueden extraerse fácilmente para poder retirar y limpiar los recipientes de ensayo.



Figura D.1. Equipo de Jar Test

En todos los casos se procede de la forma descrita a continuación.

1. En cada uno de los vasos de precipitados de 1 l, se añaden 300 ml de muestra y los reactivos necesarios en cada caso:
 - ✓ adición de la dosis correspondiente de coagulante
 - ✓ adición de ácido o base para ajustar el pH
 - ✓ adición de polielectrolito
2. Se colocan los vasos en el aparato de jarras. Para el ensayo de coagulación-floculación en el Jar-Test, se procede de la siguiente forma:
 - ✓ Mezcla rápida (coagulación): agitar a 200 rpm durante 3 minutos
 - ✓ Mezcla lenta (floculación): agitar a 40 rpm durante 15 minutos
 - ✓ Sacar los agitadores y dejar en reposo (sedimentación) durante 10 minutos, midiendo la velocidad de decantación si es posible. Una vez transcurrido ese tiempo, medir el volumen de fangos generado.
3. Medir el pH, conductividad y COT del líquido clarificado en cada caso.
4. Determinar el parámetro óptimo de operación objetivo de cada serie de ensayos.

D.2. Reactivos empleados en el tratamiento de coagulación-floculación

Coagulantes

Se trata de electrolitos, generalmente sales de hierro y aluminio, que sufren un proceso de hidrólisis al añadirlos al agua, liberando iones positivos capaces de atraer a las partículas coloidales y neutralizar su carga, o dando lugar a la formación de productos de baja solubilidad que precipitan arrastrando los coloides.

Las características de los coagulantes empleados en el análisis (figura D.2.1) se exponen a continuación:

- ✓ dKfloc RI-105: compuesto de hierro poco prepolimerizado, densidad $\cong 1,2$ g/ml
- ✓ dKfloc RI-125: compuesto de hierro bastante prepolimerizado, densidad $\cong 1,2$ g/ml
- ✓ dKfloc RI-605: compuesto de aluminio poco prepolimerizado, densidad $\cong 1,2$ g/ml
- ✓ dKfloc RI-625: compuesto de aluminio algo prepolimerizado, densidad $\cong 1,2$ g/ml
- ✓ WAC: policlorosulfato básico de aluminio, densidad $\cong 1,2$ g/ml
- ✓ SAMO-64: polisulfato de aluminio, densidad $\cong 1,33$ g/ml, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 8,6 \%$, basicidad = $0,68 \%$
- ✓ PAX-18: policloruro de aluminio, densidad $\cong 1,3$ g/ml, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 16,8 \%$, basicidad relativa = $0,68 \%$
- ✓ FeCl_3 : cloruro de hierro (III), densidad $\cong 1,40$ g/ml, $\text{Fe}^{+3} = 14,7 \%$
- ✓ Ferriclar: análogo al FeCl_3 , densidad $\cong 1,56$ g/ml, $\text{Fe}^{+3} = 13 \%$
- ✓ Sal 8.2: sulfato de aluminio, densidad $\cong 1,32$ g/ml, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 8,2 \%$
- ✓ IDT-680: policlorosulfato básico de aluminio, densidad $\cong 1,2$ g/ml, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 10 \%$



Figura D.2.1. Coagulantes

Floculantes (polielectrolitos)

Los floculantes son polímeros de cadena larga y elevado peso molecular, con gran afinidad por las superficies sólidas. Estas macromoléculas se fijan por adsorción a las partículas y provocan así la floculación por formación de puentes interpartículas.

Como agentes coagulantes, en el ensayo se utilizaron los siguientes polielectrolitos, que se muestran en la figura D.2.2:

- ✓ Magnafloc 1017 (aniónico)
- ✓ Magnafloc 155 (aniónico)
- ✓ Magnafloc 7027 (no-iónico)
- ✓ Zetag 50 (catiónico)
- ✓ Zetag 47 (catiónico)



Figura D.2.2. Floculantes

D.3. Parámetros indicadores de la eficiencia del proceso de coagulación-floculación-decantación

1. Medida de la velocidad de sedimentación

La medida de este parámetro se realiza tomando datos de la altura frente al tiempo de las partículas sedimentables durante el periodo de reposo. Al representar estos datos en una gráfica, la pendiente de la curva en el tramo inicial se corresponde con la velocidad de sedimentación.

2. Volumen de lodos

Se calcula midiendo la altura de los fangos generados después de la sedimentación. El diámetro de los vasos utilizados es de 9,5 cm, por lo que el volumen de lodos se calcula según la fórmula siguiente:

$V \text{ (cm}^3\text{/l de muestra)} = \text{altura de lodos (cm)} \times \pi \times (9,5^2/4) \times (1000/300)$, ya que se trabaja con 300 ml de muestra en cada caso.

3. Humedad de los lodos (Sólidos Suspendidos Totales)

Los lodos obtenidos en las condiciones óptimas establecidas para cada coagulante, una vez sedimentados, se filtran y se introducen en una estufa a 105 °C, hasta alcanzar un peso constante. Este valor, dividido entre el volumen de muestra indica la cantidad de sólidos suspendidos y se expresa como mg SST/l muestra. La humedad de los lodos se calcula de la forma indicada a continuación:

$\% \text{ humedad} = (\text{peso total} - \text{peso sin agua}) / \text{peso total}$

4. Contenido orgánico en los lodos (Sólidos Suspendidos Volátiles)

Una vez secos los lodos, se introducen en la mufla a 550 °C durante 15 minutos. Tras ese tiempo, se pesa el residuo, lo que corresponde a la parte no volátil de los lodos, identificada con la fracción inorgánica. Por tanto, la diferencia de peso con los lodos exentos de humedad, proporciona el peso de la fracción orgánica, lo que se expresa en mg de SSV/l de muestra. En ningún caso se detectó contenido orgánico en el residuo seco tras los ensayos de coagulación.

5. Medida del Carbono Orgánico Total

Se escoge este parámetro como medida de la eficacia de depuración del agua tras el tratamiento. El objeto de esta medida es la cuantificación de la materia orgánica presente en el agua, ya que las muestras presentan un bajo contenido orgánico, y la medida de la DQO no proporciona la información necesaria. El valor de este parámetro

representa el carbono orgánico total, medido durante la absorción en el infrarrojo, producido por la oxidación catalítica completa del carbono orgánico de la muestra. Esta medida presenta las mismas características que la DQO, y se puede realizar de forma más rápida y precisa. Para ello, se ha utilizado un equipo SHIMADZU, modelo TOC-V_{CSH}. Dicho equipo se muestra en la figura D.3.



Figura D.3. Equipo para la medida del COT

$$\% \text{ eliminación} = [(COT_{\text{inicial}} - COT_{\text{final}}) / COT_{\text{inicial}}] \times 100$$

D.4. Resultados de los ensayos de Jar Test para la optimización de la dosis de coagulante

En las tablas D.4.1 a D.4.4 se presentan los resultados de los ensayos con los coagulantes seleccionados a pH 6 y diferentes dosis.

Ensayos con FeCl₃

Tabla D.4.1. Resultados de FeCl₃ a pH = 6 en función de la dosis de coagulante

Concentración (ppm)	Velocidad de sedimentación (cm/min)	V _{lodos} (cm ³ /l de muestra)	Color de los lodos	pH final	Conductividad final (μS/cm)	Clarificación del agua	COT _{final} (mg/l)	% eliminación de COT
600	1,99	189	Naranja	7,22	1750	Agua transparente	5,4	29,87
400	2,58	142	Naranja	7,11	1750	Agua transparente	5,7	25,97
300	3,02	165	Naranja	6,93	1714	Agua transparente	5,7	25,97
200	2,55	177	Naranja	7,13	1724	Agua amarillenta	6,1	20,78
100	1,71	201	Naranja	7,09	1716	Agua amarillenta	5,6	27,27

Para este coagulante se escoge la dosis de 300 ppm como óptima, ya que es la menor concentración para la que se obtiene una disolución transparente. Por otra parte, el volumen de lodos es pequeño, y la velocidad de sedimentación es la más alta. El pH final del agua está, en todos los casos, dentro del rango permitido.

Si se observan los valores de COT para las disoluciones finales, se puede ver que el porcentaje de variación de este parámetro para las disoluciones transparentes, oscila entre el 25-30%, por lo que no es una diferencia demasiado relevante a la hora de decantarnos por una de las tres dosis, máxime si tenemos en cuenta el resto de los parámetros mencionados.

$COT_{\text{muestra bruta}} = 7,7 \text{ mg/l}$, para todos los casos

Ensayos con Ferriclar

Tabla D.4.2. Resultados de Ferriclar a pH = 6 en función de la dosis de coagulante

Concentración (ppm)	Velocidad de sedimentación (cm/min)	V _{lodos} (cm ³ /l de muestra)	Color de los lodos	pH final	Conductividad final (μS/cm)	Clarificación del agua	COT _{final} (mg/l)	% eliminación de COT
600	2,71	189	Naranja	7,18	1247	Agua transparente	3,9	49,35
400	2,76	165	Naranja	7,48	1280	Agua amarillenta	4,3	44,16
300	2,91	142	Naranja	6,94	1267	Agua amarillenta	4,5	41,56
200	1,37	142	Naranja	7,19	1244	Agua transparente	4,4	42,86
100	1,28	118	Naranja	8,14	1315	Agua amarillenta	5,4	29,87

La dosis seleccionada como óptima en el caso del Ferriclar es de 600 ppm. Si bien para una concentración de 200 ppm también se obtiene una disolución transparente y con menor cantidad de lodos, la velocidad de sedimentación y la disminución de COT son mayores para el ensayo con 600 ppm de coagulante.

Ensayos con WAC

Tabla D.4.3. Resultados de WAC a pH = 6

Concentración (ppm)	Velocidad de sedimentación (cm/min)	V _{lodos} (cm ³ /l de muestra)	Color de los lodos	pH final	Conductividad final (μS/cm)	Clarificación del agua	COT _{final} (mg/l)	% eliminación de COT
600	2,98	95	Blanco	7,32	1356	Agua transparente	5,0	35,06
400	2,98	71	Blanco	7,02	1376	Agua transparente	5,1	33,77
300	3,00	71	Blanco	7,75	1386	Agua transparente	5,3	31,17
200	2,79	71	Blanco	7,44	1398	Agua amarillenta	5,4	29,87
100	2,71	71	Blanco	7,51	1388	Agua amarillenta	6,3	18,18

Con el WAC los resultados son muy parecidos para las dosis de 600, 400 y 300 ppm. No obstante, se escoge una dosis óptima de 400 ppm, ya que se tiene un bajo volumen de lodos, una velocidad de sedimentación elevada, y un porcentaje mayor de eliminación de COT. La velocidad de sedimentación es prácticamente idéntica para las dosis de 600, 400 y 300 ppm; sin embargo, se descarta la dosis de 600 ppm porque el

volumen de lodos generados es mayor. Así, entre las dos posibilidades restantes, se escoge la dosis de 400 ppm debido al mayor porcentaje de eliminación de COT, siendo el resto de los parámetros indicadores iguales en ambos casos (volumen de lodos y velocidad de sedimentación).

Ensayos para IDT-680

Tabla D.4.4. Resultados de IDT-680 a pH = 6

Concentración (ppm)	Velocidad de sedimentación (cm/min)	V _{lodos} (cm ³ /l de muestra)	Color de los lodos	pH final	Conductividad final (μS/cm)	Clarificación del agua	COT _{final} (mg/l)	% eliminación de COT
600	2,49	189	Blanco	7,49	1334	Agua transparente	4,3	44,16
400	3,19	165	Blanco	7,87	1325	Agua transparente	4,2	45,45
300	2,56	95	Blanco	7,26	1337	Agua transparente	4,6	40,26
200	2,30	95	Blanco	7,12	1385	Agua amarillenta	5,2	32,47
100	2,09	71	Blanco	6,87	1557	Agua amarillenta	7,3	5,19

En este caso, la dosis óptima se corresponde con los 400 ppm de coagulante. Para esta concentración, si bien el volumen de lodos generado no es de los más bajos, sí que se tiene la mayor velocidad de sedimentación, además de una mayor eliminación de COT. En la tabla D.4.5, se muestran las dosis óptimas seleccionadas para los coagulantes ensayados.

Tabla D.4.5. Dosis óptima de los coagulantes

Coagulante	Dosis (ppm)
FeCl ₃	300
Ferriclar	600
WAC	400
IDT-680	400

D.5. Resultados de los ensayos de Jar Test para la optimización del pH

En las tablas D.5.1 a D.5.4 se presentan los resultados de los ensayos con los coagulantes seleccionados en su dosis óptima correspondiente y a diferentes valores de pH.

Ensayos con FeCl₃

Tabla D.5.1. Resultados de FeCl₃ a 300 ppm

pH	Velocidad de sedimentación (cm/min)	V _{lodos} (cm ³ /l de muestra)	Color de los lodos	pH final	Conductividad final (μS/cm)	Clarificación del agua	COT _{final} (mg/l)	% eliminación de COT
5	1,87	213	Naranja	6,89	1601	Agua transparente	4,6	40,26
6	3,02	165	Naranja	6,93	1676	Agua transparente	5,7	25,97
7	1,76	260	Naranja	8,29	1638	Agua transparente	5,9	23,34
9	1,33	236	Naranja	8,81	1592	Agua amarillenta	6,2	19,48
11	1,62	118	Naranja	10,67	1511	Agua ligeramente turbia	7,1	7,79

El agua queda transparente en los tres primeros casos, de forma que es preciso analizar el resto de los parámetros de ensayo. La velocidad de sedimentación es bastante mayor a pH 6; esto, unido a un volumen de lodos generado menor y una eliminación de COT (si bien no es la mayor) alta, nos lleva a considerarlo como el pH óptimo de tratamiento para este coagulante. Además, es preciso añadir una cantidad menor de reactivos para ajustar el pH, lo que se traduce en menores costes.

Ensayos con Ferriclar

Tabla D.5.2. Resultados de Ferriclar a 600 ppm

pH	Velocidad de sedimentación (cm/min)	V _{lodos} (cm ³ /l de muestra)	Color de los lodos	pH final	Conductividad final (μS/cm)	Clarificación del agua	COT _{final} (mg/l)	% eliminación de COT
5	1,86	165	Naranja	6,51	1546	Agua transparente	4,2	45,45
6	2,71	189	Naranja	7,18	1247	Agua transparente	3,9	49,35
7	1,16	189	Naranja	7,78	1591	Agua transparente	4,9	36,36
9	0,72	213	Naranja	8,79	1687	Agua amarillenta	5,8	24,66
11	1,39	189	Naranja	10,52	1770	Agua ligeramente turbia	5,7	25,97

Para el caso del Ferriclar a 600 ppm también se ha escogido un pH óptimo de 6. La velocidad de sedimentación y la eliminación de COT son las más altas, y la generación de lodos relativamente baja. Por otra parte, se necesitan menos reactivos para ajustar el pH de trabajo.

Ensayos con WAC

Tabla D.5.3. Resultados de WAC a 400 ppm

pH	Velocidad de sedimentación (cm/min)	V _{lodos} (cm ³ /l de muestra)	Color de los lodos	pH final	Conductividad final (μS/cm)	Clarificación del agua	COT _{final} (mg/l)	% eliminación de COT
5	1,30	118	Blanco	7,48	1563	Agua transparente	5,6	27,27
6	2,98	71	Blanco	7,02	1376	Agua transparente	5,1	33,77
7	1,11	177	Blanco	8,16	1424	Agua amarillenta	6,1	20,78
9	0,97	142	Blanco	8,76	1475	Agua ligeramente turbia	6,9	10,39
11	0,91	95	Blanco	10,50	1476	Agua turbia	6,9	10,39

Con el coagulante WAC a 400 ppm sólo se obtiene agua transparente a pH 5 y 6. Teniendo en cuenta la alta velocidad de sedimentación, el bajo volumen de lodos generado, y una mayor eliminación de COT, se escoge un pH de 6 como valor óptimo. Además, es necesario añadir menos cantidad de ácido para ajustar el pH, con lo que el coste de los reactivos es menor.

Ensayos con IDT-680

Tabla D.5.4. Resultados de IDT-680 a 400 ppm

pH	Velocidad de sedimentación (cm/min)	V _{lodos} (cm ³ /l de muestra)	Color de los lodos	pH final	Conductividad final (μS/cm)	Clarificación del agua	COT _{final} (mg/l)	% eliminación de COT
5	2,10	142	Blanco	8,07	1646	Agua transparente	5,5	28,57
6	3,19	165	Blanco	7,87	1325	Agua transparente	4,2	45,45
7	1,19	213	Blanco	7,88	1449	Agua amarillenta	6,0	22,08
9	1,15	154	Blanco	8,83	1528	Agua ligeramente turbia	6,8	11,69
11	0,86	95	Blanco	10,62	1451	Agua turbia	7,3	5,19

También en este caso hay que decidir entre pH = 5 o pH = 6. Como en el caso anterior, la velocidad de sedimentación y la eliminación de COT son más altas a pH 6, si bien la generación de lodos es ligeramente mayor. Analizando estos parámetros y teniendo en cuenta el ahorro de reactivos para ajustar el pH, también se escoge un pH 6 para el último coagulante testado.

En la tabla D.5.5 se resumen las condiciones óptimas (dosis y pH) para cada uno de los coagulantes.

Tabla D.5.5. Dosis y pH óptimos de los coagulantes de ensayo

Coagulante	Dosis (ppm)	pH
FeCl ₃	300	6
Ferriclar	600	6
WAC	400	6
IDT-680	400	6

En estas condiciones se mide la humedad de los lodos generados. Los valores obtenidos se muestran en la tabla D.5.6.

Tabla D.5.6. Humedad de los lodos en condiciones óptimas

Coagulante	Humedad de los lodos (%)
FeCl ₃	81,03
Ferriclar	74,89
WAC	79,81
IDT-680	80,22

D.6. Resultados de los ensayos de Jar Test para estudiar la influencia del uso de polielectrolitos

En esta serie de ensayos, cuyos resultados se exponen en las tablas D.6.1 a D.6.4, se trabaja en las condiciones óptimas de dosis y pH para cada uno de los coagulantes. El objetivo de este tren de experimentos es probar si la presencia de polielectrolitos mejoras el proceso de coagulación-floculación.

Ensayos con FeCl₃

Tabla D.6.1. Ensayos con FeCl₃ a 300 ppm y pH = 6

Polielectrolito	Velocidad de sedimentación (cm/min)	V_{lodos} (cm³/l de muestra)	Color de los lodos	pH final	Conductividad final (μS/cm)	Clarificación del agua	COT_{final} (mg/l)	% eliminación de COT
Magnafloc 1017	3,27	130	Naranja	6,99	1750	Agua transparente	5,3	31,17
Magnafloc 155	4,23	118	Naranja	6,96	1750	Agua transparente	5,4	29,87
Magnafloc 7027	1,82	130	Naranja	6,82	1714	Agua transparente	5,1	33,77
Zetag 50	4,14	83	Naranja	7,16	1724	Agua transparente	4,9	36,36
Zetag 47	3,64	83	Naranja	6,84	1716	Agua transparente	5,4	29,87

En todos los casos obtenemos un agua transparente, con pocos lodos, y una alta eliminación de COT. Por tanto, hay que considerar cuál de los polielectrolitos proporciona una velocidad de sedimentación mayor. En consecuencia, se escoge el Magnafloc 155 como el más adecuado.

Ensayos con Ferriclar

Tabla D.6.2. Ensayos con Ferriclar a 600 ppm y pH = 6

Polielectrolito	Velocidad de sedimentación (cm/min)	V _{lodos} (cm ³ /l de muestra)	Color de los lodos	pH final	Conductividad final (μS/cm)	Clarificación del agua	COT _{final} (mg/l)	% eliminación de COT
Magnafloc 1017	1,55	142	Naranja	7,87	1401	Agua transparente	5,3	31,17
Magnafloc 155	2,22	95	Naranja	7,76	1418	Agua transparente	5,3	31,17
Magnafloc 7027	1,74	83	Naranja	7,21	1434	Agua transparente	5,2	32,47
Zetag 50	2,29	83	Naranja	7,00	1465	Agua transparente	5,8	24,68
Zetag 47	2,39	83	Naranja	7,24	1521	Agua transparente	6,0	22,08

El primer floculante presenta una generación de lodos más alta que el resto, y la velocidad de sedimentación es la menor; por ello, se desestima su uso. En los otros casos, el volumen de lodos es bajo, por lo que se tienen en cuenta las velocidades de sedimentación y la eliminación de COT. El que presenta las mejores condiciones (valor elevado de ambos parámetros) simultáneamente, es el Magnafloc 155. Por tanto, también en este caso se considera el floculante idóneo.

Ensayos con WAC

Tabla D.6.3. Ensayos con WAC a 400 ppm y pH = 6

Polielectrolito	Velocidad de sedimentación (cm/min)	V _{lodos} (cm ³ /l de muestra)	Color de los lodos	pH final	Conductividad final (μS/cm)	Clarificación del agua	COT _{final} (mg/l)	% eliminación de COT
Magnafloc 1017	0,66	95	Blanco	6,94	1455	Agua amarillenta	6,3	18,18
Magnafloc 155	2,94	95	Blanco	7,54	1510	Agua amarillenta	7,0	9,09
Magnafloc 7027	0,95	83	Blanco	7,47	1414	Agua transparente	6,8	11,69
Zetag 50	1,77	71	Blanco	6,87	1431	Agua transparente	6,5	15,58
Zetag 47	0,97	47	Blanco	6,76	1439	Agua transparente	6,7	12,99

En los dos primeros casos, el agua queda amarillenta, por lo que no se considera adecuado trabajar con estos polielectrolitos. De los restantes, el que presenta las mejores condiciones es el Zetag 50 (alta velocidad de sedimentación, poca generación de lodos y

eliminación de COT elevada). Por consiguiente, se escoge dicho polielectrolito como el más adecuado para trabajar con el coagulante WAC.

Ensayos con IDT-680

Tabla D.6.4. Ensayos con IDT-680 a 400 ppm y pH = 6

Polielectrolito	Velocidad de sedimentación (cm/min)	V _{lodos} (cm ³ /l de muestra)	Color de los lodos	pH final	Conductividad final (μS/cm)	Clarificación del agua	COT _{final} (mg/l)	% eliminación de COT
Magnafloc 1017	2,11	118	Blanco	7,34	1361	Agua transparente	5,3	31,17
Magnafloc 155	2,28	47	Blanco	8,26	1412	Agua transparente	5,6	27,27
Magnafloc 7027	1,80	106	Blanco	6,97	1366	Agua transparente	5,0	35,06
Zetag 50	1,87	165	Blanco	7,28	1257	Agua transparente	5,1	33,77
Zetag 47	0,88	189	Blanco	7,99	1399	Agua transparente	5,0	35,06

El que presenta mejores condiciones en cuanto a velocidad de sedimentación elevada y baja generación de lodos, es el Magnafloc 155. Si bien la eliminación de COT es algo menor que el resto, se escoge este polielectrolito como el más satisfactorio.

La tabla D.6.5 recoge, a modo de resumen, los polielectrolitos más adecuados para cada uno de los coagulantes.

Tabla D.6.5. Polielectrolitos escogidos para los coagulantes propuestos

Coagulante	Polielectrolito
FeCl ₃	Magnafloc 155
Ferriclar	Magnafloc 155
WAC	Zetag 50
IDT-680	Magnafloc 155

En estas condiciones se mide la humedad de los lodos generados. Los valores obtenidos se muestran en la tabla D.6.6.

Tabla D.6.6. Humedad de los lodos en condiciones óptimas

Coagulante	Humedad de los lodos (%)
FeCl ₃	72,24
Ferriclar	75,64
WAC	76,89
IDT-680	65,29

D.7. Filtración en arena del efluente de coagulación-floculación-decantación. Descripción de la instalación

La instalación utilizada para llevar a cabo los ensayos de filtración se presenta en la imagen D.7.



Figura D.7. Equipo de filtración

Se trata de un lecho de arena en el que el agua a tratar se introduce por la parte superior y es recogida por la parte inferior después de pasar a través del lecho, donde quedan retenidas las partículas. Tras la recogida del filtrado se procede al lavado de la columna haciendo pasar agua y aire a contracorriente. De esta forma se expande el lecho, permitiendo que el material acumulado salga por la parte superior junto con el agua de lavado.

Se someten a filtración los efluentes obtenidos en el proceso de coagulación-floculación en las condiciones óptimas establecidas para cada coagulante en la serie de ensayos descrita anteriormente. El filtrado se recoge a fin de determinar la eficacia del proceso.

En todos los casos se procede de la forma descrita a continuación:

1. La muestra ya sometida a coagulación-floculación se hace pasar a través del lecho de arena, recogiendo el filtrado que sale por la parte inferior de la columna.
2. Se lava el filtro haciendo pasar agua y aire a contracorriente antes de proceder al filtrado de una nueva muestra.

Para el filtrado correspondiente a cada una de las disoluciones ensayadas se miden, el pH, la conductividad y la dureza. Por otra parte, también se miden la DQO y el COT del líquido clarificado, valores que se comparan con los correspondientes a la muestra inicial para obtener el rendimiento de depuración.

D.8. Parámetros indicadores de la eficiencia del proceso de filtración

1. Dureza

La dureza de un agua viene dada por su contenido en carbonatos, bicarbonatos, cloruros, sulfatos y, ocasionalmente, nitratos de calcio y magnesio. Las aguas duras producen incrustaciones y disminuyen la eficacia de los detergentes.

El método escogido para el análisis de la dureza total de las muestras es volumétrico y está basado en la cuantificación de los iones Ca^{2+} y Mg^{2+} por titulación con EDTA y su posterior conversión a dureza total expresada como CaCO_3 .

El procedimiento del análisis se describe a continuación:

i. Estandarización del EDTA (cálculo de la normalidad de la solución de EDTA utilizada en el análisis de dureza): se añaden 25 ml de CaCl_2 en un erlenmeyer. Se añaden 5 gotas de buffer pH 10 y 3 gotas de indicador Eriocromo Negro T. La disolución púrpura (debido a la presencia de iones Ca^{2+} y Mg^{2+}) se titula con la solución de EDTA cuya normalidad se desea conocer, hasta la aparición de un color azul.

$$N_{\text{EDTA}} = \frac{V_{\text{CaCl}_2} \times N_{\text{CaCl}_2}}{V_{\text{EDTA}}}$$

V_{CaCl_2} : ml de disolución de CaCl_2

N_{CaCl_2} : normalidad de la disolución de CaCl_2

V_{EDTA} : ml de EDTA consumidos en la titulación

N_{EDTA} : normalidad del EDTA

ii. Se colocan 25 ml de la muestra de agua en un erlenmeyer, se añaden 5 gotas de buffer pH 10 y 3 gotas de indicador Eriocromo Negro T. La disolución púrpura se titula con EDTA hasta viraje a azul.

$$\text{meq/l } (\text{Ca}^{2+} \text{ y } \text{Mg}^{2+}) = \frac{V \times N \times 1000}{\text{ml muestra}}$$

V: ml gastados de EDTA en la valoración

N: normalidad del EDTA

La dureza total expresada como ppm de CaCO_3 se calcula como:

$$\text{mg/l de Dureza Total} = [\text{meq/l } (\text{Ca}^{2+} \text{ y } \text{Mg}^{2+})] \times 50$$

2. DQO

La DQO es una medida aproximada del contenido de materia orgánica presente en una muestra de agua. Es la cantidad de oxígeno (mg/l) consumido en medio sulfúrico y con dicromato potásico que es necesaria para la oxidación de la materia mineral y orgánica, biodegradable o no, presente en las aguas residuales. Es una medida más exacta de la cantidad de materia orgánica presente en el agua. No obstante, si la muestra presenta un contenido muy bajo en materia orgánica, el ensayo de la DQO no produce resultados.

La medida de la DQO se lleva a cabo por el método rápido de Jeris, procediéndose de la forma descrita a continuación:

- i. En un erlenmeyer de 500 ml se añade una punta de espátula de sulfato de mercurio sólido (HgSO_4) para eliminar las posibles interferencias por cloruros en la muestra.
- ii. Se añaden 5 ml del agua problema con una pipeta, mezclando bien.
- iii. Se agregan 44,20 g (25 ml) de solución ácida de dicromato 0,05 N y se agita la disolución con una varilla.
- iv. Se coloca el matraz sobre una placa calefactora, poniendo un termómetro en contacto con la mezcla, y se eleva la temperatura hasta $165^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, agitando de vez en cuando para que la temperatura sea homogénea.
- v. Se añaden lentamente con una probeta 300 ml de agua destilada. La adición de agua a la mezcla ácida y caliente puede producir una fuerte ebullición y salpicado. Si en este paso la mezcla quedara de color verde claro, se repetiría el proceso diluyendo previamente el agua problema al 50% o más, según los casos (no ha sido necesaria la dilución durante los ensayos).
- vi. Se enfría la disolución en un baño de agua hasta la temperatura ambiente.
- vii. Se añaden 5 gotas de indicador de ferroína y se valora hasta viraje naranja con solución de sulfato ferroso amónico (sal de Mohr).
- viii. Paralelamente se efectuará un ensayo en blanco con agua destilada siguiendo el mismo procedimiento que con el agua problema.
- ix. Cálculo de la normalidad de la sal de Mohr. Un patrón de dicromato acuoso de 25 ml 0,05N (patrón primario) se valora en un erlenmeyer de 500 ml acidificando con 20 ml de ácido sulfúrico concentrado y continuando con los pasos 5, 6 y 7.

$$DQO = \frac{(A - B) \times 1000 \times 8 \times N}{V_{MUESTRA}} \text{ mg O}_2/\text{l}$$

A: ml de agente valorante consumidos en la valoración del blanco

B: ml de agente valorante consumidos en la valoración de la muestra

N: normalidad de la sal de Mohr ($\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)

$V_{MUESTRA} = 5 \text{ ml}$

3. Sólidos suspendidos totales (SST)

Los sólidos suspendidos totales (SST) son el residuo no filtrable de una muestra de agua y se definen como la porción de sólidos retenidos después de filtrar un determinado volumen de muestra a través de crisoles “Gooch” o filtros de fibra de vidrio que se utilizan como medio filtrante.

MATERIALES Y REACTIVOS

- Unidad de filtración de plástico
- Bomba de vacío
- Vidrios de reloj
- Probeta de 100 ml
- Filtros de $0.45 \mu\text{m}$
- Estufa
- Balanza analítica
- Agua destilada

- i. Se tara el filtro. Para ello, se humedece, se coloca sobre un vidrio de reloj y se seca en una estufa a $103\text{-}105^\circ\text{C}$ hasta que alcance un peso constante (aproximadamente 30 minutos).
- ii. El filtro seco se coloca en la unidad de filtración, conectada a una bomba de vacío, y se hacen pasar a través de ella 100 ml de muestra.
- iii. Se pone de nuevo el filtro sobre un vidrio de reloj y se lleva a la estufa a $103\text{-}105^\circ\text{C}$ durante 4 horas, tiempo estimado para alcanzar un peso estable.
- iv. Se pesa el filtro ya seco.

$$\text{SST (mg/l)} = \frac{(A - B) \times 1000}{V_m}$$

A: peso del residuo seco más el filtro (g)

B: tara del filtro (g)

V_m : volumen de muestra filtrada (100 ml)

D.9. Resultados de los ensayos de filtración

Dureza del efluente tratado

En primer lugar, se calcula la normalidad del EDTA, valorado frente a CaCl_2 0,01 N (el proceso se explica paso por paso en el anexo D.8):

$$N_{\text{EDTA}} = \frac{V_{\text{CaCl}_2} \times N_{\text{CaCl}_2}}{V_{\text{EDTA}}} = \frac{25\text{ml} \times 0,01\text{N}}{12,5\text{ml}} = 0,02\text{ N}$$

V_{CaCl_2} : ml de disolución de CaCl_2

N_{CaCl_2} : normalidad de la disolución de CaCl_2

V_{EDTA} : ml de EDTA consumidos en la titulación

Una vez conocida la normalidad del EDTA, se valoran tanto la muestra de agua de agua sin tratar (agua de salida de la depuradora) como las muestras tratadas con cada uno de los agentes coagulantes seleccionados (posteriormente a su filtración). Los resultados se muestran en la tabla D.9.1.

Tabla D.9.1. Datos del análisis de dureza

Óptimo del tratamiento de coagulación- floculación-decantación, seguido por filtración en arena	Volumen de EDTA consumido en la valoración (ml)	meq/l (Ca^{2+} y Mg^{2+})	mg/l de Dureza Total (ppm de CaCO_3)	grado Francés (1°f = 10 mg/l de CaCO_3)
Muestra de agua de salida de la depuradora	6,1	4,88	244	24,4
FeCl_3 , 300 ppm, pH=6, Magnaflow 155 aniónico	4,0	3,20	160	16,0
Ferriclar, 600 ppm, pH=6, sin polielectrolito	4,1	3,28	164	16,4
WAC, 400 ppm, pH=6, sin polielectrolito	4,6	3,68	184	18,4
IDT-680, 400 ppm, pH=6, sin polielectrolito	5,0	4,00	200	20,0

DQO del efluente tratado

Se calcula, en primer lugar, la normalidad de la sal de Mohr (el proceso se explica paso por paso en el anexo D.8):

$$N_{SAL} = \frac{V_{Patrón} \times N_{Patrón}}{V_{SAL}} = \frac{25 \times 0,05}{25,5} = 0,049$$

$V_{Patrón}$: ml patrón de dicromato acuoso

$N_{Patrón}$: normalidad del patrón de dicromato acuoso

V_{SAL} : ml de sal de Mohr consumidos en la valoración del patrón primario de dicromato

Una vez conocida la normalidad de la sal de Mohr, se valoran tanto la muestra de agua de agua sin tratar (agua de salida de la depuradora) como las muestras tratadas con cada uno de los agentes coagulantes seleccionados (posteriormente a su filtración). En el ensayo en blanco con agua destilada, el volumen de sal de Mohr consumido es de 25,3 ml. Los resultados se muestran en la tabla D.9.2.

Tabla D.9.2. Datos del análisis de la DQO

Óptimo del tratamiento de coagulación-floculación-decantación, seguido por filtración en arena	Volumen de sal de Mohr consumido en la valoración (ml)	Volumen de sal de Mohr consumido en el ensayo con agua destilada (ml)	DQO (mg O ₂ /l)	% reducción DQO
Muestra de agua de salida de la depuradora	24,0	25,3	102	—
FeCl ₃ , 300 ppm, pH=6, Magnafloc 155 aniónico	25,0	25,3	77	24,51
Ferriclar, 600 ppm, pH=6, sin polielectrolito	25,1	25,3	85	16,67
WAC, 400 ppm, pH=6, sin polielectrolito	24,6	25,3	45	55,88
IDT-680, 400 ppm, pH=6, sin polielectrolito	24,4	25,3	31	69,61

Sólidos suspendidos totales (SST)

En la tabla D.9.3 se exponen los resultados obtenidos para cada uno de los cuatro coagulantes ensayados (el proceso se explica paso por paso en el anexo D.8).

Tabla D.9.3. Sólidos suspendidos totales tras el tratamiento de regeneración

Óptimo del tratamiento de coagulación-floculación-decantación, seguido por filtración en arena	SST (mg/l)	% reducción SST
Muestra de agua de salida de la depuradora	34	—
FeCl ₃ , 300 ppm, pH=6, Magnafloc 155 aniónico	11	67,64
Ferriclar, 600 ppm,, pH=6, sin polielectrolito	13	62,76
WAC, 400 ppm, pH=6, sin polielectrolito	7	79,41
IDT-680, 400 ppm, pH=6, sin polielectrolito	5	85,29

Los sólidos suspendidos totales se han calculado a partir de la siguiente expresión:

$$\text{SST (mg/l)} = \frac{(A - B) \times 1000}{V_m}$$

A: peso del residuo seco más el filtro (g)

B: tara del filtro (g)

V_m: volumen de muestra filtrada (100 ml)

D.10. Métodos analíticos del ensayo de cloración

1. Cálculo de la demanda de cloro de la muestra bruta

El cálculo de la demanda de cloro de la muestra bruta se realiza mediante un método volumétrico de determinación de cloro, normalizado para concentraciones superiores a 5 mg/l.

La demanda de cloro se calcula adicionando un exceso de cloro (D_0) al agua que va a ser tratada (en este caso, el agua de salida de la depuradora) y calculando el cloro residual (R) no consumido después de un mínimo de 4 horas.

La diferencia $D_0 - R$ es la demanda de cloro (CD), expresada en mg Cl_2/l . Como ya se ha indicado, para la determinación de la demanda de cloro del efluente de la depuradora se utiliza el método volumétrico de determinación de cloro, normalizado para concentraciones superiores a 5 mg Cl_2/l .

El reactivo de cloración empleado en la desinfección de la muestra es hipoclorito sódico diluido (NaOCl). La lejía comercial de la que se parte proporciona los datos siguientes:

NaOCl al 5% p/v químicamente puro

$P_M = 74,44 \text{ g/mol}$

$\rho = 1,12 \text{ Kg/l}$

Para preparar el reactivo de cloración se diluye la lejía al 2%.

En un frasco de vidrio de 325 ml con tapón de teflón se añaden 5 ml de reactivo de cloración, 5 ml de tampón fosfato I y se llena hasta rebose con la muestra bruta (agua de salida de la depuradora). Este preparado se almacena al menos 4 horas a 25 °C en ausencia de luz.

Exceso de cloro en el agua bruta y contenido de cloro de la lejía comercial

Para calcular el exceso de cloro (D_0) añadido a la muestra se añaden 5 ml de reactivo de cloración en otro frasco de 325 ml con tapón de teflón y se llena hasta rebose con agua destilada.

A continuación, se añaden en un erlenmeyer 100 ml del contenido del frasco, 5 ml de ácido acético (CH_3COOH), 1g de IK (punta de espátula) y 2 ml de almidón (que actúa como indicador) y se valora con tiosulfato sódico ($Na_2S_2O_3$) 0,025 N hasta la desaparición total del color.

La dosis de cloro suministrada al agua problema se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$D_0 \text{ (mg Cl}_2\text{/l)} = \frac{V_v \times N \times 35,5 \times 1000}{V_m}$$

V_v : volumen de agente valorante ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) consumido en la valoración

N : normalidad del tiosulfato

V_m : volumen de muestra valorada (100 ml)

Cálculo del cloro residual no consumido

Se valoran 100 ml del contenido del frasco con el agua residual clorada que se había almacenado previamente para calcular la cantidad de cloro presente transcurridas las 4 horas.

Para la valoración se añaden en un erlenmeyer 100 ml del contenido del frasco, 5 ml de ácido acético (CH_3COOH), 1g de IK (punta de espátula) y 2 ml de almidón (que actúa como indicador) y se valora con tiosulfato sódico ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) 0,025 N hasta la desaparición total del color.

El cloro residual no consumido se calcula según la expresión expuesta a continuación:

$$R \text{ (mg Cl}_2\text{/l)} = \frac{V_v \times N \times 35,5 \times 1000}{V_m}$$

V_v : volumen de agente valorante ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) consumido en la valoración

N : normalidad del tiosulfato

V_m : volumen de muestra valorada (100 ml)

Cálculo de la demanda de cloro

La demanda de cloro (CD) del agua de salida de la depuradora se calcula como:

$$CD = D_0 - R \text{ (mg Cl}_2\text{/l)}$$

2. Cálculo del cloro residual de las muestras filtradas

Para cada uno de los coagulantes utilizados, se tiene una disolución tratada y filtrada a la que se adiciona la cantidad exacta de reactivo de cloración que se considere conveniente para mantener en el agua una concentración de cloro residual de 1 mg/l.

Esta concentración de cloro residual es la indicada para las aguas potables, más estricta que la indicada para la prevención de la legionella (ver anexo A.5).

El cálculo del cloro residual se realiza, por el método DPD de determinación colorimétrica, para la valoración del cloro residual libre presente en las muestras filtradas. Se escoge este método porque es el más adecuado cuando las concentraciones

de cloro residual son inferiores a 5 mg/l. No obstante, para el cálculo de la demanda de cloro de la muestra bruta se utiliza un método volumétrico de determinación de cloro, normalizado para concentraciones superiores a 5 mg/l.

En el caso del agua de salida de la depuradora, no se establece diferenciación entre cloro residual libre y combinado, ya que en las aguas residuales no se alcanza habitualmente el nivel suficiente para producir cloro libre.

Desarrollo de color en los patrones. Recta de calibrado

Se preparan 4 patrones de cloro de concentración comprendida dentro del rango 0,5-5 mg/l. Para ello se utiliza el reactivo de cloración, una vez conocida su concentración en cloro.

Para cada uno de los patrones de cloro se añaden (en este orden) en un vaso 1 ml de tampón fosfato II, 1 ml de reactivo DPD y 20 ml de patrón de cloro. Se mezcla y se mide la absorbancia a 515 nm. Con estos datos de absorbancia se construye la recta de calibrado.

Desarrollo de color en las muestras. Cálculo del cloro residual

En un vaso se añaden (en este orden) 1 ml de tampón fosfato II, 1 ml de reactivo DPD y 20 ml de muestra. Se mezcla y se lee la absorbancia a 515 nm. Con ayuda de la recta de calibrado elaborada, se obtiene la concentración de cloro residual.

D.11. Resultados del ensayo de cloración

1. Cálculo de la demanda de cloro de la muestra bruta

Exceso de cloro en el agua bruta y contenido de cloro de la lejía comercial

En primer lugar se calcula el exceso de cloro (D_0) añadido a la muestra, valorando de la forma ya indicada la mezcla de agua destilada y reactivo de cloración.

El volumen de tiosulfato consumido en la valoración es de 1,9 ml.

Por tanto, la dosis de cloro suministrada al agua problema se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$D_0 = \frac{V_v \times N \times 35,5 \times 1000}{V_m} = \frac{1,9 \times 0,025 \times 35,5 \times 1000}{100} \cong 16,843 \text{ mg Cl}_2/\text{l}$$

V_v : volumen de agente valorante ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) consumido en la valoración

N: normalidad del tiosulfato

V_m : volumen de muestra valorada (100 ml)

$$16,843 \text{ mg Cl}_2/\text{l} \times 0,325 \text{ l} \cong 5,474 \text{ mg Cl}_2$$

$$\frac{5,474 \text{ mg Cl}_2}{5 \text{ ml reactivo de cloración}} \times \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ l}} \cong 1094,8 \text{ mg Cl}_2/\text{l}$$

Contenido “exacto” de cloro en la lejía comercial (que se había diluido al 2%):

$$\frac{1}{0,02} \times 1094,8 \cong 54740 \text{ mg Cl}_2/\text{l}$$

Cálculo del cloro residual no consumido

La valoración del frasco que contiene el agua residual clorada, transcurridas las cuatro horas establecidas da lugar a un consumo de 1,1 ml de agente valorante (tiosulfato).

El cloro residual no consumido se calcula a partir de la ecuación siguiente:

$$R = \frac{V_v \times N \times 35,5 \times 1000}{V_m} = \frac{1,1 \times 0,025 \times 35,5 \times 1000}{100} \cong 9,751 \text{ mg Cl}_2/\text{l}$$

V_v : volumen de agente valorante ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) consumido en la valoración

N: normalidad del tiosulfato

V_m : volumen de muestra valorada (100 ml)

Cálculo de la demanda de cloro

A partir de los parámetros D_0 y R es posible calcular la demanda de cloro (CD) del agua de salida de la depuradora:

$$CD = D_0 - R = 16,843 - 9,751 = 7,092 \text{ mg Cl}_2/\text{l} \cong 7 \text{ mg Cl}_2/\text{l}$$

2. Cálculo del cloro residual de las muestras filtradas

Desarrollo de color en los patrones. Recta de calibrado

Se va a construir la recta de calibrado para el cálculo del cloro residual de las muestras. Para ello, se preparan los patrones partiendo del reactivo de cloración. El volumen de reactivo añadido para preparar cada disolución patrón se calcula de la siguiente forma:

$$A \text{ (mg Cl}_2/\text{l)} = \frac{V_{\text{reactivo de cloración}} \text{ (l)} \times 1094,8 \text{ (mg Cl}_2/\text{l)}}{V_{\text{H}_2\text{O}} \text{ (l)} + V_{\text{reactivo de cloración}} \text{ (l)}}$$

A: concentración de cloro de la disolución patrón (mg Cl_2/l)

Si se preparan 100 ml de disolución patrón, el volumen de agua destilada puede sustituirse en la ecuación por la expresión:

$$V_{\text{H}_2\text{O}} \text{ (l)} = 0,1 - V_{\text{reactivo de cloración}}$$

De forma que, a partir de la ecuación anterior se calcula el $V_{\text{reactivo de cloración}}$ según se refleja a continuación:

$$V_{\text{reactivo de cloración}} \text{ (l)} = \frac{A \text{ (mg Cl}_2/\text{l)} \times 0,1 \text{ (l)}}{1094,8 \text{ (mg Cl}_2/\text{l)}} = \frac{A}{10948}$$

Cada uno de los patrones se prepara en un matraz aforado de 100 ml, añadiendo la cantidad de reactivo de cloración necesaria y completando con agua destilada. Los datos correspondientes se recogen en la tabla D.11.1.

Tabla D.11.1. Patrones de cloro

Concentración en cloro de la disolución patrón (mg Cl_2/l)	$V_{\text{reactivo de cloración}}$ (μl)
0,5	46
1	91
2	183
5	457

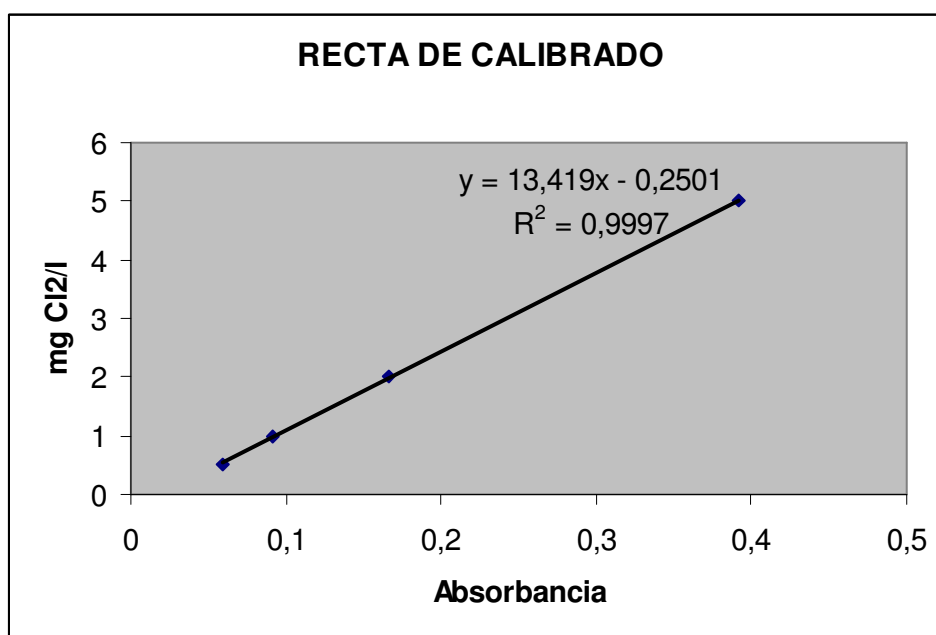
Una vez preparados los patrones de cloro se procede a la elaboración de la recta de calibrado. Para cada uno de ellos se lee la absorbancia a 515 nm, tras mezclar 1 ml de

tampón fosfato II, 1 ml de reactivo DPD y 20 ml de disolución patrón. Estos valores se presentan en la tabla D.11.2.

Tabla D.11.2. Absorbancia de las disoluciones patrón

Concentración en cloro de la disolución patrón (mg Cl ₂ /l)	Absorbancia a 515 nm
0,5	0,059
1	0,091
2	0,166
5	0,392

Con estos datos se procede a realizar la recta de calibrado (gráfica D.1).



Gráfica D.11. Recta de calibrado

Se tiene una recta de regresión lineal con R^2 muy próximo a 1.

Desarrollo de color en las muestras. Cálculo del cloro residual

En primer lugar, se adiciona a las muestras filtradas la cantidad teórica de reactivo de cloración necesaria para mantener una concentración residual de 1 mg Cl₂/l. El volumen de reactivo de cloración añadido a las muestras filtradas se obtiene a partir de la expresión que se expone a continuación:

$$(V_{\text{muestra}} + V_{\text{reactivo de cloración}}) \times 1 \text{ mg Cl}_2/\text{l} = V_{\text{reactivo de cloración}} \times 1094,8 \text{ mg Cl}_2/\text{l}$$

$$V_{\text{reactivo de cloración}} = \frac{V_{\text{muestra}} \times 1 \text{ mg Cl}_2/\text{l}}{(1094,8 - 1) \text{ mg Cl}_2/\text{l}}$$

Por tanto, si se toman 50 ml de cada muestra para preparar el ensayo de coagulación, el volumen de reactivo de cloración será de 46 µl. De las muestras cloradas se tomarán 20 ml (de cada una) para realizar el ensayo y calcular la cantidad de cloro residual.

A partir de la ecuación correspondiente a la recta de calibrado y una vez medidas las absorbancias de las disoluciones coaguladas y filtradas, se obtiene el valor cloro residual presente en cada una de ellas.

Para cada una de estas disoluciones se lee la absorbancia a 515 nm, tras mezclar 1 ml de tampón fosfato II, 1 ml de reactivo DPD y 20 ml de la disolución correspondiente.

La concentración de cloro residual se va a calcular según la ecuación:

$$R \text{ (mg Cl}_2\text{/l)} = 13,419 \times \text{Absorbancia} - 0,2501$$

Las absorbancias correspondientes a cada una de las muestras filtradas y cloradas se reflejan en la tabla D.11.3:

Tabla D.11.3. Absorbancias y cloro residual para el tratamiento con los distintos coagulantes

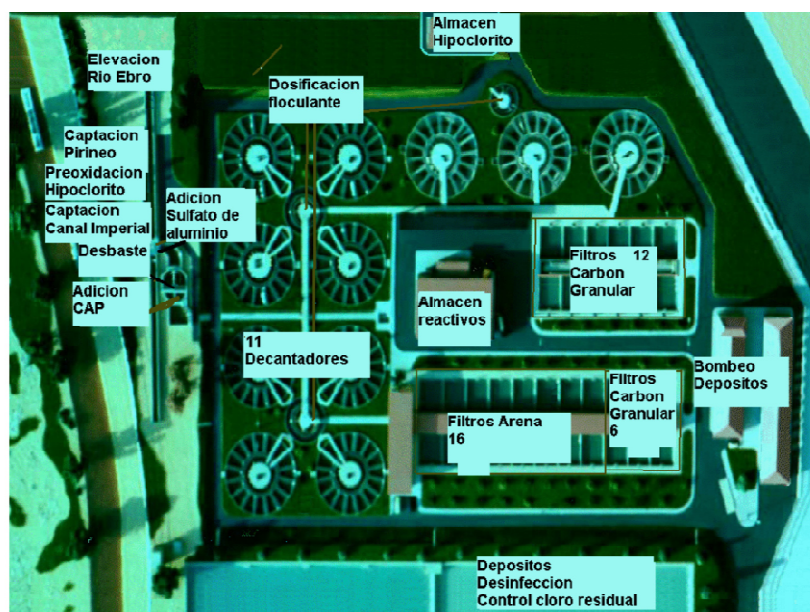
Óptimo del tratamiento de coagulación-floculación-decantación, seguido por filtración en arena	Absorbancia a 515 nm	Cloro residual, R (mg Cl ₂ /l)
FeCl ₃ , 300 ppm, pH=6, Magnafloc 155 aniónico	0,079	0,810
Ferriclar, 600 ppm, pH=6, sin polielectrolito	0,076	0,770
WAC, 400 ppm, pH=6, sin polielectrolito	0,096	1,038
IDT-680, 400 ppm, pH=6, sin polielectrolito	0,080	0,823

ANEXO E
INFRAESTRUCTURAS DEL AGUA EN LA
CIUDAD DE ZARAGOZA

E.1. Planta potabilizadora de Casablanca y red de distribución de aguas potables

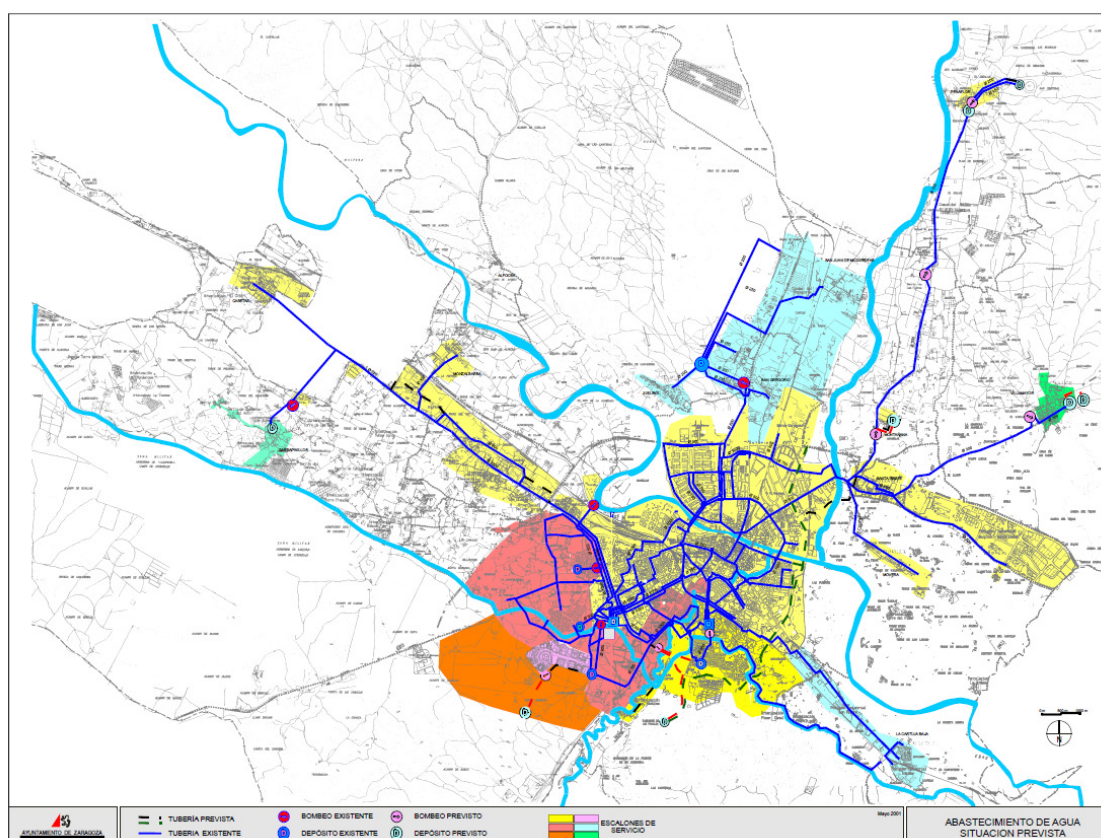


- Aguas procedentes del tramo superior del río Aragón reguladas desde el embalse de Yesa y el Canal de las Bardenas y la Acequia de Sora
- Tubería principal desde la Acequia de Sora hasta Zaragoza, pasando por el embalse de La Loteta (97 hm³), que sirve como almacenamiento
- 5 ramales secundarios (Ebro aguas arriba, Ebro aguas abajo, Jalón, Huerva y Gállego)
 - Abastecimiento a 60 municipios (825.000 habitantes)
- Preoxidación y desinfección con hipoclorito sódico (aguas del Canal o elevación del Río Ebro). No necesaria para agua de Yesa
- Desbaste automático
- Tratamiento con carbón activo en polvo
- Coagulación-Floculación-Decantación
- Filtración con arena sílicea
- Filtración con carbón activo granular (en fase de implantación)
- Bombeo a depósitos
- Desinfección final con hipoclorito sódico
- Mantenimiento de la calidad en la red. Estaciones de refuerzo de cloro
- Renovación y cubrimiento de los depósitos de Casablanca
- Parque fotovoltaico de 2 Mw de potencia sobre la cubierta de los depósitos (cubre los requisitos de electricidad de la planta)
- Instalación de tratamiento de fangos y recuperación de agua de purgas de decantación y lavado de filtros (recuperación de 5 hm³/año)
- Sustitución de los filtros de arena por carbón activado



Esquema del tratamiento de potabilización

RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUAS POTABLES



Red de distribución de aguas potables. Ayuntamiento de Zaragoza (Anexo 7 del Plan General de Ordenación Urbana)

ALMACENAMIENTO AGUA POTABLE	Vol_{tot} m3	RECLORACION	CONTROLES ONLINE
ACADEMIA, DEPÓSITOS	23.360	SI	SI
LOS LEONES, DEPOSITOS	4.000	SI	SI
ALFOCEA DEPOSITOS	25	SI	SI
CANTERAS, DEPÓSITOS	15.100	SI	SI
CASABLANCA, DEPÓSITOS	148.400	SI	SI
ECOCIUDAD, DEPÓSITOS	11.100	SI	SI
EMPRESARIUM DEPÓSITOS	5.543	SI	SI
GARRAPINILLOS, DEPÓSITO	130	SI	SI
PEÑAFLORES, DEPÓSITOS	207,5	SI	SI
PUERTO VENECIA	2.700	SI	SI
ROSALES DEL CANAL	1.410	SI	SI
TORRECILLA	50	SI	SI
VALDESPARTERA, DEPÓSITOS	41.400	SI	SI
VILLARRAPA ABASTECIMIENTO	15	SI	SI
TOTALCAPACIDAD M3	230.056		

Principales depósitos de la red de abastecimiento (Ayuntamiento de Zaragoza)

E.2. Estación depuradora de aguas residuales de La Almozara



Principales elementos constitutivos de la depuradora de La Almozara

LÍNEA DE AGUA

- Medida de caudal a la entrada mediante ultrasonidos
- Pozo de gruesos con doble reja extraíble y cuchara bivalva anfibia de extracción de los sólidos retenidos a contenedor
- Elevación del agua mediante 3 tornillos de Arquímedes de 400 l/s de capacidad unitaria a una altura de 6,5 m
- Eliminación de sólidos mediante un sistema doble de rejillas de gruesos y de finos
- Desarenado-desengrasado en 2 unidades de flujo en espiral de 144 m³ de volumen unitario aireados a través de difusores porosos por 2 soplantes de 630 Nm³/h
- Acondicionamiento de residuos del pretratamiento (gruesos, grasas y arenas)
- Decantación primaria en 2 unidades circulares de fondo cónico de 28 m de diámetro, volumen unitario de 1.800 m³ y un tiempo de retención de 2,5 h a caudal medio
- Tratamiento biológico: 2 cubas de planta rectangular de 4.350 m³ de volumen total, equipadas cada una con 3 aireadores superficiales de 37 Kw de potencia unitaria
- Recirculación de fangos activos a través de un canal provisto de un sistema de aforo por vertedero Parshall y medidor de lámina de agua por ultrasonidos. Elevación de los fangos a 2,5 m mediante 3 tornillos de 200 l/s de caudal unitario
- Decantación secundaria en 2 cubas circulares de fondo plano de 35 m de diámetro y un volumen unitario de 2.886 m³ con recogida de fangos sedimentados mediante succión por sifón
- Desinfección del efluente por adición de agua clorada producida a partir de cloro gas en 3 cloradores con una capacidad unitaria de 10 Kg/h

LÍNEA DE FANGOS

- Tamizado mediante 2 rejillas circulares autolimpiantes
- Espesamiento por gravedad en una cuba circular cerrada de 13 m de diámetro y 123 m³ de almacenamiento de fango
- Bombeo del fango al digestor primario mediante bombas de tornillo y acondicionamiento con Fe Cl³
- Digestión primaria mediante proceso anaerobio con producción de un gas con un contenido en metano superior al 60% en un digestor primario de 13,1 m de altura total, 20 m de diámetro y 3.850 m³. Agitación y calentamiento del fango mediante 3 heatmix exteriores
- Digestión secundaria en una vasija de 8,7 m de altura y 12 m de diámetro, con un volumen de 924 m³, con función mixta de apuramiento del proceso de digestión y de almacenamiento de fango para el proceso de secado
- Deshidratación : tras el acondicionamiento con polielectrolito, los fangos se secan en 2 filtros banda de 2,5 m de anchura y una producción de 18 m³/h
- Transporte del fango deshidratado en cintas a un contenedor

LÍNEA DE ENERGÍA

- Almacenamiento del gas de digestión en un gasómetro de campana de 10,7 m de diámetro, 8,5 m de altura y 735 m³ de volumen útil
- Compresión de una parte del gas en 2 compresores de 13,5 Kw para movimiento del fango en el heatmix y de otra parte en 2 compresores de 3,3 Kw para su uso en calderas. El gas restante se envía al motogenerador mediante 2 soplantes de 5,5 Kw
- Calefacción de fangos: 2 calderas mixtas para gasóleo y gas con una potencia calorífica unitaria de 150.000 Kcal./h., calientan el agua que se utiliza en los heatmix
- Motogenerador: motor Caterpillar de 287 Kw de potencia que produce aproximadamente el 60% de las necesidades de la planta

E.3. Estación depuradora de aguas residuales de La Cartuja



Principales elementos constitutivos de la depuradora de La Cartuja

LÍNEA DE AGUA

- Predesbaste con pozo de gruesos y rejillas de supergruesos
- Elevación mediante 5 grupos sumergidos de $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ de capacidad unitaria a una altura de 10 m
- Desbaste mediante 6 rejillas de gruesos y 6 rejillas de finos
- Desarenado-desengrasado en 6 tanques rectangulares de 500 m^3 aireados por turbinas sumergidas
- Acondicionamiento de residuos del pretratamiento (gruesos, grasas y arenas)
- Decantación primaria lamelar en 12 tanques de $24 \times 4,25 \text{ m}$ dotados de tolva única y rascador de fondo
- Balsas biológicas: 3 tanques de 21.600 m^3 con difusión de aire por burbuja gruesa, con posibilidad de funcionamiento en flujo-pistón y contacto-estabilización
- Producción de aire de proceso: 4 turbocompresores de $32.500 \text{ m}^3/\text{h}$ a 1,1 bares
- Decantación secundaria en 42 tanques lamelares de $4,25 \times 19,50 \text{ m}$ con tolvas múltiples de recogida de fangos
- Recirculación de fangos: 4 bombas sumergidas de caudal unitario $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ a 4 m de altura
- Eliminación de fósforo por adición de cloruro férrico en las balsas de aireación
- Desinfección del efluente por cloro gas dotado de sistema de detección y neutralización de fugas
- Instalación piloto de tratamiento terciario por filtración biológica para un caudal de $175 \text{ m}^3/\text{h}$

LÍNEA DE FANGOS

- Espesamiento por gravedad en 4 tanques circulares de 30 m de diámetro cubiertos
- Almacenamiento de fangos espesados en un tanque de 15 m de diámetro
- Deshidratación mediante 5 centrifugas de 1.640 kg MS/h de capacidad unitaria
- Secado de parte del fango en 2 secadores a partir del vapor generado con los gases del horno, con una capacidad de 880 kg MS/h de fango deshidratado
- Incineración en 2 hornos de lecho fluido de 6,70 m de diámetro
- Sistema de recuperación de energía de los gases del horno para calentamiento del aire de combustión, funcionamiento de los secadores térmicos y calefacción del edificio de aguas, y generación de energía eléctrica mediante una turbina de vapor acoplada a un alternador
- Tratamiento de los humos en 2 electrofiltros de alto rendimiento de $90.000 \text{ m}^3/\text{h}$ de capacidad unitaria
- Lavado de gases por vía húmeda en dos etapas
- Almacenamiento de cenizas en contenedores
- Sistema de estabilización de los fangos con cal como reserva en los momentos de parada de un horno

LÍNEA DE AIRE

- 7 centrales de aire con una capacidad total de $300.000 \text{ m}^3/\text{h}$
- Sistema de desodorización por vía química mediante 3 líneas en paralelo de $60.000 \text{ m}^3/\text{h}$ de capacidad unitaria, cada una de ellas con tres etapas de lavado en serie: ácido, oxidante y básico-oxidante

ANEXO F
PARQUES, JARDINES Y ZONAS VERDES DE
LA CIUDAD DE ZARAGOZA

PARQUES URBANOS EN ZARAGOZA
URBAN PARKS IN ZARAGOZA

Parque / Park	Extensión m²
Metropolitano del Agua	1.220.000
Lineal Riberas del Ebro	829.900
Lineal de Plaza	618.000
Primo de Rivera	270.466
Lagos de Valdespartera	192.742
Tío Jorge	151.538
Del Oeste	132.000
Cabezo Buena Vista	122.240
Montecanal	121.218
Delicias	93.294
Vistabella	80.749
Miraflores	78.146
Corredor verde Oliver Valdefierro	64.769
Castillo Palomar	55.425
La Aljafería	53.610
Oriente	48.858
Torre Ramona	47.938
Caprichos de Goya	46.160
De la Sedetania	45.000
Lineal del río Huerva / Parque del Azud	36.606
La Granja	35.934
La Paz	34.852
Brull	33.420
Sotocanal	29.605
Pinares de la C/ Oviedo	27.555
Pignatelli	26.800
Al Andalus	24.000
San Pablo	23.833
Glorietas de Goya	23.677
Taifa Saraquista	23.000
Paseo del Agua (estimado)	20.000
Valdefierro	19.831
Incrédulos	18.189
Atenas	16.500
Lisboa	16.500
Química	15.115
Vadorrey	14.900
Avicibrón	14.500
Avempace	14.000
Jardín de la Memoria	12.000
Calaverde	10.000
Tosos – Anento – Cadrete – Botorrita	9.000
Del Antiguo Canódromo	8.865
La Jota	8.844
Garrapinillos	6.500
Teresa Serrato	4.120
Bruno Solano	4.000
Alfocea	3.000
TOTAL SUPERFICIE TOTAL AREA	4.807.199

INTERVENCIONES EN LAS RIBERAS
WORKS ON THE RIVER BANKS

NOMBRE NAME	EXTENSIÓN m² SURFACE m²
Parque Almozara Almozara Park	168.000
Echegaray-San Pablo Echegaray-San Pablo	118.800
Helios Helios	110.000
Tenerías Las Fuentes Tenerías Las Fuentes	90.000
Acceso a viales ajardinados Access to landscaped roads	67.800
Balcón San Lázaro San Lazaro Balcony	48.200
Puente Pilar-Puente La Unión Pilar Bridge-La Unión Bridge	46.900
Fachada suroeste Actur Actur Southwest facade	45.600
Puente Autopista Almozara Almozara Motorway Bridge	45.500
Arboleda Macanaz Macanaz Riverbank	43.000
Puente La Unión Puente Gimenez Abad La Unión Bridge Gimenez Abad Bridge	34.800
Puente Tercer Milenio Third Millennium Bridge	11.300
TOTAL ZONA VERDE RIBERAS TOTAL GREEN AREAS AT THE RIVERBANKS	829.900

Fuente: Ayuntamiento de Zaragoza.
Elaboración propia.
Source: City Council – Statistics. Own Elaboration.

DISTRIBUCIÓN DE LAS AREAS VERDES POR TIPOLOGÍA / DISTRIBUTION OF GREEN AREAS BY TYE

	Número Number	Extensión m² Surface m²	% Zona verde urbana % Urban green area	Ha Ha
Grandes parques / Big parks	9	3.658.104	76,1%	365,8
Pequeños parques urbanos / Small urban parks	28	1.039.366	21,6%	103,9
Plazas y jardines / Squares and gardens	8	98.609	2,1%	9,9
Pequeñas plazas y jardines / Small squares and gardens	3	11.120	0,2%	1,1
TOTAL ZONA VERDE URBANA / TOTAL URBAN GREEN AREA	48	4.807.199	100,0%	480,7
AREAS VERDES PERIURBANAS / GREEN PERIURBAN AREAS		11.560.000		1.156

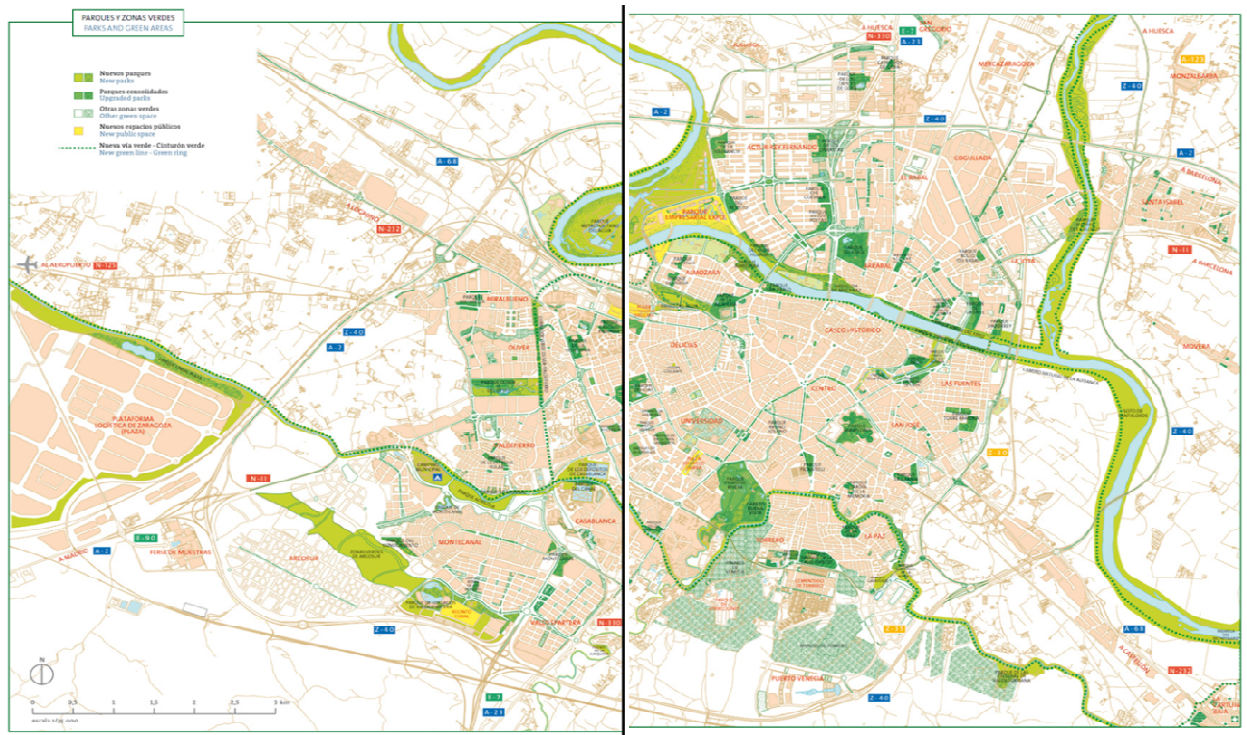
Fuente: Ayuntamiento de Zaragoza. Elaboración propia. (1) Se ha considerado la Ribera del Ebro como una única área verde lineal en la que se integran los 11 tramos diferentes sobre los que se han realizado intervenciones recientemente con motivo de la Expo.
Zaragoza City Council – Statistics.(1) The Ebro Riverbanks have been considered as only one linear green area, including the 11 stretches on which works have recently been carried out thanks to the Expo Complimentary Works Program.

Fuente: Atlas Zaragoza 2009. Ayuntamiento de Zaragoza

Las áreas verdes periurbanas más destacables por su valor ambiental son:

- ✓ Galacho de Juslibol (a 5 km del centro urbano, 181,5 ha de extensión)
- ✓ Montes de Torrero en el sur de la ciudad (318 ha)
- ✓ Vedado de Peñaflo y Pinaresde Campillo-San Cristóbal (491 ha)
- ✓ Riberas del Gállego (116,5 ha)
- ✓ Sabina de Villamayor, espacio singular por la especie que alberga
- ✓ Distintos sotos en ambas márgenes del Ebro, como los rehabilitados en el Plan de Riberas, o el emblemático Soto de Cantalobos
- ✓ Corredor verde del Canal Imperial de Aragón

En el plano se han señalado las zonas verdes de diferentes tipologías existentes en Zaragoza:



Ayuntamiento de Zaragoza. Atlas Zaragoza 2009

ANEXO G

**CÁLCULO DE LAS INFRAESTRUCTURAS
DE REGENERACIÓN Y REUTILIZACIÓN DE
AGUAS**

G.1. Cálculo de las infraestructuras de regeneración

La planta de tratamiento terciario dispone de dos líneas paralelas de 495 m³/h (137,5 l/s), lo que da lugar a una capacidad total de 990 m³/h (275 l/s).

1. Captación y bombeo de aguas

Las instalaciones disponen de un sistema de captación y bombeo del efluente secundario, que proviene del tratamiento biológico de la EDAR, y que lo conduce a un tratamiento físico-químico de coagulación-floculación-decantación, cuyos fangos se incorporan a la línea de fangos de la EDAR.

Se realiza el bombeo de 23760m³/día (275l/s) del efluente secundario al tratamiento terciario mediante 3 bombas centrífugas sumergibles en paralelo (dos de ellas en funcionamiento y una de reserva).

2. Tratamiento físico-químico (cámaras de coagulación y decantadores)

Cálculo de la cámara de coagulación

Se diseña cada una de las dos unidades de coagulación (mezcla perfecta y agitación rápida) para un caudal de 137,5 l/s. Se establece a modo de balsa rectangular de 2,5 m de altura, con un tiempo de residencia de 3 minutos, según los parámetros de diseño recomendados para estas unidades (Metcalf & Eddy, 1995 y WEF-ASCE, 1998). Con ello se procede a calcular el área superficial:

$$Q \times t_r = V = H \times S = H \times L \times w$$

Se asume una anchura de 3 m.

Con estos datos se calcula la longitud de la cámara:

$$Q \times t_r = V = H \times L \times w \rightarrow L = \frac{Q \times t_r}{H \times w} = \frac{0,1375 \frac{m^3}{s} \times 3 \text{ min} \times 60 \frac{s}{\text{min}}}{2,5 \text{ m} \times 3 \text{ m}} = 3,3 \text{ m}$$

Una vez obtenida la longitud de la cámara de coagulación, se calcula el volumen unitario:

$$V = H \times L \times w = 2,5 \text{ m} \times 3,3 \text{ m} \times 3 \text{ m} = 24,75 \text{ m}^3$$

Q: caudal de entrada a la cámara de coagulación

t_r: tiempo de residencia

V: volumen de la cámara

S: área superficial

H: altura de la cámara

L: longitud de la cámara

w: anchura de la cámara

Cálculo de la cámara de floculación

Las unidades de floculación se calculan de forma análoga a las de coagulación (Metcalf & Eddy, 1995 y WEF-ASCE, 1998). En este caso se va a tener agitación lenta y un tiempo de residencia de 15 minutos. Como en el caso anterior, se toman como valores de altura y anchura 2,5 m y 3 m, respectivamente.

Con estos datos se calcula la longitud de la cámara:

$$Q \times t_r = V = H \times L \times w \rightarrow L = \frac{Q \times t_r}{H \times w} = \frac{0,1375 \frac{m^3}{s} \times 15 \text{ min} \times 60 \frac{s}{\text{min}}}{2,5 \text{ m} \times 3 \text{ m}} = 16,5 \text{ m}$$

Una vez obtenida la longitud del floculador, se calcula el volumen unitario:

$$V = H \times L \times w = 2,5 \text{ m} \times 16,5 \text{ m} \times 3 \text{ m} = 123,75 \text{ m}^3$$

Q: caudal de entrada a la cámara de floculación

t_r: tiempo de residencia

V: volumen de la cámara

H: altura de la cámara

L: longitud de la cámara

w: anchura de la cámara

Cálculo del decantador

Cada uno de los decantadores circulares se diseña para lograr un tiempo de residencia de 2 horas, con una altura de 3 m (Metcalf & Eddy, 1995 y WEF-ASCE, 1998). Con ello se procede al cálculo de área superficial y a partir de ahí, se calcula su volumen unitario:

$$Q \times t_r = V = \pi \times r^2 \times H \rightarrow r = \sqrt{\frac{Q \times t_r}{H \times \pi}} = \sqrt{\frac{0,1375 \frac{m^3}{s} \times 2 \text{ h} \times 3600 \frac{s}{h}}{3 \text{ m} \times \pi}} = 10,25 \text{ m}$$

$$V = \pi \times r^2 \times H = 990 \text{ m}^3$$

Q: caudal de entrada al decantador

t_r: tiempo de residencia

V: volumen del decantador

H: altura del decantador

r: radio del decantador

3. Filtros de arena

Tras el tratamiento físico-químico se filtra el efluente antes de someterlo a cloración. De cada uno de los decantadores, se lleva el efluente correspondiente a dos filtros de arena, es decir, se tienen en total cuatro unidades de filtración, dos por cada una de las líneas.

Se realiza, por tanto, el diseño de cuatro filtros de arena gravitacionales de alta tasa, con una velocidad de filtración de $200 \text{ l/m}^2 \times \text{min}$. Conocida la tasa de filtración y el caudal de diseño, se procede al cálculo de área filtrante total que, dividida por cuatro unidades, da el área filtrante de cada uno de los filtros:

$$A_f = \frac{Q}{R} = \frac{275 \text{ l/s} \times 60 \text{ s/min}}{200 \text{ l/m}^2 \times \text{min}} = 82,5 \text{ m}^2$$

$$S = A_f / N = 82,5 \text{ m}^2 / 4 = 20,625 \text{ m}^2$$

A_f : área filtrante total

Q: caudal de diseño (275 l/s)

R: tasa de filtración ($200 \text{ l/m}^2 \times \text{min}$)

N: número de unidades de filtración (4)

S: superficie de cada filtro

4. Desinfección con hipoclorito. Cámara de cloración

Para el dimensionado del laberinto de cloración se toma un tiempo de contacto que asegure un alto grado de desinfección. En este caso, se ha escogido un tiempo de 90 minutos. Con este tiempo de retención, el volumen del canal será:

$$V = t_r \times Q = 90 \text{ min} \times 0,275 \text{ m}^3/\text{s} \times 60 \text{ s/min} = 1485 \text{ m}^3$$

V: volumen del laberinto de cloración

t_r : tiempo de retención

Q: caudal

La superficie necesaria es:

$$S = V/H$$

S: superficie

H: calado o altura de la lámina de agua

Se adopta un calado de canal de 2,30 m. Dado que el lado mayor L, debe ser 18 o más veces mayor que el pequeño l, se calculan el resto de las dimensiones de la cámara:

$$V = L \times l \times H = (18 \times l) \times l \times H = 18 \times l^2 \times H$$

$$l = \sqrt{\frac{V}{18 \times H}} = \sqrt{\frac{1485 m^3}{18 \times 2,30 m}} \cong 6 m$$

$$L = 18 \times l \cong 108 m$$

L: longitud del canal

l: anchura del canal

5. Balsa de regulación

El agua regenerada es almacenada en un depósito regulador con una capacidad de 23.760 m³, correspondiente a la producción total diaria de aguas regeneradas desde el cual se bombea a los depósitos de cabecera situados en el Parque Metropolitano del Agua y en el Parque Oliver o del Oeste. Desde ambos depósitos se abastecen todos los puntos de entrega mediante nuevos bombeos, a la demanda. El Parque Lineal Plaza dispone de bombeo independiente de las dos arterias anteriores, tomando directamente del depósito de origen situado en la EDAR de La Almozara.

Un esquema de las instalaciones de regeneración de aguas se puede ver en la figura G.1.

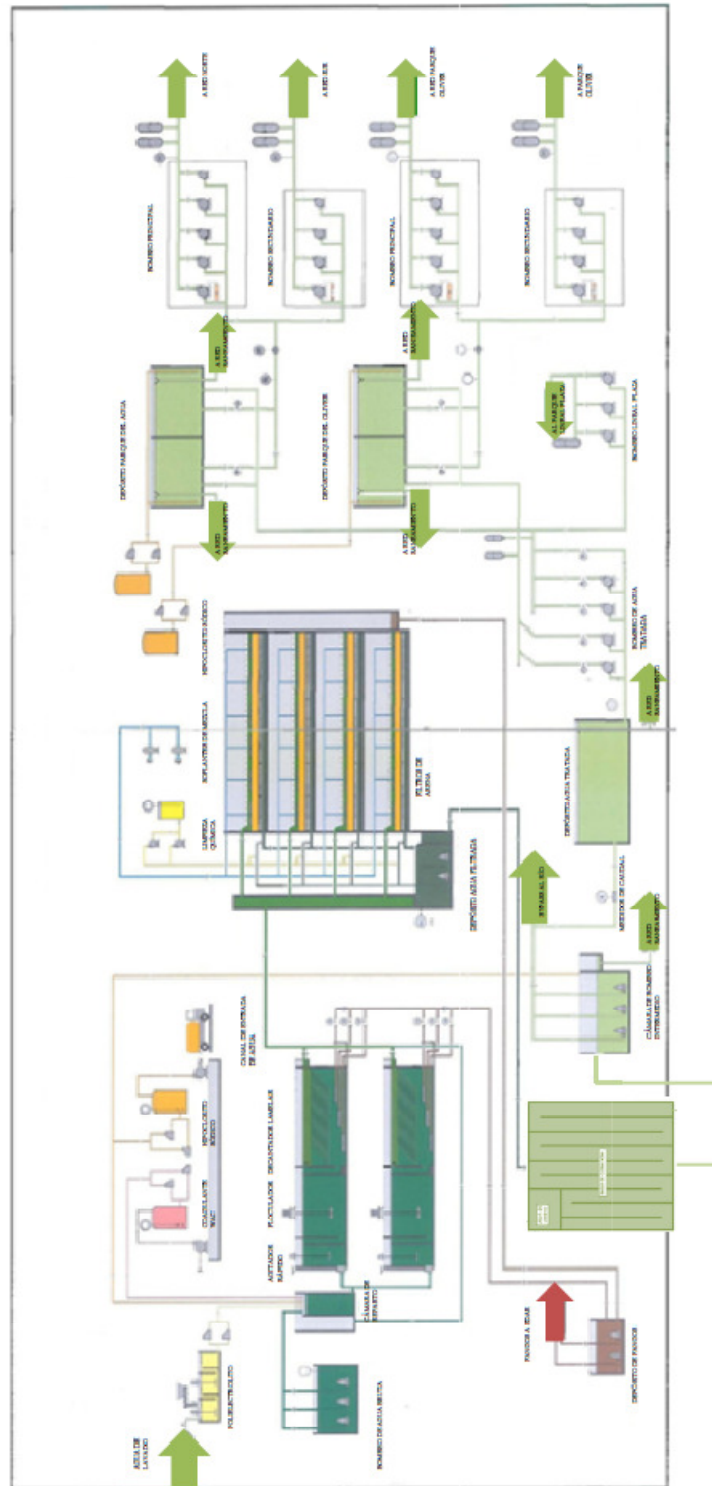


Figura G.1. Esquema de la planta de regeneración de aguas y bombeo a los parques urbanos

G.2. Red de aguas regeneradas. Infraestructuras de reutilización

En la figura G.2 se muestra el esquema propuesto para la red de abastecimiento de aguas regeneradas a los parques y jardines del casco urbano de la ciudad de Zaragoza:

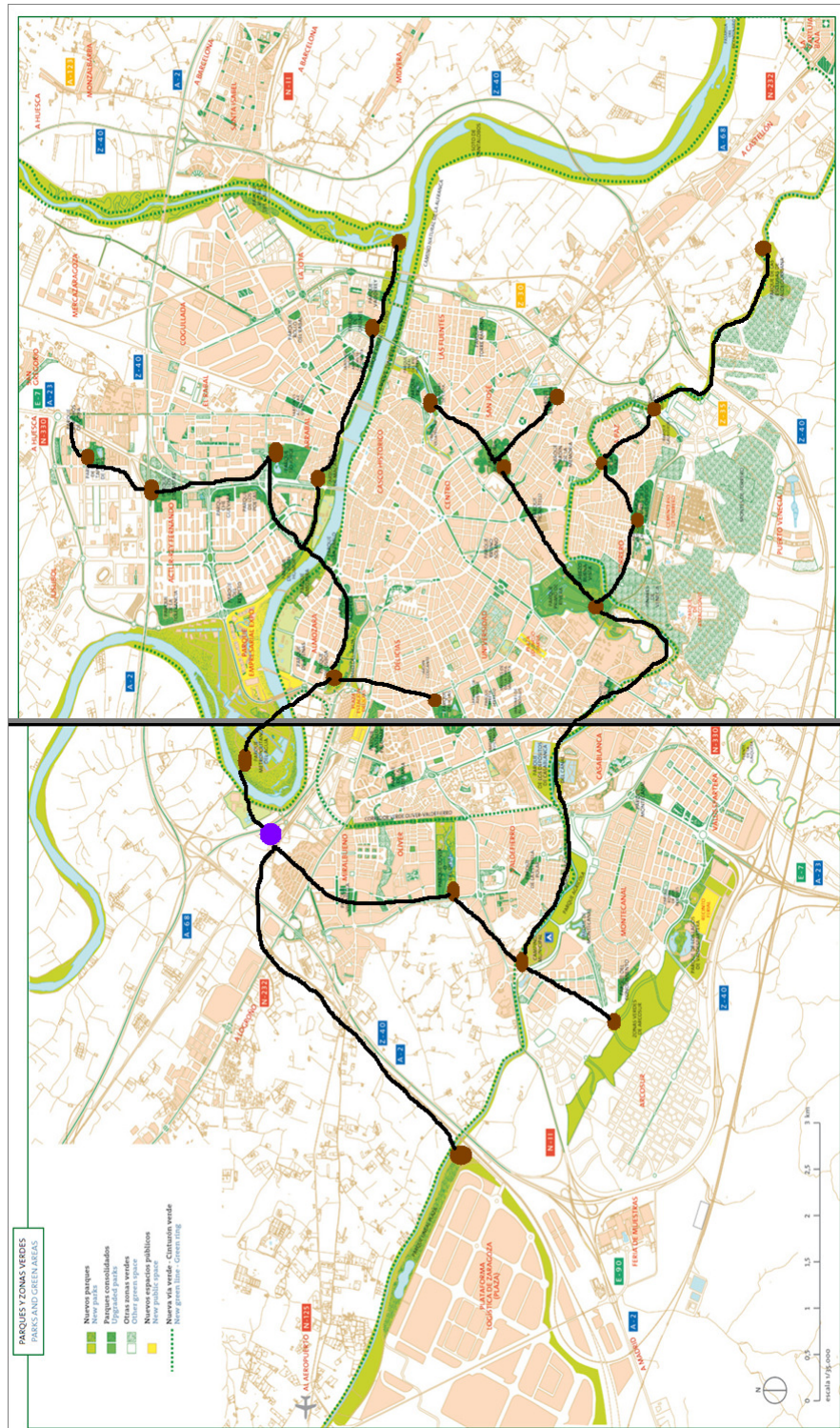


Figura G.2. Red de abastecimiento de aguas regeneradas

ANEXO H
ELEMENTOS DE CONTROL Y
SEÑALIZACIÓN DEL SISTEMA DE
REUTILIZACIÓN

La red de distribución debe garantizar la seguridad del servicio y la protección de la salud de la población. En todo sistema de distribución de aguas regeneradas debe partirse de tres premisas básicas:

- ✓ asegurar que la calidad del agua servida se ajusta a la que requiere el uso concreto
- ✓ evitar posibles conexiones accidentales con la red de agua potable
- ✓ evitar cualquier uso incorrecto del agua regenerada (no potable)

En el anexo II del RD 1620/2007, que recoge el modelo normalizado de solicitud para la concesión o autorización de reutilización de aguas, en el apartado dedicado a las infraestructuras de almacenamiento y distribución, se pide expresamente una descripción de los elementos de control y señalización de dichas infraestructuras.

No se establecen en el Real Decreto cuáles deben ser las características de dichos elementos, aunque el organismo de cuenca responsable de la concesión estudiará si el proyecto presentado es adecuado.

En el Plan de Reutilización de Aguas de Madrid, así como en la “Guía de la Ordenanza de Gestión y Uso Eficiente del Agua en la ciudad de Madrid”, elaborada por el Ayuntamiento y la Agenda Local 21, se recogen las especificaciones de las instalaciones de distribución de las aguas regeneradas y de su aplicación en el riego de parques y jardines y en el baldeo de calles. Estas normas están basadas en las recomendaciones que hace la USEPA. Algunas de estas medidas son:

- ✓ independencia entre las redes de agua potable y reutilizada
- ✓ las conducciones de agua potable deberán estar lo suficientemente separadas
- ✓ las tuberías y accesorios serán de color violeta (PANTONE 2577U o RAL 4001), al igual que los aspersores (también las tapaderas de los hidrantes para recargar los camiones cisterna que baldean las calles)
- ✓ señalización mediante carteles bien visibles que indiquen el tipo de agua utilizada en válvulas, grifos y aspersores. Además, las tuberías y tapas de las arquetas tendrán una leyenda fácilmente legible: “AGUA REGENERADA NO POTABLE”
- ✓ se deberán utilizar aspersores de tipo emergente
- ✓ las fuentes de agua potable deberán estar protegidas de los aerosoles de agua reutilizada

- ✓ cualquier zona frecuentada por el público deberá disponer de un número adecuado de fuentes de agua potable
- ✓ todos los elementos de las instalaciones de agua regenerada deberán ser inspeccionados regularmente, a fin de cumplir las exigencias del RD 865/03 sobre criterios higiénico-sanitarios para la prevención y control de la legionelosis
- ✓ se utilizarán aspersores de corto alcance o baja presión
- ✓ el riego por aspersión debe hacerse preferentemente de noche o cuando las instalaciones estén cerradas al público. Además, deberá programarse de modo que las plantas dispongan de tiempo suficiente para secarse antes de que los usuarios tengan acceso a la zona regada
- ✓ el riego deberá controlarse de modo que se minimice el encharcamiento y se asegure que la escorrentía superficial queda confinada en el propio terreno
- ✓ los empleados que puedan entrar en contacto con el agua regenerada deberán ser instruidos en el adecuado manejo de este recurso, debiendo hacerse hincapié en las condiciones higiénicas a guardar tanto durante la realización del servicio como a la finalización del mismo (cambiarse las ropas de trabajo y lavarse detenidamente antes de abandonar la zona de utilización)