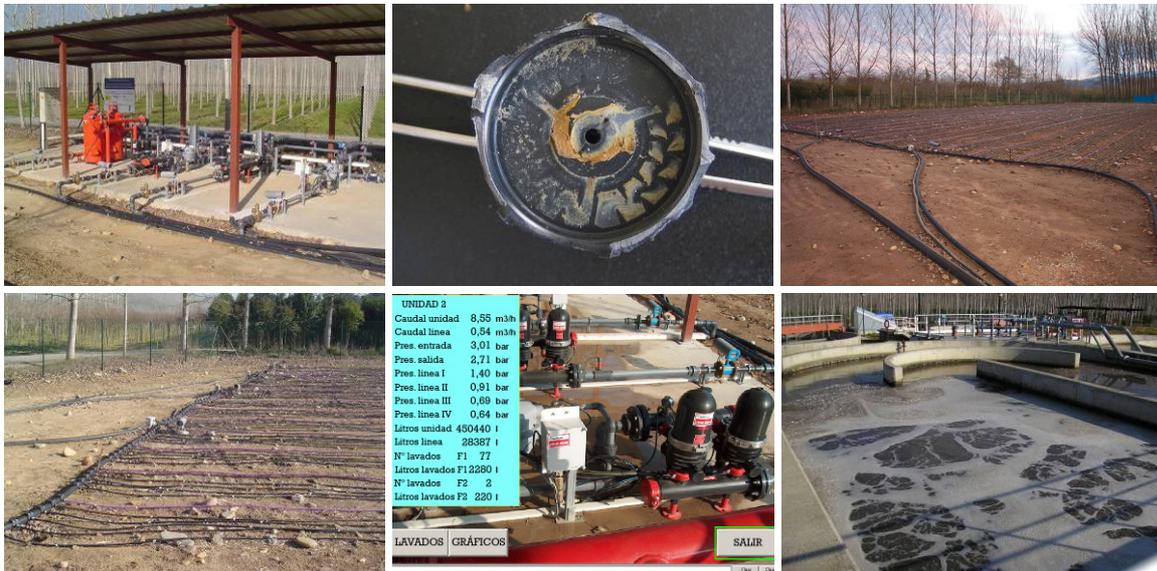


Universitat de Lleida
Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Agrària

Departament d'Enginyeria Agroforestal

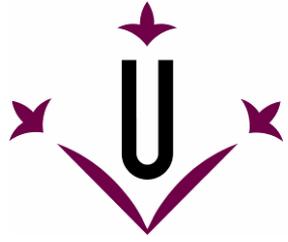
TESIS DOCTORAL

FILTRACIÓN Y UNIFORMIDAD DE RIEGO EN LOS SISTEMAS DE MICROIRRIGACIÓN CON EFLUENTES DE ESTACIONES DEPURADORAS DE AGUAS RESIDUALES



Miquel Duran i Ros

Junio 2008



Universitat de Lleida
Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Agrària

Departament d'Enginyeria Agroforestal

**FILTRACIÓN Y UNIFORMIDAD DE RIEGO EN LOS
SISTEMAS DE MICROIRRIGACIÓN CON EFLUENTES
DE ESTACIONES DEPURADORAS DE AGUAS
RESIDUALES.**

Tesis que presenta **Miquel Duran i Ros** para optar al grado de Doctor por la Universidad de Lleida, bajo la dirección del Dr. **Francisco Ramírez de Cartagena Bisbe**, Profesor Titular de Universidad de Ingeniería Hidráulica de la Universitat de Girona y del Dr. **Jaume Puig i Bargués**, Profesor Titular de Universidad de Ingeniería Agroforestal de la Universitat de Girona, y la tutoría del Dr. **Javier Barragán Fernández**, Catedrático de Universidad de Ingeniería Hidráulica de la Universitat de Lleida.

Firma del doctorando

Miquel Duran i Ros

Firma de los directores de tesis

Firma del tutor

Dr. Francisco Ramírez
de Cartagena Bisbe

Dr. Jaume Puig i
Bargués

Dr. Javier Barragán
Fernández

Esta tesis doctoral ha sido financiada, en parte, a través de una beca de investigación de la Universidad de Girona (BR03/08) y de un proyecto de investigación del antiguo Ministerio de Ciencia y Tecnología (REN: 2002-00690).

AGRAÏMENTS

Vull expressar el meu agraïment a totes aquelles persones i institucions que han fet possible la realització d'aquesta tesi doctoral.

En primer lloc vull donar les gràcies als directors i al tutor de la tesi. Al Dr. Jaume Puig i Bargués i al Dr. Francesc Ramírez de Cartagena per fer-me partícip de la investigació ja fa més de vuit anys i, per continuar creient en mi per a realitzar aquesta tesi doctoral. També els vull agrair la dedicació, el suport i tot l'esforç que han aportat perquè els assajos i la tesi s'hagin pogut realitzar. Al Dr. Javier Barragán Fernández li dono les gràcies per totes les visites a l'estació experimental, les seves valuoses orientacions i tot el suport que ha representat al llarg de la realització d'aquesta tesi.

Vull també agrair a tots els meus companys de la Secció de Producció Animal i Enginyeria Agroforestal de la Universitat de Girona, especialment a en Jaume, Paco, Gerard, Xevi, Joan, Lluís i Maha, pel seu suport i col·laboració en alguns aspectes de la tesi.

A en Jaume, Paco, Gerard la seva col·laboració i ajuda en les diferents fases de muntatge i desenvolupament de l'assaig. Igualment, a en Carles Girgues d'Industrial Ginés, a en Romans i a en Josep Brugués de l'empresa Imir, pel seu coneixement aportat i per la celeritat amb que han resolt els problemes.

També vull agrair a l'empresa Regaber la cessió de bona part del material experimentat, i a en Xavier Pagès i en Jaume Guàrdia de la mateixa empresa, l'assessorament tècnic realitzat. A Netafim i concretament a en Daniel i en Sebastian Schifris per la seva col·laboració i comentaris realitzats sobre l'estat dels emissors.

A l'ajuntament de Celrà i concretament al seu alcalde, Francesc Camps per la seva implicació en el treball, per deixar-nos disposar dels terrenys adjacents a l'EDAR i de l'aigua residual tractada. També vull agrair al personal de l'EDAR de Celrà, especialment a la cap de planta de l'estació en l'actualitat, l'Ester, i la Núria que ho va ser al començament dels assajos, a més de la Cristina i la Marta. No vull deixar d'esmentar el meu agraïment cap a en Martí, en Jordi i en Toni, personal de planta, i que sempre m'han ajudat.

També vull agrair al Departament de Física de la Universitat de Girona i concretament a la Dra. Teresa Serra i al Dr. Jordi Colomer per permetre'm utilitzar l'analitzador de partícules i orientar-me en el seu ús.

A la Gemma Rustullet, Nuria Cabezas i Anna Maria Aymerich per oferir-me les seves orientacions i comentaris valuosos a l'hora de realitzar les analítiques de laboratori.

Als Drs. Xavier Puigvert, Maria Font i Jaume Puig els vull agrair el seu assessorament en els temes estadístics.

A en Jordi Blavia i a la Carme Carulla, del Servei de Microscòpia de la Universitat de Girona per les facilitats atorgades. Al Dr. Sergi Sabater del Departament de Ciències Ambientals de la Universitat de Girona per l'ajuda presentada a l'hora d'identificar els microorganismes de l'aigua.

A en Lluís Bosch la seva col·laboració en la realització de les fotografies.

També vull agrair als meus pares per continuar apostant per mi i animar-me a realitzar la tesi, per recolzar-me en tots aquells moments tan i tan difícils, tal i com han fet les meves germanes Maria i Marta, o en David, en Santi, l'Anna, l'Albert i l'Oli. A la Irene li vull agrair tot el suport que m'ha representat, anímic, moral i en la realització de tantes tasques. També a en Josep i la Carmen, en Jordi i la Roser i a tots els amics que s'han interessat per l'estat de la tesi durant la seva realització.

A tots vosaltres i a totes aquelles persones o institucions que no he citat i que han participat en la realització d'aquest treball. Gràcies.

RESUM

En el marc actual, l'agricultura continua requerint importants volums d'aigua per tal de satisfer les seves necessitats i assolir els nivells de productivitat exigibles per a la pervivència econòmica del sector. Però la competència exercida pel sector industrial i les zones urbanes, pel recurs escàs i limitat que és l'aigua, implica que cada dia sigui més difícil disposar d'un subministrament amb garanties. La utilització d'aigües regenerades per a ús agrícola ajuda a disposar de l'aigua necessària i permet, també, alliberar un important volum d'aigua de major qualitat per a altres usos. No obstant això, l'ús d'aigües regenerades presenta el greu inconvenient de les obturacions als diferents elements dels sistemes de reg localitzat. És per aquest motiu que en la present tesi doctoral s'estudia el comportament d'un sistema de reg localitzat utilitzant aigües residuals tractades.

Es varen realitzar dos assajos de reg amb aigües regenerades procedents de l'EDAR de Celrà (Girona). En el primer assaig, es va utilitzar efluent procedent del tractament secundari i en el segon assaig, es va utilitzar efluent procedent del tractament terciari. Ambdós assajos van durar 1000 hores i van emprar quatre sistemes de filtració i sis tipus d'emissors. El primer sistema de filtració estava format per dos filtres de sorra de vint polzades, col·locats en paral·lel i omplerts amb 175 kg de sorra silícica disposada en una sola capa i, amb un diàmetre efectiu de 0.47 i 0.27 mm i un coeficient d'uniformitat de 2.41 i 2.89 per a l'assaig amb efluent secundari i terciari, respectivament. El segon sistema de filtració fou un filtre de malla de dues polzades i un nivell de filtració de 120 μm . El tercer sistema de filtració va ser una bateria de filtració consistent en dos filtres d'anelles de dues polzades col·locats en paral·lel i un nivell de filtració de 130 μm i, finalment, el quart sistema de filtració fou format per la combinació en sèrie d'un filtre de malla i una bateria de filtres d'anelles com els anteriorment descrits. Els emissors utilitzats foren sis de diferents característiques de disseny i d'operació i tots ells disponibles comercialment.

Es va observar que el filtre de sorra va ser l'únic que va reduir els sòlids en suspensió i la terbolesa dels dos efluents utilitzats. Amb el sistema de filtració combinat i en l'assaig amb efluent terciari, es va reduir sensiblement l'oxigen dissolt d'abans de filtrar. Pel que fa a la resta de paràmetres analitzats (conductivitat elèctrica, oxigen dissolt, pH, temperatura i nombre de partícules) no es van veure afectats significativament al passar pels diferents sistemes de filtració.

Els filtres que van presentar uns majors consums d'aigua durant els rentats van ser els de sorra, seguit dels d'anelles i malla en ambdós efluents assajats. Tant els filtres de malla com els d'anelles van ser els que van presentar més requeriments de pressió durant els rentats per tal d'assolir rentats eficients. També es va observar que l'obturbació dels filtres, mesurada com a l'índex de filtrabilitat de la relació de Boucher, va dependre del tipus de filtre i l'efluent utilitzat.

Es va utilitzar l'anàlisi dimensional per tal de relacionar mitjançant expressions matemàtiques l'obturbació dels diferents sistemes de filtració amb les variables mesurades al llarg de l'assaig. Tot i que els ajustos amb una de les expressions desenvolupades en aquesta tesi i les desenvolupades en treballs precedents van ser bons, va quedar variabilitat per a explicar, degut potser, a la manca d'intensitat de mostreig en alguna variable o a la no mesura d'alguna altra variable que hauria estat d'interès.

Pel que fa a l'obturació dels laterals de reg, es va observar que el percentatge de cabal emès pels emissors era un bon indicador de l'obturació. No es van observar en cap dels assajos obstruccions físiques als laterals o als emissors, fet que queda avalat per les elevades uniformitats de pressió aconseguides fins a l'últim moment de l'assaig. La posició al llarg del lateral i el tipus d'emissor utilitzat van ser factors determinants a l'hora de presentar obturació parcial o completa. Al final dels laterals, i sobretot amb els emissors UN i TO, va ser on es van presentar la major part dels emissors completament obturats.

Finalment, es va observar que la utilització d'un sistema SCADA va ser de gran ajuda per al monitoratge i control de l'estació de reg, permetent interactuar amb el sistema en continu i detectar fàcilment anomalies en l'operació que, sense aquest sistema, hagués estat molt més difícil d'observar.

RESUMEN

En la situación actual, la agricultura continúa requiriendo importantes volúmenes de agua para satisfacer las necesidades y llegar a los niveles de productividad exigibles para la pervivencia económica del sector. Pero la competencia ejercida por el sector industrial y las zonas urbanas, por el recurso escaso y limitado que es el agua, implica que cada día sea más difícil disponer del suministro con garantías. La utilización de aguas regeneradas para uso agrícola ayuda a disponer del agua necesaria y permite también, liberar un importante volumen de agua de mayor calidad para otros usos. No obstante, el uso de aguas regeneradas presenta el grave inconveniente de las obturaciones en los distintos elementos de los sistemas de riego localizado. Es por este motivo que en la presente tesis doctoral se estudia el comportamiento de un sistema de riego localizado utilizando aguas residuales tratadas.

Se realizaron dos ensayos de riego con aguas regeneradas procedentes de la EDAR de Celrà (Girona). En el primer ensayo se utilizó efluente procedente del tratamiento secundario, mientras que en el segundo ensayo se utilizó efluente procedente del tratamiento terciario. Los dos ensayos duraron 1000 horas y utilizaron cuatro sistemas de filtración y seis tipos de emisores. El primer sistema de filtración estaba formado por dos filtros de arena de veinte pulgadas, colocados en paralelo y rellenos con 175 kg de arena silícica dispuesta en una sola capa y, con un diámetro efectivo de 0.47 y 0.27 mm y un coeficiente de uniformidad de 2.41 y 2.89 para el ensayo con efluente secundario y terciario, respectivamente. El segundo sistema de filtración fue un filtro de malla de dos pulgadas y un nivel de filtración de 120 μm . El tercer sistema de filtración fue una batería de filtración consistente en dos filtros de anillas de dos pulgadas colocados en paralelo y un nivel de filtración de 130 μm y, finalmente, el cuarto sistema de filtración estuvo formado por la combinación en serie de un filtro de malla y una batería de filtros de anillas como los anteriormente descritos. Los emisores utilizados fueron seis de distintas características de diseño y de operación y todos ellos disponibles comercialmente.

Se observó que el filtro de arena fue el único que redujo los sólidos en suspensión y la turbidez de los dos efluentes utilizados. Por lo que se refiere a los demás parámetros analizados (conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, pH, temperatura y número de partículas) no se vieron afectados significativamente al pasar por los distintos sistemas de filtración.

Los filtros que presentaron unos mayores consumos de agua durante los lavados fueron los de arena, seguido de los de anillas y malla, con los dos efluentes ensayados. Tanto los filtros de malla como los de anillas fueron los que presentaron más requerimientos de presión durante los lavados para conseguir lavados eficientes. También se observó que la obturación de los filtros, medida como el índice de filtrabilidad de la relación de Boucher, dependió del tipo de filtro y el efluente utilizado.

Se utilizó el análisis dimensional para relacionar mediante expresiones matemáticas la obturación de los diferentes sistemas de filtración con las variables medidas a lo largo del ensayo. Aunque los ajustes con una de las expresiones desarrolladas en esta tesis y las desarrolladas en trabajos precedentes fueron buenos, quedó variabilidad por explicar, debido quizás, a la baja intensidad de muestreo en alguna de las variables o a la falta de medición de alguna otra variable que habría sido de interés.

Por lo que se refiere a la obturación de los laterales de riego, se observó que el porcentaje de caudal emitido por los emisores era un buen indicador de la obturación. No se observó en ninguno de los ensayos obstrucciones físicas a los laterales o en los emisores, hecho que queda avalado por las elevadas uniformidades de presión conseguidas hasta el último momento del ensayo. La posición a lo largo del lateral y el tipo de emisor utilizado fueron factores determinantes a la hora de presentar obturación parcial o completa. Al final de los laterales, y sobretodo con los emisores UN y TO, fue donde se presentó la mayor parte de los emisores completamente obturados.

Finalmente, se observó que la utilización de un sistema SCADA fue de gran ayuda para la monitorización y control de la estación de riego, permitiendo interactuar con el sistema en continuo y detectar fácilmente anomalías en la operación que, sin este sistema, hubiera sido mucho más difícil de observar.

ABSTRACT

Agriculture currently requires a large volume of water to satisfy its needs and reach the productivity levels necessary for the sector to survive economically. Water is a scarce and limited resource and competition for it from the industrial sector and urban zones makes it more and more difficult to guarantee the supply. Using regenerated water for agriculture makes more water available so that high quality water can be used in other areas. However, using regenerated water has the serious disadvantage of clogging different components of the microirrigation system. For this reason the present doctoral thesis analyses the behaviour of a microirrigation system that uses treated wastewaters.

Two irrigation trials with regenerated waters from the Celrà Wastewater Treatment Plant (Girona) were carried out. The first trial was conducted with secondary treatment effluent and the second trial with tertiary treatment effluent. Both experiments lasted 1000 hours and used four filtration systems and six emitter types

The first filtration system was formed by two sand filters of twenty inches, placed in parallel and filled with 175 kg of silicic sand in a single layer with an effective diameter of 0.47 and 0.27 mm and uniformity coefficients of 2.41 and 2.89 for the trial with the secondary effluent and for the trial with tertiary effluent, respectively. The second filtration system was a screen filter with a 120 μm filtration level. The third filtration system was a filtration battery consisting of two disc filters placed in parallel with a 130 μm filtration level. Finally, the fourth filtration system combined a screen filter and a battery of disc filters as previously described. Six emitters with different design and operation characteristics were used, all of which are commercially available

The sand filter was the only one that reduced the suspended solids and turbidity of the two effluents used. Using the combined filtration system with the tertiary effluent, the oxygen dissolved before filtration was significantly reduced. The other analysed parameters (electrical conductivity, dissolved oxygen, pH, temperature and particle number) were not affected significantly by the different filtration systems.

During backwashing, and with the two effluents tested, sand filters consumed the most water followed by disc and screen filters, which had the highest pressure requirements during the backwashing for efficient filter washing. It was also observed that filter clogging, measured as the filterability index of the Boucher relation, depended on the type of filter and effluent used.

Dimensional analysis was used to relate the clogging of different filtration systems to the variables measured during the trials by means of mathematical expressions. Although the adjustments with one of the expressions developed in this thesis as well as those developed in preceding works were good, there was still variability to explain. This could be due to the lack of sampling intensity for some variables. It is also possible that some variables that may have been of interest were not measured.

The percentage of the water volume emitted by drip emitters was a good indicator of clogging of the irrigation laterals. Physical obstructions were not observed in any of the trials of the irrigation laterals or in the emitters, which was evidenced by the highly uniform pressure throughout the trails. The position in the irrigation lateral and the type of emitter used were determining factors for partial or complete clogging. Most of the completely clogged emitters appeared at the end of the irrigation lateral, especially with UN and TO drip emitters.

Finally, the SCADA system was a helpful tool for monitoring and controlling the irrigation station. Continuous interaction was possible and operation malfunctions could be detected more easily.

PRODUCCIÓN CIENTÍFICA DERIVADA DE LA TESIS

El trabajo realizado en la presente tesis doctoral ha generado la producción científica que se relaciona a continuación.

Artículos en revistas incluidas en el *Science Citation Index*

- Duran-Ros, M.; Puig-Bargués, J.; Arbat, G.; Barragán, J. y Ramírez de Cartagena, F. 2008. Definition of a SCADA system for a microirrigation network with effluents. *Computers and Electronics in Agriculture*, 64, 2, pp. 338-342.
- Duran-Ros, M.; Puig-Bargués, J.; Arbat, G.; Barragán, J. y Ramírez de Cartagena, F. 2008. Effect of filter, emitter and location on clogging when using effluents. *Agricultural Water Management*, 96, 1, pp. 67-79.
- Duran-Ros, M.; Puig-Bargués, J.; Arbat, G.; Barragán, J. y Ramírez de Cartagena, F. 2009. Performance and backwashing efficiency of disc and screen filters in microirrigation Systems. *Biosystems Engineering*, 103, 1, pp. 35-42.

Comunicaciones en Congresos Internacionales

- Duran-Ros, M.; Puig-Bargués, J.; Barragán, J. y Ramírez de Cartagena, F. 2006. Emission uniformity of drip irrigation subunits using secondary effluents. Proceedings of the Conference International Water Conference IWC 2006, Porto, pp. 145-151.
- Puig-Bargués, J.; Duran-Ros, M.; Barragán, J. y Ramírez de Cartagena, F. 2006. Filter and emitter performance of microirrigation subunits using secondary effluents. Abstracts of the XVI CIRG World Congress and AgEng 2006: Agricultural Engineering for a Better World, Bonn, pp. 61-62..
- Duran-Ros, M.; Puig-Bargués, J.; Barragán, J.; Arbat, G. y Ramírez de Cartagena, F. 2007. Comportamiento de diferentes sistemas de filtración y goteros con efluentes secundarios y terciarios. Actas del IV Congreso Nacional y I Congreso Ibérico de Agroingeniería, Albacete, pp. 79-81.
- Duran-Ros, M.; Puig-Bargués, J.; Barragán, J.; Arbat, G. y Ramírez de Cartagena, F. 2008. Filter and emitter performance of micro-irrigation systems using secondary and tertiary effluents. Sustainable Irrigation 2008, Alicante. Publicado en WIT Transactions on Ecology and the Environment, 112, 361-370. doi: 10.2495/SI080351.

Comunicaciones en Congresos Nacionales

- Duran-Ros, M.; Puig-Bargués, J.; Barragán, J. y Ramírez de Cartagena, F. 2005. Monitorización y control de una estación de riego por goteo mediante un sistema SCADA. Resúmenes del III Congreso Nacional de Agroingeniería, León., pp. 59-60.

- Duran-Ros, M.; Puig-Bargués, J.; Barragán, J.; Arbat, G. y Ramírez de Cartagena, F. 2007. Comportament de diferents filtres i degoters amb efluents secundaris i terciaris. Resum de les comunicacions del V Congrés de la Institució Catalana d'Estudis Agraris ICEA, Castelldefel, pp.70.

ÍNDICE

1. Introducción.....	1
1.1. Usos del agua	1
1.2. Reutilización de agua regenerada para el riego.....	3
2. Revisión bibliográfica	7
2.1. Efluente	7
2.2. Filtros	9
2.3. Emisores	12
2.4. Duración de los ensayos	16
2.5. Método de evaluación de la uniformidad de riego	17
2.6. Monitorización y control de los sistemas de riego.....	19
3. Objetivos	21
4. Material y métodos.....	23
4.1. Planteamiento	23
4.2. Localización	23
4.3. Características meteorológicas durante los ensayos.....	23
4.4. Descripción de la estación depuradora.....	25
4.5. Dispositivo experimental.....	26
4.5.1. Captación e impulsión del agua	26
4.5.2. Filtración	26
4.5.3. Emisores	28
4.6. Supervisión, control y adquisición de datos.....	32
4.6.1. Automatismos.....	32
4.6.2. Ordenador personal	33
4.6.3. Autómata programable.....	33
4.6.4. Red de comunicaciones.....	34
4.6.5. Funcionamiento del sistema SCADA	34
4.7. Control remoto	35
4.8. Ejecución del ensayo	37
4.8.1. Calendario de funcionamiento	37
4.8.2. Toma y análisis de muestras de los efluentes.....	39
4.8.3. Análisis del efluente secundario.....	40
4.8.4. Reducción de los parámetros físico-químicos del efluente.....	41
4.8.5. Análisis microbiológico del efluente.....	41

4.8.6. Manejo del banco de filtración.....	41
4.9. Caracterización de la granulometría de la arena de los filtros	43
4.10. Determinación de la conductividad hidráulica saturada de la arena del filtro y del tamaño del poro.....	44
4.11. Identificación de la eficiencia de lavado de los filtros	45
4.12. Consumo de agua de lavado de los filtros.....	47
4.13. Estudio del proceso de filtración.....	48
4.14. Cálculo del índice de filtrabilidad.....	49
4.15. Análisis dimensional de la filtración.....	49
4.15.1. Relaciones dimensionales existentes.....	49
4.15.2. Obtención de nuevas relaciones adimensionales	50
4.15.3. Obtención experimental de las relaciones dimensionales.....	53
4.16. Medidas de uniformidad del riego	53
4.16.1. Uniformidad de emisión de caudales	53
4.16.2. Porcentaje de emisores completamente obturados.....	55
4.16.3. Porcentaje de caudal inicial.....	55
4.16.4. Uniformidad de presiones	56
4.17. Relación entre el caudal del lateral medido con un caudalímetro electromagnético y el estimado a partir de las medidas de campo	56
4.18. Comportamiento del caudal emitido por un lateral y por el conjunto de los laterales	57
4.19. Relación entre la uniformidad de presión medida manualmente con la del SCADA.	58
4.20. Lavado por arrastre de los laterales de riego.....	58
4.21. Observación del material.....	59
4.21.1. Observación de los emisores	59
4.21.2. Observación de la deposición de los laterales.....	60
4.22. Tratamiento estadístico de los datos.....	60
4.22.1. Efluente secundario y temperaturas ambientales	60
4.22.2. Velocidad de filtración y características de la arena del filtro	60
4.22.3. Efluente de entrada a los sistemas de filtración y su variación en los filtros.....	60
4.22.4. Ciclo de filtración e índice de filtrabilidad.....	61
4.22.5. Obturación de los emisores	61
4.22.6. Lavado de los laterales y estimación de la presión y caudal a partir de medidas realizadas con equipos portátiles.....	61
5. Resultados y discusión	63
5.1. Descripción de los efluentes de entrada a los sistemas de filtración.....	63
5.1.1. Caracterización físico-química y de partículas de los efluentes ensayados.....	63

5.1.2. Comparación del efluente secundario del año 2005 con el del año 2006	65
5.1.3. Evolución de los parámetros físico-químicos de los efluentes de entrada a los sistemas de filtración	67
5.1.4. Correlación entre los parámetros físico-químicos de los efluentes ensayados	73
5.1.5. Distribución de partículas en los efluentes de entrada a los sistemas de filtración	75
5.1.6. Caracterización microbiológica de los efluentes de entrada a los sistemas de filtración	77
5.2. Comportamiento de los sistemas de filtración	78
5.2.1. Efecto de los sistemas de filtración en la calidad de los efluentes	78
5.2.1.1. Efecto producido en los parámetros físico-químicos	78
5.2.1.2. Efecto producido en las partículas del efluente	80
5.2.1.2.1. Reducción del número total de partículas	80
5.2.1.2.2. Distribución del número de partículas	81
5.2.1.2.3. Reducción del número de partículas según su tamaño	84
5.2.1.2.4. Distribución del volumen de las partículas	87
5.2.2. Análisis de los lavados de los filtros	90
5.2.3. Evolución de la granulometría de la arena del filtro	97
5.2.4. Análisis de la filtración en los filtros de arena mediante la ecuación de Darcy	99
5.2.5. Evolución de la pérdida de carga en función del volumen de agua filtrada	102
5.2.6. Índices de filtrabilidad	105
5.2.7. Análisis dimensional de la filtración	108
5.3. Comportamiento de los emisores	113
5.3.1. Indicadores de la obturación de las unidades de riego	113
5.3.2. Factores que influyen en la obturación de los emisores	118
5.3.2.1. Efecto del emisor y la posición en el porcentaje de caudal inicial	119
5.3.2.2. Efecto de la filtración y la posición en el porcentaje de caudal inicial emitido por los goteros	123
5.3.3. Lavado de los laterales después del ensayo con efluente terciario	124
5.3.4. Coeficiente de uniformidad de presiones de los emisores	126
5.3.5. Caudal monitorizado	130
5.3.5.1. Relación entre el caudal del lateral medido en continuo y el estimado a partir de las medidas para el cálculo de la uniformidad	130
5.3.5.2. Evolución del caudal del lateral monitorizado	131
5.3.5.3. Evolución del caudal filtrado	135
5.3.6. Presión del lateral monitorizado	137
5.3.6.1. Relación entre la presión de los laterales medida en continuo y la presión medida con el manómetro digital	137

5.3.6.2. Evolución de la presión del lateral monitorizado.....	138
5.3.7. Observación del material.....	142
5.3.7.1. Observación de los laterales y de los emisores	142
5.3.7.2. Observación de la deposición sólida de los laterales	146
6. Conclusiones	155
7. Futuros desarrollos	161
8. Bibliografía	163

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1.Importancia relativa de cada uno de los usos del agua en Catalunya en 2006 (ACA, 2008).....	2
Tabla 1.2. Clasificación de las aguas residuales tratadas según el riesgo de obturación de los sistemas de riego localizado (Bucks <i>et al.</i> , 1979).	5
Tabla 2.1. Valores de los parámetros físico-químicos de las aguas utilizadas en los trabajos estudiados.	8
Tabla 2.2. Condiciones de presión de trabajo y de pérdida de carga para efectuar el lavado de los filtros ensayados en la bibliografía consultada.	10
Tabla 2.3. Características de los filtros utilizados en distintos trabajos.....	11
Tabla 2.4. Características de funcionamiento de los goteros utilizados en distintos trabajos..	13
Tabla 2.5. Duración de los ensayos de la bibliografía estudiada.	17
Tabla 2.6. Coeficientes utilizados para evaluar la obturación de los goteros ensayados.	18
Tabla 4.1. Media de la temperatura media, máxima y mínima diaria por cada mes y año de ensayo. Por cada temperatura y mes, y por cada temperatura y media del ensayo, años con letra distinta indica que existen diferencias significativas ($P<0.05$).	25
Tabla 4.2. Velocidades medias de filtración superficial en los distintos filtros y efluentes utilizados. Para cada sistema de filtración, efluentes con letra distinta indica que existen diferencias significativas ($P<0.05$).....	27
Tabla 4.3. Características de funcionamiento y disposición en parcela de los emisores utilizados en los ensayos. Valores según información del fabricante.	29
Tabla 4.4. Características de diseño interno de los emisores utilizados en el ensayo (Netafim, 2004).....	30
Tabla 4.5. Ejemplo de programación durante la realización del ensayo con efluente secundario.....	37
Tabla 4.6. Ejemplo de programación durante la realización del ensayo con efluente terciario.	38
Tabla 4.7. Descripción de los parámetros aceptados para un lavado eficiente.	47
Tabla 4.8. Media y desviaciones típicas de la variación del caudal filtrado por cada filtro utilizado, efluente, y en el ensayo con efluente secundario, tipo de funcionamiento.	48
Tabla 4.9. Nomenclatura de la medida de uniformidad de emisión de caudales en función de las horas transcurridas de ensayo.	55
Tabla 4.10. Velocidad del agua de lavado al final de los distintos tipos de laterales.	59

Tabla 5.1. Valores medios y desviación estándar de las características físico-químicas del efluente secundario y terciario en la entrada de los distintos sistemas de filtración. Para cada efluente y parámetro, sistemas de filtración con letra distinta indica que existen diferencias significativas ($P < 0.05$).	63
Tabla 5.2. Variación horaria y diaria de los parámetros físico-químicos medidos en los efluentes ensayados.	65
Tabla 5.3. Medias mensuales, media del periodo de ensayo y desviaciones típicas de algunos de los parámetros físico-químicos del efluente secundario del año 2005 y del 2006. Para cada periodo y parámetro, año con letra distinta indica que existen diferencias significativas ($P < 0.05$).	66
Tabla 5.4. Medias mensuales, media del periodo de ensayo y desviaciones típicas de algunos de los parámetros químicos medidos del efluente secundario del año 2005 y del 2006. Para cada periodo y parámetro, año con letra distinta indica que existen diferencias significativas ($P < 0.05$).	67
Tabla 5.5. Media de la turbidez, sólidos en suspensión y número de partículas durante los ensayos con efluente secundario y terciario. Para cada parámetro, letras distintas indican diferencias significativas ($P < 0.05$).	71
Tabla 5.6. Coeficientes de correlación de Pearson y niveles de significación estadística entre los parámetros físico-químicos del agua de entrada a los filtros para los dos efluentes ensayados.	74
Tabla 5.7. Media de la distribución del número de partículas para cada efluente ensayado. Efluente con letra distinta indica que existen diferencias significativas ($P < 0.05$).	75
Tabla 5.8. Mediana de la distribución del volumen de partículas para cada efluente ensayado. Efluente con letra distinta indica que existen diferencias significativas ($P < 0.05$).	76
Tabla 5.9. Calidad microbiológica de los efluentes de la EDAR de Celrà.	77
Tabla 5.10. Reducción de los parámetros físico-químicos del efluente secundario y terciario debido al efecto de los distintos sistemas de filtración. Resultados medios y desviaciones típicas, expresados en porcentaje de reducción del valor de entrada al sistema de filtración. Valores negativos indican aumentos del parámetro. Dentro de cada parámetro y para cada efluente, letras distintas indican diferencias significativas ($P < 0.05$).	78
Tabla 5.11. Reducción de los parámetros físico-químicos del efluente secundario debido al efecto de los sistemas de filtración obturados y no obturados. Resultados medios y desviaciones típicas, expresados en porcentaje de reducción del valor de la entrada al sistema de filtración. Valores negativos indican aumentos del parámetro. Dentro de cada parámetro y para cada sistema de filtración y estado, letras distintas indican diferencias significativas ($P < 0.05$).	79
Tabla 5.12. Reducción del número de partículas del efluente secundario y terciario debido al efecto de los distintos sistemas de filtración. Resultados medios y desviaciones típicas, expresados en porcentaje de reducción del valor de entrada al sistema de filtración. Valores negativos indican aumentos del parámetro. Dentro de cada parámetro y para cada efluente, letras distintas indican diferencias significativas ($P < 0.05$).	80

Tabla 5.13. Reducción del número de partículas del efluente secundario debido al efecto de los sistemas de filtración obturados y no obturados. Resultados medios y desviaciones típicas, expresados en porcentaje de reducción del valor de la entrada al sistema de filtración. Valores negativos indican aumentos del parámetro. Dentro de cada parámetro y para cada sistema de filtración y estado, letras distintas indican diferencias significativas ($P < 0.05$).	81
Tabla 5.14. Clasificación y principales parámetros descriptivos de los lavados de los filtros de las distintas unidades de filtración del ensayo con efluente secundario.	91
Tabla 5.15. Clasificación y principales parámetros descriptivos de los lavados de los filtros de las distintas unidades de filtración del ensayo con efluente terciario.	92
Tabla 5.16. Diferenciación estadística entre los volúmenes de los ciclos de filtración. Para cada intervalo de funcionamiento, sistemas de filtración con letras distintas indican diferencias significativas ($P < 0.05$).	96
Tabla 5.17. Descripción del global de los lavados de los filtros de los dos ensayos.	97
Tabla 5.18. Valores descriptivos de la granulometría de la arena antes y después de su utilización durante 1000 h con efluente secundario y terciario. Para cada tipo de efluente y característica granulométrica, letras distintas indican diferencias significativas ($P < 0.05$).	98
Tabla 5.19. Media del coeficiente de regresión obtenido en el ajuste para la determinación de los índices de filtrabilidad por cada sistema de filtración y efluente ensayado. Todas las regresiones fueron estadísticamente significativas ($P < 0.05$).	106
Tabla 5.20. Coeficientes de regresión ajustados (R^2) y coeficientes de variación (CV) de las diferentes relaciones dimensionales ensayadas para los distintos filtros utilizados ($P < 0.001$).	109
Tabla 5.21. Nivel de significación (P-valor) del modelo estadístico y de cada factor y sus interacciones para la explicación de la variabilidad del porcentaje del caudal inicial emitido en el ensayo con efluente secundario y para cada momento de muestreo.	118
Tabla 5.22. Nivel de significación (P-valor) del modelo estadístico y de cada factor y sus interacciones para la explicación de la variabilidad del porcentaje del caudal inicial emitido en el ensayo con efluente terciario y para cada momento de muestreo.	118
Tabla 5.23. Pérdida de presión en los laterales y coeficiente de uniformidad de presión al inicio y al final de los ensayos con efluente secundario y terciario.	127
Tabla 5.24. Caudal estimado a partir de los datos de medida de uniformidad de emisión de caudales y medido por el caudalímetro. Un P-valor < 0.05 indica que existen diferencias significativas entre los dos valores.	130
Tabla 5.25. Caudal estimado a partir de los datos de medida de uniformidad de emisión de caudales y el medido por el caudalímetro para los distintos momentos de determinación. Un P-valor < 0.05 indica que existen diferencias significativas entre los dos valores.	131
Tabla 5.26. Diferenciación estadística entre los volúmenes de los ciclos de filtración. Para cada sistema de filtración y efluente, horas de riego con letras distintas indican diferencias significativas ($P < 0.05$).	132

Tabla 5.27. Volumen de efluente distribuido por los laterales monitorizados, después de 1000 h de riego, para cada ensayo y sistema de filtración (m ³).....	133
Tabla 5.28. Volumen de efluente distribuido por cada sistema de filtración, después de 1000 h de riego, para cada efluente (m ³).....	136
Tabla 5.29. Diferencias entre la presión medida por el transductor y la medida por el manómetro digital. Un P-valor <0.05 indica que existen diferencias significativas entre los dos valores.....	138
Tabla 5.30. Indicación de la posición menos sucia (inicio o final) según las imágenes de las fotografías tomadas para cada emisor, sistema de filtración, vista del emisor y efluente ensayado.....	145
Tabla 5.31. Valoración de la suciedad presentada en el exterior e interior de los emisores, al inicio y al final de los laterales con los dos efluentes ensayados. Para un mayor valor indica mayor suciedad presentada.....	146

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Consumo porcentual por sectores del agua de alta calidad en Europa y España. (FAO, 2008)	1
Figura 1.2. Evolución de la recogida, tratamiento y reutilización del agua residual (INE, 2008).....	3
Figura 1.3. Evolución del porcentaje de agua utilizada según la técnica de aplicación de riego en los últimos años (INE, 2008).....	4
Figura 4.1. Imagen por satélite de la situación de la parcela de goteros (recuadro blanco) y del banco de ensayo de filtración (circunferencia blanca) Fuente: Google Earth 4.0.2737 (Google Earth, 2007).....	23
Figura 4.2. Evolución de la temperatura durante la realización del ensayo con efluente secundario (2005).....	24
Figura 4.3. Evolución de la temperatura durante la realización del ensayo con efluente terciario (2006).....	24
Figura 4.4. Precipitación diaria durante la realización de los ensayos con efluente secundario (2005) y terciario (2006).	25
Figura 4.5. Esquema hidráulico del banco de filtración.....	28
Figura 4.6. Esquema de la disposición, por unidad, de los laterales y tipos de emisores.	32
Figura 4.7. Esquema de comunicaciones del sistema SCADA utilizado en los ensayos.....	34
Figura 4.8. Pantallas del sistema SCADA de presentación (a), de acceso a las opciones (b), de programación de los riegos (c) y de supervisión en tiempo real del funcionamiento (d).	35
Figura 4.9. Evolución de las horas de funcionamiento acumulado por cada sistema de filtración en el ensayo con efluente secundario y terciario, respectivamente.	39
Figura 4.10. Evolución de la presión de entrada a los distintos sistemas de filtración durante la ejecución del ensayo con efluente secundario.....	42
Figura 4.11. Evolución de la presión de entrada a los distintos sistemas de filtración durante la ejecución del ensayo con efluente terciario.....	43
Figura 4.12. Curva granulométrica de la arena silícea utilizada en los filtros de arena.....	44
Figura 4.13. Localización de los emisores a muestrear para la medida de la uniformidad en un lateral.	53
Figura 5.1. Evolución del pH de los efluentes a la entrada de los sistemas de filtración durante los ensayos.....	68

Figura 5.2. Evolución de la conductividad eléctrica de los efluentes a la entrada de los sistemas de filtración durante los ensayos.....	69
Figura 5.3. Evolución de la temperatura de los efluentes a la entrada de los sistemas de filtración durante los ensayos.....	69
Figura 5.4. Evolución del oxígeno disuelto de los efluentes a la entrada de los sistemas de filtración durante los ensayos.....	70
Figura 5.5. Evolución de la demanda química de oxígeno del efluente secundario.....	71
Figura 5.6. Evolución de la turbidez de los efluentes a la entrada de los sistemas de filtración durante los ensayos.....	72
Figura 5.7. Evolución de los sólidos en suspensión de los efluentes a la entrada de los sistemas de filtración durante los ensayos.....	72
Figura 5.8. Evolución del número de partículas de los efluentes a la entrada de los sistemas de filtración durante los ensayos.....	73
Figura 5.9. Representación de los residuos en el ajuste lineal de la turbidez y los sólidos en suspensión.....	74
Figura 5.10. Distribución media del número de partículas de los efluentes utilizados.....	76
Figura 5.11. Distribución media del volumen de partículas de los efluentes ensayados.....	77
Figura 5.12. Efecto de los diferentes sistemas de filtración en la media de la distribución del número de partículas de los dos efluentes ensayados. Para cada efluente, columnas con letra distinta indican que existen diferencias significativas ($P<0.05$).....	82
Figura 5.13. Efecto de los sistemas de filtración combinado y malla, en estado obturado y no obturado, en el valor de la media de la distribución del número de partículas del efluente secundario. Para cada efluente, columnas con letra distinta indican que existen diferencias significativas ($P<0.05$).....	82
Figura 5.14. Distribución del número de partículas del efluente secundario antes y después de ser filtrado.....	83
Figura 5.15. Distribución del número de partículas del efluente secundario antes y después de ser filtrado por los sistemas de filtración combinado y malla en estado obturado y no obturado.....	83
Figura 5.16. Distribución del número de partículas del efluente terciario antes y después de ser filtrado.....	84
Figura 5.17. Reducción del número de partículas del efluente secundario en cada sistema de filtración en función del diámetro de la partícula.....	85
Figura 5.18. Comparación de la reducción del número de partículas del efluente secundario en los sistemas de filtración combinado y malla en estado obturado y no obturado.....	85

Figura 5.19. Reducción del número de partículas del efluente terciario en cada sistema de filtración en función del diámetro de la partícula.	86
Figura 5.20. Efecto de los diferentes sistemas de filtración en la mediana de la distribución del volumen de partículas en los dos efluentes ensayados. Para cada efluente, columnas con letra distinta indican que existen diferencias significativas ($P < 0.05$).	87
Figura 5.21. Efecto de los sistemas de filtración combinado y malla, en estado obturado y no obturado, en el valor de la mediana de la distribución del volumen de partículas del efluente secundario. Para cada efluente, columnas con letra distinta indican que existen diferencias significativas ($P < 0.05$).	88
Figura 5.22. Distribución del volumen de partículas del efluente secundario antes y después de ser filtrado.	88
Figura 5.23. Distribución del volumen de partículas del efluente terciario antes y después de ser filtrado.	89
Figura 5.24. Comparación de la distribución del volumen de partículas del efluente secundario antes y después de ser filtrado con los sistemas de filtración combinado y de malla en estado obturado y no obturado.	90
Figura 5.25. Evolución de la duración de los ciclos de filtración a lo largo de los ensayos con efluente secundario y terciario.	95
Figura 5.26. Curvas granulométricas de la arena antes y después de su utilización con efluente secundario y terciario.	98
Figura 5.27. Evolución de la conductividad hidráulica saturada del medio filtrante del filtro de arena durante la realización de los ensayos con el efluente secundario y terciario.	99
Figura 5.28. Evolución de la conductividad hidráulica saturada del medio filtrante del filtro de arena durante un ciclo de filtrado.	100
Figura 5.29. Evolución de la conductividad hidráulica saturada de la arena del filtro durante la realización de los ensayos con efluente secundario y terciario.	101
Figura 5.30. Evolución del tamaño del poro de filtración del medio filtrante de un filtro de arena durante un ciclo de filtrado con efluente secundario y efluente terciario.	102
Figura 5.31. Evolución del diámetro del poro del medio granular durante la realización del ensayo con efluente secundario y terciario.	102
Figura 5.32. Evolución de la caída de presión en el filtro de arena en algunos ciclos de filtración del ensayo con efluente secundario y terciario.	103
Figura 5.33. Evolución de la caída de presión en el filtro de anillas en algunos ciclos de filtración del ensayo con efluente secundario y terciario.	103
Figura 5.34. Evolución de la caída de presión en el filtro de mallas en algunos ciclos de filtración del ensayo con efluente secundario y terciario.	104

Figura 5.35. Evolución de los índices de filtrabilidad de los distintos filtros utilizados durante la realización del ensayo con efluente secundario y terciario.	106
Figura 5.36. Media de mínimos cuadrados y error estándar del índice de filtrabilidad obtenido por los distintos sistemas de filtración al final del ensayo con efluente secundario y terciario. Para cada sistema de filtración, letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas ($P < 0.05$) entre los índices de filtrabilidad obtenidos en los ensayos con los dos efluentes. Para cada tipo de efluente ensayado, letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas ($P < 0.05$) entre los índices de filtrabilidad obtenidos con los distintos sistemas de filtración.	108
Figura 5.37. Evolución de la pérdida de presión en un ciclo del filtro de arena y estimación de esta evolución utilizando las ecuaciones 5-III y 5-VI.	112
Figura 5.38. Evolución de la pérdida de presión en un ciclo del filtro de malla y predicción de esta evolución utilizando las ecuaciones 5-V y 5-VIII.	113
Figura 5.39. Uniformidad de emisión de caudales (UE), porcentaje de caudal inicial (q_{po}) y porcentaje de emisores completamente obturados (n_{ic}) a las 1000 h de ensayo para cada emisor, sistema de filtración y efluente utilizado.	114
Figura 5.40. Evolución del porcentaje del caudal inicial de los distintos emisores en cada sistema de filtración utilizando efluente secundario.	116
Figura 5.41. Evolución del porcentaje del caudal inicial de los distintos emisores en cada sistema de filtración utilizando efluente terciario.	117
Figura 5.42. Porcentaje de caudal inicial al final del ensayo con efluente secundario y terciario en función del emisor y de su posición. Para cada efluente y emisor, letras minúsculas diferentes indican que existen diferencias significativas ($P < 0.05$) entre las posiciones de muestreo. Para efluente y posición de muestreo, letras mayúsculas diferentes indican que existen diferencias significativas ($P < 0.05$) entre emisores.	119
Figura 5.43. Porcentaje de emisores completamente obturados con efluente secundario en las posiciones de muestreo para la medida de la uniformidad de emisión de caudales a lo largo del ensayo (en horas) en función de la posición, tipo de emisor y sistema de filtración.	122
Figura 5.44. Porcentaje de emisores completamente obturados con efluente terciario en las posiciones de muestreo para la medida de la uniformidad de emisión de caudales a lo largo del ensayo (en horas) en función de la posición, tipo de emisor y sistema de filtración. Las posiciones 1/3 y 2/3 de la longitud total del lateral no se presentan porque no se encontraron emisores completamente obturados.	123
Figura 5.45. Porcentaje de caudal inicial al final del ensayo con efluente terciario en función del sistema de filtración y la posición. Para cada sistema de filtración, letras minúsculas diferentes indican que existen diferencias significativas ($P < 0.05$) entre las posiciones de muestreo. Para cada posición de muestreo, letras mayúsculas diferentes indican que existen diferencias significativas ($P < 0.05$) entre los sistemas de filtración.	124
Figura 5.46. Comparación entre el porcentaje de caudal inicial de los goteros ubicados al final del lateral emitido a la 1000 h antes del lavado y después del lavado de los laterales.	125

Figura 5.47. Evolución de la uniformidad de presión de los distintos emisores por cada sistema de filtración utilizando efluente secundario.	128
Figura 5.48. Evolución de la uniformidad de presión de los distintos emisores por cada sistema de filtración utilizando efluente terciario.	129
Figura 5.49. Evolución del porcentaje de caudal inicial de los cuatro laterales monitorizados en función de las horas transcurridas de riego con efluente secundario y terciario.	132
Figura 5.50. Evolución del porcentaje de caudal inicial de las cuatro unidades de riego en función de las horas transcurridas de ensayo con efluente secundario y terciario.	136
Figura 5.51. Evolución de la presión en las cuatro localizaciones del lateral UN monitorizado, para cada sistema de filtración, durante la realización del ensayo con efluente secundario.	139
Figura 5.52. Evolución de la presión en las cuatro localizaciones del lateral UN monitorizado, para cada sistema de filtración, durante la realización del ensayo con efluente terciario.	141

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Ilustración 4.1. Elementos de los emisores UN y RM utilizados en los ensayos.....	30
Ilustración 4.2. Elementos de los emisores P2 y P8, TI y TO utilizados en los ensayos.	30
Ilustración 4.3. Vista de los emisores integrados UN (a), RM (b), TI (c) y TO (d), desde el interior del lateral y de la primera parte del laberinto de los emisores insertados P2 (e) y P8(f).	31
Ilustración 4.4. Vista del laberinto de los emisores UN (a), RM (b), TI (c), TO (d), P2 (e) y P8 (f) utilizados en los ensayos con efluente secundario y terciario.	31
Ilustración 4.5. Pantallas presentadas para acceder remotamente al ordenador de control de la instalación.....	36
Ilustración 4.6. Presentación de la pantalla del ordenador de control en un ordenador remoto.	36
Ilustración 4.7. Proceso de recogida del volumen emitido por los emisores en las pruebas de uniformidad (a) y manómetro digital, adaptador de aguja y toma de presión en una porción de lateral con emisores UN (b).	54
Ilustración 5.1 Deposición húmeda (a) y seca (b) al inicio del lateral con los emisores P2 y P8 con sistema de filtración de arena después de 1000 h de riego con efluente terciario.	143
Ilustración 5.2. Estado de los emisores UN (a), RM (b), TI (c) y TO (d) ubicados al principio del lateral, después de 1000 h de riego con efluente secundario y protección con un filtro de malla. En blanco se muestra el estado de los filtros de entrada de agua a los emisores.	143
Ilustración 5.3. Estado de los laberintos de los emisores UN (a), RM (b), TI (c), TO (d) y P2 (e) del final del lateral, después de 1000 h de riego con efluente secundario y protección con un filtro de anillas.....	144
Ilustración 5.4. Fotografías del gotero TO protegido con un filtro de anillas después de 1000 h de riego con efluente secundario. Vista exterior de los emisores desde la parte interior de la tubería al inicio (a) y al final del lateral (b) y vista de los laberintos al inicio (c) y final del lateral (d).	144
Ilustración 5.5. Vista exterior del emisor UN del inicio del lateral y protegido con sistema de filtración de arena (1), anillas (2), combinado (3) y malla (4) después del ensayo de 1000 h con efluente secundario.	145
Ilustración 5.6. Depósito acumulado al final del lateral con emisor UN (a) y TO (b y c) después de 1000 h de riego con efluente secundario.	147
Ilustración 5.7. Partículas minerales observadas al final del lateral con emisor P8 y sistema de filtración de anillas.	148
Ilustración 5.8. Vaso conductor de vegetal superior (a) y grano de polen (b), observados en el depósito del lateral con emisor P8 y filtración de anillas.....	148

Ilustración 5.9. Resto de pared celular de vegetal superior observado en el depósito del final del lateral con emisor P8 y filtración con anillas. 148

Ilustración 5.10. Diatomea del género *Nitzschia* encontrada al final del lateral con emisor P8 y filtro de anillas (a), y diatomea del género *Navicula* encontrada al final del lateral con emisor UN y filtración de malla (b). 149

Ilustración 5.11. Diatomea del género *Hantzschia* (a) y su detalle con una bacteria (b) observada al depósito al final del lateral con emisor P8 y sistema de filtración con anillas.. 149

Ilustración 5.12. Escamas de tecamebas (a) y tecameba (b) observadas en el depósito del lateral con emisor P8 y filtración con anillas 150

Ilustración 5.13. Protozoo de la clase de los cilióforos observado en la deposición del lateral con emisor TO y sistema de filtración combinado..... 150

Ilustración 5.14. Protozoo ciliado del género *Vorticella* observado al final del lateral con emisor UN y filtración con malla. 151

Ilustración 5.15. Protozoo ciliado del género *Vorticella* observado al final del lateral con emisor UN y filtración con arena 151

Ilustración 5.16. Bacterias observadas sobre masas de origen orgánico. Las imágenes fueron tomadas de las deposiciones de los laterales con emisores P8, TI y UN con filtración de anillas (a), combinada (b) y malla (c), y de las deposiciones de los laterales con emisor UN y sistema de filtración de malla (d) y arena las dos siguientes (e y f). 152

Ilustración 5.17. Bacterias observadas en las deposiciones del final de los laterales de riego. En la parte superior, observaciones de los laterales con emisores P8, TI y TO con sistemas de filtración de anillas (a), combinado (b) y combinado (c); del lateral TO y filtración combinada (d) y del lateral UN con sistema de filtración de arena (e y f). 152

Ilustración 5.18. Bacterias espiroqueta observadas en las deposiciones del lateral con emisor TO y filtración combinada. 153

NOTACIÓN

Símbolo	Descripción	Dimensiones	
a	constante empírica	adimensional	-
A	superficie total de filtración	L^2	m^2
b	constante empírica	adimensional	-
c	constante empírica	adimensional	-
C_{lav}	porcentaje de agua utilizada para los lavados de los filtros	L^3	l
C	es el contenido en sólidos en suspensión del agua	ML^{-3}	kg/m^3
CE	conductividad eléctrica	$L^{-3}M^{-1}T^3A$	dS/m
CU	coeficiente de uniformidad de la arena	adimensional	-
CV	coeficiente de variación	adimensional	-
d	constante empírica	adimensional	-
d_o	diámetro efectivo del poro del medio granular	L	m
d_p	diámetro medio de las partículas del agua	L	m
d_t	diámetro de la tubería de entrada al filtro	L	m
D_e	diámetro efectivo de la arena utilizada en el filtro	L	m
DBO ₅	demanda bioquímica de oxígeno	ML^{-3}	mg/l
DQO	demanda química de oxígeno	ML^{-3}	mg/l
e	constante empírica	adimensional	-
Eu	número de Euler	adimensional	-
$e1$	constante empírica	adimensional	-
$e2$	constante empírica	adimensional	-
$e3$	constante empírica	adimensional	-
$e4$	constante empírica	adimensional	-
$e5$	constante empírica	adimensional	-
$e6$	constante empírica	adimensional	-
$e7$	constante empírica	adimensional	-
$e8$	constante empírica	adimensional	-
$e9$	constante empírica	adimensional	-
$e10$	constante empírica	adimensional	-
$e11$	constante empírica	adimensional	-
$e12$	constante empírica	adimensional	-

e_{13}	constante empírica	adimensional	-
e_{14}	constante empírica	adimensional	-
e_{15}	constante empírica	adimensional	-
e_{16}	constante empírica	adimensional	-
e_{17}	constante empírica	adimensional	-
e_{18}	constante empírica	adimensional	-
e_{19}	constante empírica	adimensional	-
e_{20}	constante empírica	adimensional	-
e_{21}	constante empírica	adimensional	-
e_{22}	constante empírica	adimensional	-
e_{23}	constante empírica	adimensional	-
e_{24}	constante empírica	adimensional	-
e_{25}	constante empírica	adimensional	-
e_{26}	constante empírica	adimensional	-
e_{27}	constante empírica	adimensional	-
g	gravedad	LT^{-2}	m/s^2
I	índice de filtrabilidad	L^{-3}	m^{-3}
K	constante de descarga de un emisor	adimensional	-
K_s	conductividad hidráulica saturada	LT^{-1}	m/s
L	altura del medio granular	L	m
n°	número de emisores evaluados	adimensional	-
n_c	número de emisores completamente obturados	adimensional	-
n_{tc}	porcentaje de emisores completamente obturados	adimensional	-
N°	número de ciclos de filtración	adimensional	-
N_0	parámetro físico-químico en la entrada del filtro	adimensional	-
N	parámetro físico-químico en la salida del filtro	adimensional	-
OD	oxígeno disuelto	ML^{-3}	mg/l
p_{25}	presión media del 25 % de los emisores con menor presión	$ML^{-1}T^{-2}$	kPa
\bar{p}	presión media de los emisores	$ML^{-1}T^{-2}$	kPa
p_e	presión del ensayo	$ML^{-1}T^{-2}$	kPa
P_{campo}	presión medida a campo	$ML^{-1}T^{-2}$	kPa
P_{norm}	presión normalizada (100kPa) del emisor	$ML^{-1}T^{-2}$	kPa

Símbolos y abreviaciones

q_{emisor}	caudal emitido por el emisor	L^3T^{-1}	l/h
$q_{e\ in}$	caudal medio de dos emisores contiguos al inicio del lateral	L^3T^{-1}	l/h
$q_{e\ 1/3}$	caudal medio de dos emisores contiguos a 1/3 de la longitud del lateral	L^3T^{-1}	l/h
$q_{e\ 2/3}$	caudal medio de dos emisores contiguos a 2/3 de la longitud del lateral	L^3T^{-1}	l/h
$q_{e\ fin}$	caudal medio de dos emisores contiguos al final del lateral	L^3T^{-1}	l/h
$q_{m\acute{a}x}$	caudal filtrado máximo en un ciclo de filtraci3n	L^3T^{-1}	l/h
$q_{m\acute{i}n}$	caudal filtrado mínimo en un ciclo de filtraci3n	L^3T^{-1}	l/h
q_n	caudal nominal del emisor	L^3T^{-1}	l/h
q_{po}	porcentaje de caudal inicial	adimensional	-
q_{var}	variaci3n del caudal filtrado en un ciclo de filtraci3n	adimensional	-
q_o	caudal inicial emitido por el emisor	L^3T^{-1}	l/h
q_{25}	caudal medio del 25 % de los emisores con menor caudal	L^3T^{-1}	l/h
\bar{q}	caudal medio de los emisores	L^3T^{-1}	l/h
Q	caudal filtrado	L^3T^{-1}	m ³ /h m ³ /s
$Q_{lat\ est}$	caudal lateral estimado	L^3T^{-1}	l/h
$Q_{lat\ medido}$	caudal lateral medido	L^3T^{-1}	l/h
$Q_{lat\ t\ in}$	caudal lateral en el tiempo de medida de los emisores del inicio del lateral	L^3T^{-1}	l/h
$Q_{lat\ t\ 1/3}$	caudal lateral en el tiempo de medida de los emisores de 1/3 de la longitud del lateral	L^3T^{-1}	l/h
$Q_{lat\ t\ 2/3}$	caudal lateral en el tiempo de medida de los emisores de 2/3 de la longitud del lateral	L^3T^{-1}	l/h
$Q_{lat\ t\ fin}$	caudal lateral en el tiempo de medida de los emisores del final del lateral	L^3T^{-1}	l/h
Q_{medio}	caudal filtrado medio en un ensayo	L^3T^{-1}	l/h
$Q_{P\ norm}$	caudal emitido por emisor a la presi3n normalizada (100 kPa)	L^3T^{-1}	l/h
$Q_{P\ campo}$	caudal emitido por emisor a la presi3n de campo	L^3T^{-1}	l/h
R	porcentaje de reducci3n	adimensional	-

Símbolos y abreviaciones

Re	número de Reynolds	adimensional	-
R^2	coeficiente de regresión	adimensional	-
S	sección del medio filtrante	L^2	m^2
S_{lat}	sección del lateral	L^2	dm^2
SS	sólidos en suspensión	ML^{-3}	mg/l
t	tiempo	T	s
UE	uniformidad de emisión de caudales	adimensional	-
U_p	uniformidad de presiones	adimensional	-
v	velocidad de filtración	LT^{-1}	m/h m/s
v_{media}	velocidad media de filtración en un ensayo	LT^{-1}	$l/m^2 \cdot s$
$v_{lav lat}$	velocidad lavado del lateral	LT^{-1}	m/s
V	volumen filtrado	L^3	l m^3
V_f	volumen filtrado durante un ciclo de filtración	L^3	l
V_{fo}	volumen total filtrado al iniciar un ciclo de filtración	L^3	l
V_{ff}	volumen total filtrado al finalizar un ciclo de filtración	L^3	l
$V_{lav lat}$	volumen recogido durante lavado lateral	L^3	l
V_u	agua utilizada para lavar un filtro	L^3	l
V_{uo}	agua total utilizada antes del lavado de un filtro	L^3	l
V_{uf}	agua total utilizada después del lavado de un filtro	L^3	l
x	exponente hidráulico de descarga de un emisor	adimensional	-
ΔH	diferencia de presión entre la entrada y la salida del filtro	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa mca
ΔH_0	diferencia de presión entre la entrada y la salida del filtro al inicio del ciclo de filtración	$ML^{-1}T^{-2}$	Pa
μ	viscosidad del agua	$ML^{-1}T^{-1}$	Pa·s
ρ	densidad del agua	ML^{-3}	kg/m^3
π	número adimensional	adimensional	-
ϕ_f	la luz de los filtros	L	m

1. Introducción

1.1. Usos del agua

El agua es un recurso necesario para la agricultura. Disponer de este bien permite la intensificación de muchos cultivos, aumentar la productividad y, en otros casos, asegurar la viabilidad del cultivo. Pero el agua disponible no tiene como único objetivo satisfacer las necesidades de la agricultura sino que tiene que complacer también las necesidades urbanas e industriales por lo que los tres sectores entran en competencia por este recurso limitado. Hoy en día, tanto en España como en Catalunya, la agricultura utiliza la mayor parte del volumen de agua (Figura 1.1). En Europa y en EE.UU., el mayor consumidor de agua es el sector industrial, mientras que en América Latina, África, Asia y Oceanía, el sector agrario utiliza, entre un 70.7 y un 87.6 % de las aguas de calidad (FAO, 2008).

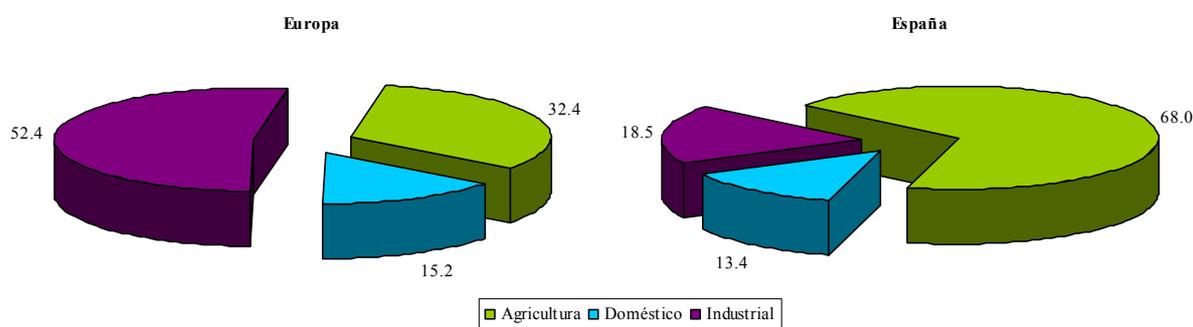


Figura 1.1. Consumo porcentual por sectores del agua de alta calidad en Europa y España. (FAO, 2008)

En la Tabla 1.1 se presentan, valores de consumo de agua, productividad y nivel de ocupación generado por cada uno de los sectores usuarios de agua en Catalunya. Las mayores productividades del agua, en términos de valor añadido bruto por cada metro cúbico de agua, se consiguen en la industria, seguida de cerca por las actividades urbanas, que son la mayor generadora de ocupación. En términos relativos, la productividad específica (por metro cúbico) del sector industrial es superior a la de las actividades urbanas, y muy superior también a la del sector agrario. No obstante estos valores económicos del uso del agua, magnificados por el hecho que el sector industrial aquí presentado engloba el sector agroindustrial, el más importante en Catalunya, la agricultura es un sector estratégico con multifuncionalidad, como la de fijar la población o mantener el paisaje del territorio.

Tabla 1.1. Importancia relativa de cada uno de los usos del agua en Catalunya en 2006 (ACA, 2008).

Sector	Valor añadido bruto		Ocupación		Uso	
	Millones de euros	%	Trabajadores	%	hm ³	%
Industrial	24936	28	689145	27	188	7
Zonas urbanas	59000	67	1745000	69	541	19
usos domésticos	-	-	-	-	405	14
actividades económicas	59000	-	1745000	69	136	5
Agrario	1550	2	69287	3	2141	74
Agricultura	-	-	-	-	2076	72
Ganadería	-	-	-	-	65	2
Energético	2533	3	16400	1	-	-

Además de la competencia desigual, en Catalunya, al igual que en otros países de la cuenca mediterránea se sufren con periodicidad períodos de carencia de agua. Esto hace indispensable el desarrollo de políticas de ahorro de agua a todos los niveles (Oñate, 2006).

En Europa, la Directiva Marco del Agua (2000/60/EC del 23 de octubre) inició un cambio drástico en el planteamiento de la gestión del agua. Con esta Directiva, se pretende combinar la protección del estado ecológico con el uso del agua a largo plazo y el desarrollo sostenible. De forma indirecta la Directiva refuerza la necesidad de la reutilización de las aguas residuales regeneradas (Hidalgo *et al.*, 2005; Oñate, 2006) para resolver, en parte, problemas de disponibilidad de recursos hídricos ya que según Oñate (2006):

- Se aumentaría la disponibilidad del recurso hídrico sin necesidad de recurrir a fuentes convencionales.
- Se reduciría la demanda de recursos de mayor calidad.
- Se disminuiría los problemas de contaminación por reducción de los puntos de vertido.
- Indirectamente se permitiría a los otros sectores la disponibilidad de mayor cantidad de recursos de mayor calidad y el mantenimiento de los ecosistemas acuáticos al disminuir la presión de extracción y de vertido.

En España, desde 1999 el volumen de aguas residuales recogidas y tratadas ha ido aumentando gracias a la entrada en servicio de nuevas estaciones depuradoras (Figura 1.2). En Catalunya, estos valores no han presentado grandes variaciones. Por lo que se refiere al volumen de agua reutilizada, mientras en Catalunya entre los años 1999 y 2005 se ha mantenido, en unos valores muy bajos, entre 0.16 y 0.12 hm³/día, en España se ha pasado en el mismo período de 0.87 a los 1.24 hm³/día. En 2005 el volumen de agua reutilizada representó un 8.50 % y un 7.50 % del agua residual total tratada en España y Catalunya, respectivamente (INE, 2008). Aunque se han encontrado valores contradictorios referidos a la reutilización en Catalunya, la ACA (2008) indica que en 2006 se reutilizó un 3 % del agua depurada, siendo estos valores aún muy bajos.

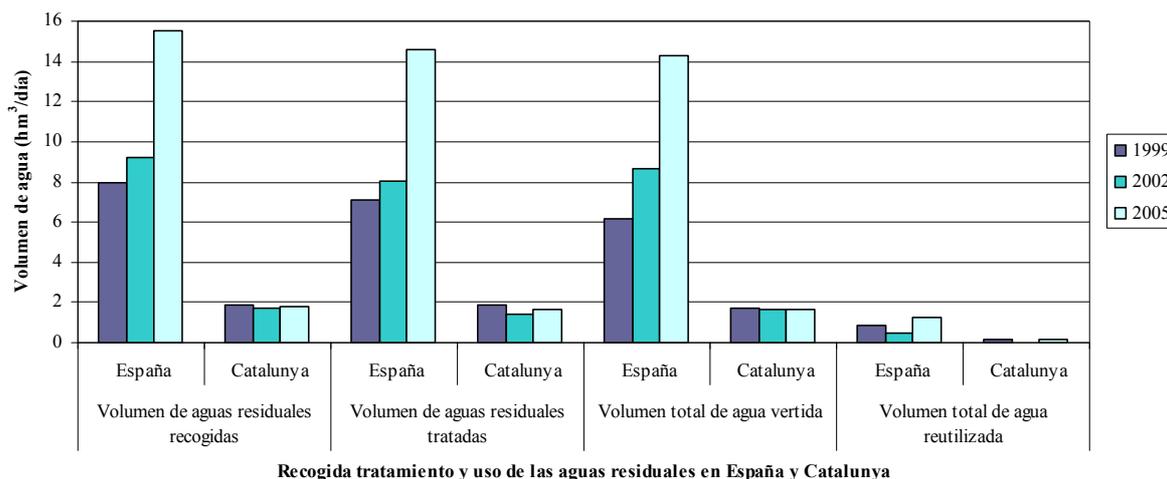


Figura 1.2. Evolución de la recogida, tratamiento y reutilización del agua residual (INE, 2008).

En la provincia de Girona, el Consorci de la Costa Brava gestiona 19 estaciones depuradoras de aguas residuales, de las cuales 13 disponen de proyecto de reutilización del agua que regeneran. Según datos del Consorci (CCB, 2008) el agua regenerada es utilizada para regar campos de golf, recargar acuíferos, regar zonas agrícolas y también para usos ambientales, usos urbanos y no potables, representando el volumen de agua reutilizada cerca del 25% del agua depurada.

En diciembre de 2007 se aprobó el Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre (BOE, 2007) por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. En esta disposición se definen los requisitos de calidad que tiene que cumplir el agua regenerada en función del uso al que se destine, pero no se refiere en ningún caso a los procesos de tratamiento para conseguir estos niveles de calidad.

1.2. Reutilización de agua regenerada para el riego

El uso de agua regenerada en la agricultura, además de la ya comentada liberación de agua de calidad para otros usos, puede significar para la agricultura un aporte de nutrientes que pueden ser utilizados por los cultivos, disminuyendo el coste de fertilización y compensar así, más rápidamente, el coste de implantación de un riego con aguas regeneradas (Trooien y Hills, 2007).

Para obtener las mayores ventajas ambientales y los menores riesgos sanitarios es aconsejable el uso del sistema de riego por goteo (Bucks *et al.*, 1979), puesto que minimiza el riesgo de contaminación a los cultivos por la manera de aplicar el agua, utiliza bajos caudales y tiene bajos requerimientos de presión. También permite regar superficies de forma y tamaños distintos y con pendientes mayores y evita la contaminación por deriva de aerosoles (Gushiken, 1995; Trooien *et al.*, 2000).

La técnica de aplicación del agua de riego ha sufrido cambios importantes en la última década. En la Figura 1.3 se observa que entre los años 1999 y 2005, el porcentaje del agua utilizada en el riego por superficie han disminuido un 17.6 % en España y un 37.5 % en Catalunya, mientras que el agua utilizada para el riego localizado por goteo ha aumentado un 24.6 % en España y un 48.8 % en Catalunya.

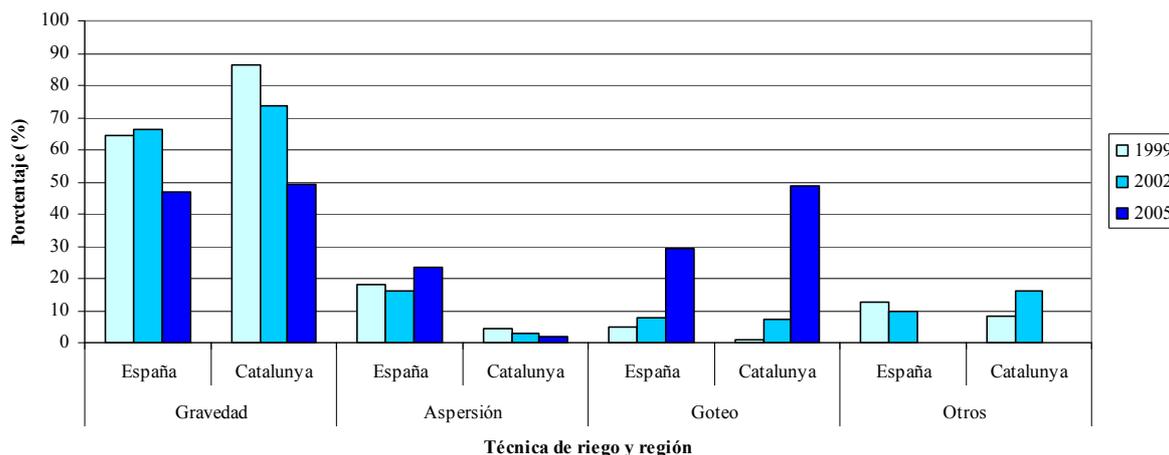


Figura 1.3. Evolución del porcentaje de agua utilizada según la técnica de aplicación de riego en los últimos años (INE, 2008).

Los sistemas de riego por goteo tienen la limitación de la obturación de los emisores (Bucks *et al.*, 1979; Adin y Sacks, 1987; Ravina *et al.*, 1997; Trooien y Hills, 2007) que pueden afectar gravemente a la distribución del agua, reducir las productividades (Tajrishy *et al.*, 1994) que en cultivos de alto valor económico, ya sean anuales o plurianuales donde la longevidad del sistema es especialmente importante, pueden provocar importantes pérdidas económicas (Nakayama *et al.*, 2007). También tienen un mayor coste de instalación y de mantenimiento, haciendo necesario el entreno del personal y la participación de especialistas (Trooien y Hills, 2007).

Un correcto diseño, instalación y mantenimiento del sistema de riego puede minimizar los problemas pero aunque haya información sobre los factores que provocan obturaciones, no siempre las medidas tomadas son exitosas (Nakayama *et al.*, 2007).

La obturación de los emisores está directamente relacionada con la calidad del agua utilizada. No hay una única prueba para la determinación del potencial de obturación del efluente, pero analizando determinados constituyentes del efluente se pueden anticipar algunos posibles parámetros influyentes. Las partículas en suspensión, la composición química y la población microbiológica que se pueden encontrar, dictan el tipo de tratamiento que puede ser necesario para la prevención de estas obturaciones (Nakayama *et al.*, 2007). Según Adin (2002) la formación de biofilm es uno de los principales factores en la obturación de los sistemas de riego por goteo cuando se utilizan aguas residuales. En la Tabla 1.2 se presenta una clasificación de las aguas regeneradas en función de los parámetros físico-químicos y microbiológicos de la caracterización del agua.

Tabla 1.2. Clasificación de las aguas residuales tratadas según el riesgo de obturación de los sistemas de riego localizado (Bucks *et al.*, 1979).

Factor obturador	Riesgo de obturación		
	Débil	Moderado	Importante
Física			
Sólidos en suspensión (mg/l)	<50	50-100	>100
Química			
pH	≤7.0	7.0-8.0	≥8.0
Sólidos disueltos (mg/l)	<500	500-2000	>2000
Hierro (mg/l)	<0.1	0.1-1.5	>1.5
Manganeso (mg/l)	<0.1	0.1-1.5	>1.5
Ácido sulfúrico (mg/l)	<0.2	0.2-2.0	>2.0
Biológica			
Población bacteriana por cm ³	<10000	10000-50000	>50000

La filtración es una operación que permite prevenir las obturaciones en instalaciones de riego por goteo (Capra y Scicolone, 2005), aunque no las evita por completo (Tajrishy *et al.*, 1994).

La determinación de la calidad del agua utilizada, un correcto diseño y manejo de los sistemas de riego son factores muy importantes para prevenir las obturaciones de los emisores y por tanto mantener una alta homogeneidad en la distribución del agua en la parcela.

2. Revisión bibliográfica

En este apartado se exponen las principales referencias bibliográficas encontradas sobre la investigación del comportamiento hidráulico de las instalaciones de riego por goteo con aguas regeneradas. Para cada una de las variables de interés: efluente, filtros, goteros, duración de los ensayos y método utilizado para la determinación de la uniformidad de riego, se realiza un análisis comparativo entre las características de las investigaciones referenciadas. Finalmente se dedica un sub-apartado a la monitorización y control de los sistemas de riego, por el interés que ha presentado en el desarrollo de las experiencias.

2.1. Efluente

La tipología de los efluentes utilizados es variada. Algunos investigadores han trabajado con aguas residuales tratadas (Ravina *et al.*, 1992, 1995, 1997; Schischa *et al.*, 1997; Hills *et al.*, 2000; Hills y Brenes, 2001; Capra y Scicolone, 2004, 2005, 2007; Chica *et al.*, 2001; Granados *et al.*, 2001; Abedi-Koupai y Bakhtiarifar, 2003; Rowan, 2004; Cararo *et al.*, 2006) y otros han trabajado con aguas de balsas que recogen aguas de diferente origen, ya sea aguas residuales urbanas o de escorrentía (Adin y Sacks, 1987; Oron *et al.*, 1980; Taylor *et al.*, 1989, 1995; Resende *et al.*, 2000; Ravina, 2002). Nakayama *et al.* (1978), Ribeiro *et al.* (2005a) y Dehghanisani *et al.* (2004, 2005), trabajaron con aguas de río y, Oron *et al.* (1979), con agua de río y escorrentía.

En la bibliografía publicada es común la caracterización físico-química del efluente a la entrada del sistema de riego, excepto en el caso de Granados *et al.* (2001). Sin embargo, a pesar de su interés, es mucho menos frecuente su caracterización una vez filtrado, lo que impide conocer la eficiencia de los sistemas de filtración. Únicamente Nakayama *et al.* (1978), Oron *et al.* (1980), Ravina *et al.* (1992, 1997), Tajrishy *et al.* (1994) y Puig-Bargués *et al.* (2005c) caracterizaron el efluente antes y después de filtrar.

Los parámetros que permiten caracterizar el agua para conocer su grado de embozamiento potencial son, principalmente, los sólidos en suspensión (SS) y la contaminación orgánica medida indirectamente en forma de DBO₅ (Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días) y/o DQO (Demanda Química de Oxígeno). Además, algunos trabajos amplían estos análisis a otros parámetros como el pH, la conductividad eléctrica, la turbidez y algunos macronutrientes, normalmente nitrógeno, fósforo y potasio. En la Tabla 2.1 se presentan los valores de los sólidos en suspensión, la DBO₅ y la DQO en los trabajos analizados. Estos tres parámetros están relacionados con las partículas del agua, ya sean orgánicas o inorgánicas, y valores altos representan mayores riesgos de obturación en el sistema de riego (Nakayama y Bucks, 1991). Ravina *et al.* (1997), Trooien *et al.* (2000), El-Berry *et al.* (2003) y Capra y Scicolone (2007) utilizaron las aguas de peor calidad, desde el punto de vista de mayor riesgo de embozamiento.

Tabla 2.1. Valores de los parámetros físico-químicos de las aguas utilizadas en los trabajos estudiados.

Trabajo	Origen del efluente	Tratamiento	SS (mg/l)	DBO ₅ (mg/l)	DQO (mg/l)
Abedi-Koupai y Bakhtiarifar (2003)	Urbana	-	32	35	70
Adin y Sacks (1987)	Urbana	Estanque de oxidación	13-87	12-60	-
Adin y Sacks (1991)	Urbana	Estanque de oxidación	3-163	6-26	96-204
Capra y Scicolone (2004, 2005, 2007)	Urbana	Secundario	3-376	15-200	-
Cararo et al. (2006)	Urbana	Secundario	15-31	14-26	64-80
Chica et al. (2001)	Urbana	Primario	6-109	235-264	500-568
El-Berry et al. (2003)	Generada	-	0-315	-	-
Dehghanisanij et al. (2005)	De río con contaminación orgánica	Filtración	5-54	11-63	1-8
Hills et al. (2000)	Urbana	-	2-30	10-40	-
Hills y Brenes (2001)	Urbana	Secundario	2-24	5-21	-
Nakayama et al. (1978)	De río	-	1-75	-	-
Oron et al. (1979)	Urbana	Limpia Primario Secundario	35-51	-	130-250
Oron et al. (1980)	Urbana y escorrentía	Estanque de oxidación	11-198	-	48-353
Puig-Bargués et al. (2005c)	Urbana Industrial	Primario Secundario	4-200	-	20-478
Ravina et al. (1992, 1995, 1997)	Agua río y de depuradora	Balsa	15-300	-	-
Resende et al. (2000)	Lago	-	2	-	-
Ribeiro et al. (2005a)	Balsa	-	2-20	-	-
Rowan et al. (2004)	Urbana	Primario	3-55	0.5-147	-
Schischa et al. (1997)	Urbana	Secundario	5-60	-	-
Trooien et al. (2000)	Escorrentía de granja	Balsa	190-1320	96-1033	-
Tajrishy et al. (1994)	Urbana	Secundario	2-30	8-39	-
Taylor et al. (1989)	Urbana	Estanque de oxidación	18-46	-	47-123
Taylor et al. (1995)	Urbana	Estanque de oxidación	-	50	122

En muchas investigaciones se ha concluido que la calidad del agua era uno de los factores con más incidencia en el correcto funcionamiento de la instalación. Adin y Sacks (1987) encontraron que los sólidos en suspensión y, con mayor efecto, el tamaño de partículas, que no el número, además de la contaminación orgánica, eran las características más influyentes en las obturaciones de los goteros. Capra y Scicolone (2001, 2004) también determinaron como factor más importante de la obturación los sólidos en suspensión y la carga orgánica. En su estudio de 2004 encontraron coeficientes de correlaciones del orden de 0.9 (con un nivel de significación de $P < 0.05$) entre los sólidos en suspensión y el número de lavados del filtro de arena y el número de goteros totalmente embozados. Además, señalaron también que la variabilidad en la calidad del efluente provocaba variabilidad en el comportamiento de la

instalación, de aquí la importancia de una alta intensidad de muestreo de los efluentes de entrada.

Chica *et al.* (2001) indicaron la necesidad como mínimo de un tratamiento primario y una filtración para reducir los sólidos en suspensión y disminuir así el grado de obturación de los goteros. Por otra parte, estos mismos autores propusieron aumentar la presión antes de finalizar el riego para prevenir obturaciones. Otras veces se ha aconsejado la filtración porque los limos microbianos se han presentado como el agente más importante para producir obturaciones (Ravina *et al.*, 1997). Hills *et al.* (2000) consideraron que la filtración era necesaria aunque se hubiera realizado un tratamiento del agua con rayos ultravioletas.

En relación con la calidad de los efluentes después de la filtración, Puig-Bargués *et al.* (2005b), no encontraron reducciones significativas en los parámetros del agua en las distintos filtros que utilizaron.

2.2. Filtros

Mientras que algunas investigaciones se han centrado en analizar únicamente el comportamiento de los filtros utilizando agua residual tratada (Adin y Elimelech, 1989; Puig-Bargués *et al.*, 2005a, 2005c) o agua superficial (Ribeiro *et al.*, 2005a), otros estudios han tratado de manera conjunta el comportamiento hidráulico de los filtros y de los goteros del sistema de riego utilizando aguas residuales tratadas, enfoque que ha permitido conocer la interacción entre ambos componentes de la instalación (Nakayama *et al.*, 1978; Oron *et al.*, 1980; Ravina *et al.*, 1992, 1995, 1997; Tajrishy *et al.*, 1994; Puig-Bargués, 2003; Dehghanisanij *et al.*, 2004; Capra y Scicolone, 2004, 2005, 2007;).

Los filtros de arena, de malla y de anillas son los utilizados en los trabajos consultados, tal como se puede comprobar en la Tabla 2.3.

Sin embargo, son pocos los autores que han ensayado los tres tipos de filtros (Oron *et al.*, 1980; Ravina *et al.*, 1997; Schischa *et al.*, 1997; Dehghanisanij *et al.*, 2004; Puig-Bargués *et al.*, 2005c; Capra y Scicolone, 2007), si bien con distintos diámetros de paso del agua. En otros estudios, se utilizaron los filtros de arena y malla (Adin, 1987; Nakayama *et al.*, 1978; Tajrishy *et al.*, 1994; Hills y Brenes, 2001). El-Berry *et al.* (2003) probaron distintos diámetros de paso de agua en filtros de malla.

En algunos casos (Adin y Sacks, 1987; Taylor *et al.*, 1989, 1995; Granados *et al.*, 2001; Hills *et al.*, 2000; Chica *et al.*, 2001; Abedi-Koupai y Bakhtiarifar, 2003; Cararo *et al.*, 2006) la instalación de distintos tipos de filtros en los ensayos de riego con aguas regeneradas se efectuó como elemento necesario de la instalación, sin pretender estudiar su comportamiento.

En cuanto a los niveles de filtración los más utilizados fueron los de 100 a 130 μm para los filtros de anillas y los de 100 a 120 μm para los filtros de malla.

Sobre la recomendación del filtro más adecuado, mientras Oron *et al.* (1979) recomiendan los filtros de mallas, Capra y Scicolone (2004) proponen utilizar preferentemente los filtros de arena.

Los controles que habitualmente se efectúan durante el proceso de filtración son la presión en la entrada y en la salida del filtro, el volumen filtrado y el volumen utilizado para el lavado (Ravina *et al.*, 1997; Tajrishy *et al.*, 1994; Dehghanisanij *et al.*, 2004; Capra y Scicolone, 2007). En cuanto al agua de lavado de los filtros, en los ensayos de Ravina *et al.* (1997) resultó ser el 0.5 % del agua filtrada en los filtros de malla y entre un 0.5 % y un 1.5 % en los filtros de arena. Tajrishy *et al.* (1994) encontraron consumos del orden del 3 % para los filtros de arena.

El valor de la pérdida de carga en el filtro a partir del cual se activa la limpieza es otra de las variables de interés. Como puede observarse en la Tabla 2.2 es frecuente realizar la limpieza cuando se alcanzan 40 o 50 kPa, si bien algunos investigadores iniciaron la limpieza con valores muy inferiores (Dehghanisani *et al.*, 2004) o bastante superiores (Nakayama *et al.*, 1978).

La presión de trabajo en los ensayos de Nakayama *et al.* (1978) y Ravina *et al.* (1997) fue del orden de 250 kPa, aunque los últimos también ensayaron el comportamiento del sistema de riego a 400 kPa.

Para facilitar el funcionamiento y manejo de las instalaciones se recomienda que los filtros tengan sistemas automáticos de limpieza (Ribeiro *et al.*, 2005a).

Tabla 2.2. Condiciones de presión de trabajo y de pérdida de carga para efectuar el lavado de los filtros ensayados en la bibliografía consultada.

Trabajo	Presión de trabajo (kPa)	Pérdida de carga para activar el lavado (kPa)
Capra y Scicolone (2007)	-	20
Dehghanisani <i>et al.</i> (2004)	-	10
Nakayama <i>et al.</i> (1978)	276	69
Puig-Bargués <i>et al.</i> (2005b)	-	49
Ravina <i>et al.</i> (1997)	250 400	50
Ribeiro <i>et al.</i> (2005a)	-	40
Tajrishy <i>et al.</i> (1994)	-	42-69 (filtro de arena) 55 (filtro de mallas)

Tabla 2.3. Características de los filtros utilizados en distintos trabajos.

Trabajo	Filtro de arena*	Filtro de anillas (mesh/ μm)	Filtros de malla (mesh/ μm)	Prueba de filtración**
Abedi-Koupai y Bakhtiarifar (2003)	Sí	No	Sí	No
Adin y Sacks (1987)	Sí (0.69/-)	120/-	No	No
Adin (1987)	Sí (0.70/1.28) (0.84/1.23) (1.20/1.21)	No	-/80 -/130	Sí
Capra y Scicolone (2007)	Sí (1.50/-)	120/- 80/- 40/-	120/- distintos fabricantes	Sí
Cararo et al. (2006)	Sí (0.59/-)	-/100	-/80	No
Chica et al. (2001)	Sí (-/-)	120/-	No	No
Dehghanisani et al. (2004)	Sí	-/130	-/75	Sí
Dehghanisani et al. (2005)	No	No	175	No
El-Berry et al. (2003)	No	No	-/428.6 -/179.3 -/152.0 -/125.0 -/105.0	Sí
Granados et al. (2001)	Sí	Sí	No	No
Hills y Brenes (2001)	Sí (0.46/-)	No	-/105	No
Hills et al. (2000)	Sí (0.45/1.6) (2.00/-)	-/100	No	No
Nakayama et al. (1978)	Sí (0.45/-)	No	40/- 200/-	Sí
Oron et al. (1980)	Sí -	40/- 80/-	75/- 80/- 150/- 200/-	Sí

* Entre paréntesis se indica el diámetro efectivo en milímetros de la arena del filtro de arena y el coeficiente de uniformidad.

** Un "Sí" indica que en el estudio se ensayaban los filtros, un "No" indica que los filtros eran de la instalación y por tanto, no era una variable a estudiar.

Tabla 2.3. Características de los filtros utilizados en distintos trabajos. (Continuación).

Trabajo	Filtro de arena*	Filtro de anillas (mesh/ μ m)	Filtros de malla (mesh/ μ m)	Prueba de filtración**
Puig-Bargués <i>et al.</i> (2005c)	Sí (0.65/1.32)	-/115 -/130 -/200	-/98 -/115 -/178	Sí
Ravina <i>et al.</i> (1997)	Sí (1.00/-)	40/420 80/180 120/120	40/420 80/180 120/120	Sí
Ribeiro <i>et al.</i> (2005a)	No	-/130	-/-	Sí
Rowan (2004)	No	-/100	No	No
Schischa <i>et al.</i> (1997)	Sí	140/-	50/- -/150	No
Tajrishy <i>et al.</i> (1994)	Sí (0.45/1.6) (2.00/-)	No	150/100	Sí
Taylor <i>et al.</i> (1989, 1995)	No	No	120/80	No
Trooien <i>et al.</i> (2000)	No	(200/50)	No	No

* Entre paréntesis se indica el diámetro efectivo en milímetros de la arena del filtro de arena y el coeficiente de uniformidad.

** Un “Sí” indica que en el estudio se ensayaban los filtros, un “No” indica que los filtros eran de la instalación y por tanto, no era una variable a estudiar.

2.3. Emisores

Como se ha indicado en el apartado anterior, si bien algunos investigadores han planteado estudios conjuntos de filtros y goteros utilizando agua residual, otros investigadores han estudiado únicamente el comportamiento de los goteros (Oron *et al.*, 1979, Adin y Sacks 1987, 1991; Taylor *et al.*, 1989, 1995; Schischa *et al.*, 1997; Hills *et al.*, 2000; Resende *et al.*, 2000; Trooien *et al.*, 2000; Hills y Brenes, 2001; Chica *et al.*, 2001; Granados *et al.*, 2001; Abedi-Koupai y Bakhtiarifar, 2003; El-Berry *et al.*, 2003; Rowan, 2004; Dehghanisanij *et al.*, 2005; Cararo *et al.*, 2006).

En la Tabla 2.4 se presenta la tipología de los goteros ensayados en los distintos trabajos publicados y se detallan algunas de sus características. Se han utilizado goteros insertados e integrados, en algunos casos autocompensantes y en otros no. En relación con los caudales de emisión de los goteros, destaca que éstos son menores en las investigaciones realizadas a partir de 1990 que en las primeras experiencias de Nakayama *et al.* (1978) o de Oron *et al.* (1979, 1980). Las presiones de funcionamiento están alrededor de los 100 kPa, aunque en ensayos como el de Dehghanisanij *et al.* (2004) se probaron además valores superiores (150 kPa). La longitud de los laterales de riego es variable, oscilando entre un mínimo de 3.7 m Rowan (2004) y un máximo de 400 m (Schischa *et al.*, 1997). También es muy variable la separación entre goteros. Se han utilizado separaciones que van desde 0.15 m a 1.92 m, aunque las más usuales fueron de 0.5 m a 1 m.

Tabla 2.4. Características de funcionamiento de los goteros utilizados en distintos trabajos.

Trabajo	Tipo gotero	q_n (l/h)	p_e (kPa)	Longitud lateral (m)/Nº goteros	Coef. descarga (x)	Compensación de presión
Abedi- Koupai y Bakhtiarifar (2003)	-	4.0	-	10/10	0.66	No
	Insertado	4.0	-	10/10	0.01	Sí
	Insertado orificio	4.0	-	10/10	0.10	No
	-	4.0	-	10/10	0.64	No
Adin y Sacks (1987)	En línea laberíntico	3.2	-	60/60	-	Sí
	En línea laberíntico	1.8	-	60/60	-	Sí
	En línea laberíntico	2.5	-	60/60	-	No
Capra y Scicolone (2007)	Insertado laberíntico	4.1	101	50/100	0.60	No
	Insertado orificio	4.0	101	50/100	0.50	No
	Integrado laberíntico	3.8	101	50/100	0.50	No
	Integrado laberíntico	3.8	101	50/100	0.50	No
	Insertado	4.5	101	50/100	0.66	No
Cararo et al. (2006)	Integrado laberíntico	2.29	110	18.75/25	0.00	Sí
	Integrado laberíntico	1.60	109	16.25//25	0.00	Sí
	Integrado laberíntico	2.00	108	20.00/25	0.00	Sí
	Integrado laberíntico	2.20	107	10.00/25	0.65	No
	Integrado laberíntico	-	106	12.50/25	0.55	No
	Integrado laberíntico	2.30	105	15.00/25	0.72	No
	Integrado laberíntico	2.20	104	12.50/25	0.50	No
	Insertado laberíntico	2.30	102	7.50/25	0.61	No
	Integrado laberíntico	1.70	101	18.75/25	0.53	No
	Integrado laberíntico	1.70	99	15.00/25	0.54	No
	Integrado laberíntico	1.40	97	15.00/25	0.57	No
	Integrado laberíntico	1.70	95	7.50/25	0.60	No
	Integrado laberíntico	-	93	5.00/25	0.57	No
	Integrado laberíntico	-	93	7.50/25	0.53	No
Integrado laberíntico	1.05	91	5.00/25	0.48	No	
Chica et al. (2001)	Insertado	4.0	100	-/6	0.08	Sí
	Integrado laberíntico	4.0	100	-/6	0.49	No
	Insertado laberíntico	3.8	100	-/6	0.48	No
	Insertado	4	100	-/6	-0.02	Sí
	Interlínea laberíntico	4	100	-/6	0.48	No
	Interlínea laberíntico	4	100	-/6	0.44	No
Dehghanisanij et al. (2004)	Insertado	2.0	150	50/100	0.02	Sí
	Insertado	4.0	150	50/100	0.03	Sí
	Insertado	2.1	150	50/100	0.07	Sí
	Integrado	1.6	150	50/250	0.10	Sí
	Insertado	4.2	100	50/100	0.44	No
	Integrado	1.1	100	50/250	0.45	No
	Integrado	1.7	100	50/250	0.40	No
	Integrado	2.3	100	50/250	0.06	Sí

Tabla 2.4. Características de funcionamiento de los goteros utilizados en distintos trabajos. (Continuación)

Trabajo	Tipo gotero	q_n (l/h)	p_e (kPa)	Longitud lateral (m)/Nº goteros	Coef. descarga (x)	Compensación de presión
Dehghanisanij et al. (2005)	Integrado laberíntico	1.6	100	50/250	0.03	Sí
	Integrado laberíntico	2.4	100	50/250	0.03	Sí
	Integrado laberíntico	1.1	100	50/250	0.45	No
	Insertado laberíntico	2.0	100	50/100	0.02	Sí
	Integrado laberíntico	1.6	100	50/250	0.10	Sí
	Integrado	1.7	100	50/250	0.44	No
El-Berry et al. (2003)	Insertado laberíntico	-	100	50/-	-	No
	Insertado laberíntico	-	100	50/-	-	No
	Insertado orificio	-	100	50/-	-	No
	Insertado orificio	-	100	50/-	-	No
	Integrado laberíntico	-	100	50/-	-	No
	Integrado	-	100	50/-	-	Sí
Granados et al. (2001)	Integrado	4.0	-	50/100	-	No
	Insertado	4.0	-	50/100	-	Sí
	-	4.0	-	50/100	-	Sí
	-	4.0	-	50/100	-	No
Hills y Brenes (2001)	Integrado	1.0	60	12/60	-	No
	Integrado	1.0	60	12/60	-	No
	Integrado	1.0	60	12/60	-	No
	Integrado	1.0	60	12/60	-	No
Hills et al. (2000)	-	4.0	112	7/42	-	Sí
	Laberíntico	4.0	112	7/42	-	No
	-	4.0	112	7/42	-	No
Nakayama et al. (1978)	-	6.5	104	-	-	-
	-	7.6	104	-	-	-
	-	3.8	104	-	-	-
	-	3.4	104	-	-	-
	-	5.7	104	-	-	-
	-	3.8	104	-	-	-
	-	4.6	104	-	-	-
	-	4.2	104	-	-	-
Oron et al. (1979)	Insertado Laberíntico	8.0	-	25/25	-	-
Oron et al. (1980)	-	4.0	-	125/96	-	Sí
	-	8.0	-	125/96	-	Sí
	Integrado laberíntico	4.0	-	125/65	-	-
	Insertado laberíntico	4.0	-	65/65	-	-
Puig-Bargués et al. (2005b)	Integrado laberíntico	1.9	101.2	40/133	0.48	No

Tabla 2.4. Características de funcionamiento de los goteros utilizados en distintos trabajos. (Continuación).

Trabajo	Tipo gotero	q_n (l/h)	p_e (kPa)	Longitud lateral (m)/Nº goteros	Coef. descarga (x)	Compensación de presión
Ravina et al. (1992)	Insertado orificio	3.8	176	100/100	-	Sí
	Insertado orificio	2.3	176	100/100	-	Sí
	Integrado laberíntico	3.8	176	100/100	-	Sí
	Integrado laberíntico	2.2	176	100/100	-	Sí
	Integrado laberíntico	3.5	176	100/100	-	No
	Integrado laberíntico	2.4	176	100/100	-	No
	En línea laberíntico	2.7	176	100/100	-	No
	Integrado laberíntico	2.3	176	100/100	-	Sí
	Integrado laberíntico	3.4	176	100/100	-	No
	Integrado laberíntico	2.2	176	100/100	-	No
	En línea orificio	2.1	176	100/100	-	Sí
En línea laberíntico	2.9	176	100/100	-	No	
Resende et al. (2000)	Integrado laberíntico	1.60	100	6/50	-	No
	Integrado laberíntico	2.30	100	6/50	-	Sí
	Laberíntico	2.00	100	6/50	-	-
	Integrado laberíntico	2.00	100	6/50	-	No
	Integrado laberíntico	1.75	100	6/50	-	No
Rowan (2004)	-	-	90	3.7/22	-	No
	-	4.92	90	3.7/12	-	No
	-	2.01	90	3.7/12	-	-
	Integrado laberíntico	2.31	90	3.7/12	-	Sí
Schischa et al. (1997)	-	2.2	137	100/	-	Sí
	-	2.2	186	200/	-	Sí
	-	2.2	235	400/	-	Sí
	-	2.1	137	100/	-	Sí
	-	2.1	186	200/	-	Sí
	-	2.2	137	100/	-	Sí
	-	2.2	186	200/	-	Sí
	-	1.7	177	150/	-	No
	-	2.0	177	150/	-	No
	-	2.3	177	150/	-	Sí
	-	2.3	177	150/	-	Sí
	-	1.7	177	150/	-	No
	-	2.3	177	150/	-	Sí
	-	2.0	235	150/	-	No
	-	2.0	235	150/	-	No
-	2.0	235	150/	-	No	
Tajrishy et al. (1994)	Orificio insertado	4.0	70-100	7/42	-	Sí
	Laberíntico	4.0	70-100	7/42	-	Sí
Taylor et al. (1989)	Laberíntico insertado	2.0	150	10/20	-	-
	Integrado	2.0	150	10/20	-	-
Taylor et al. (1995)	Laberíntico insertado	2.0	150	10/20	-	-
Trooien et al. (2000)	-	0.57	55	137/-	0.57	No
	-	0.91	55	137/-	0.52	No
	Laberíntico integrado	1.5	69	137/-	0.45	No
	Laberíntico integrado	2.3	69	137/-	0.45	No
	Laberíntico integrado	3.5	200	137/-	-	Sí

Hay coincidencia en afirmar que el diseño de los emisores es un factor decisivo para evitar obturaciones. Granados *et al.* (2001), El-Berry *et al.* (2003) y Dehghanisani *et al.* (2004) determinaron que los goteros compensantes de presiones eran más resistentes a las obturaciones. Capra y Scicolone (2007) señalaron que los laberínticos eran los más resistentes a las obturaciones. Ravina *et al.* (1992) observaron una tendencia de los goteros de mayor caudal a obturarse menos. El Berry *et al.* (2003) también encontraron que los goteros integrados eran más resistentes a la obturación que los insertados y Cararo *et al.* (2006), que tener los pasos cortos y membranas para la auto limpieza eran características interesantes para evitar obturaciones. Por otra parte, también se señala que la obturación parcial de los goteros es un hecho progresivo (Ravina *et al.*, 1995; Rowan, 2004) y más frecuente que la obturación total (Ravina *et al.*, 1995; Resende *et al.*, 2000).

Finalmente, la necesidad del lavado de los laterales se ha considerado como una operación indispensable para el buen funcionamiento del sistema de riego (Nakayama *et al.*, 1978; Taylor *et al.*, 1995). Ravina *et al.* (1995) y Oron *et al.* (1979), aconsejaron la adición de algún producto químico acidificante para evitar la obturación en el sistema de riego.

2.4. Duración de los ensayos

La duración de los ensayos de riego y el régimen de funcionamiento diario de los ensayos llevados a término en la bibliografía consultada se han resumido en la Tabla 2.5. Como puede observarse ambas variables tienen una gran dispersión. En relación con las horas de riego totales la mayoría de ensayos han tenido una duración entre 100 y 400 horas y aproximadamente el 70% de las pruebas se han realizado por debajo de las 1000 h de riego. Destacan como casos extremos las 30 h (Oron *et al.*, 1979) y las 6200 h (Ravina *et al.*, 1992). Las horas diarias de riego oscilaron entre 40 minutos y 24 horas.

Tabla 2.5. Duración de los ensayos de la bibliografía estudiada.

Trabajo	Régimen de funcionamiento	Días de ensayo	Horas de riego totales
Abedi-Koupai y Bakhtiarifar (2003)	6 h/día	65	390
Adin y Sacks (1987)	24 h/día	120	2880
Capra y Scicolone (2007)	4-6 h/día	-	60
Cararo <i>et al.</i> (2006)	12 h/día	-	373
Chica <i>et al.</i> (2001)	4 h/día	-	100-620
Dehghanisani <i>et al.</i> (2004)	6 h/día	24	144
Dehghanisani <i>et al.</i> (2005)	9 h/día	28	252
Granados <i>et al.</i> (2001)	4 h/día	240	960
Hills y Brenes (2001)	-	56	1320
Hills <i>et al.</i> (2000)	-	275	-
Nakayama <i>et al.</i> (1978)	-	720	-
Oron <i>et al.</i> (1979)	-	-	30-65
Puig-Bargués <i>et al.</i> (2005b)	10 h/día	75	750
Ravina <i>et al.</i> (1997)	20 h/día	-	1440-6200
Resende <i>et al.</i> (2000)	16 h/día	-	2160
Ribeiro <i>et al.</i> (2005a)	2 h/día	-	150
Rowan (2004)	0.66 h/día	365	243
Tajrishy <i>et al.</i> (1994)	22 h/día	120	2640
Taylor <i>et al.</i> , (1989)	1 h/día	70	-
Taylor <i>et al.</i> , (1995)	1 h/día	50-90	50-90
Trooien <i>et al.</i> , (2000)	-	650	-

2.5. Método de evaluación de la uniformidad de riego

La metodología utilizada para determinar la uniformidad de riego difiere en cada estudio realizado, lo que algunas veces resulta problemático cuando se pretende comparar resultados entre distintos ensayos.

La frecuencia temporal en la evaluación de la uniformidad de distribución es variable. En algunos casos (Abedi-Koupai y Bakhtiarifar, 2003) no se especificó el intervalo de tiempo entre medidas. Nakayama *et al.* (1978) efectuaron mediciones quincenales en un ensayo que funcionó 24 meses, mientras que Adin y Sacks (1987) tomaron los caudales emitidos por los goteros semanalmente, lo que representaba una vez cada 120 h en verano y cada 72 h en invierno. Capra y Scicolone (2007), hicieron las determinaciones diariamente, lo que representó una frecuencia de 4-6 h durante las 60 h del ensayo.

También varía el procedimiento seguido para la determinación de la uniformidad. Así, mientras Puig-Bargués *et al.*, (2005b) determinaron la uniformidad de riego cada 50 h, eligiendo los emisores según la metodología de Merriam y Keller (1978), adaptada por Vermeiren y Jobling (1986) otros investigadores midieron el caudal de 2 o 3 goteros adyacentes en 3, 4 o 5 posiciones en el lateral. Oron *et al.* (1979) midieron el caudal de 9 de los goteros al final de la temporada de riego repartidos entre el inicio, mitad y final del lateral. Más tarde, en 1980, los mismos autores midieron en continuo el caudal que emitían 3 goteros adyacentes en 5 puntos repartidos en el lateral. Granados *et al.* (2001) evaluaron la uniformidad tomando los caudales de 8 goteros cada 100 h de funcionamiento repartidos en 4 puntos del lateral. El-Berry *et al.* (2003) tomaban los caudales de 3 goteros del inicio, 3 del medio y 3 del final de lateral cada 5 h en su ensayo de 20 h.

Ravina *et al.* (1997) medían el caudal de 5 goteros del inicio y 5 del final del lateral como mínimo una vez cada 500 h además del registro en continuo del caudal y la presión de los laterales de riego. Dehghanisanij *et al.* (2004, 2005) efectuaron, en el ensayo de 2004 y 2005 respectivamente, 25 y 20 medidas del caudal emitido de los 100 o 250 goteros cada dos semanas de funcionamiento. Taylor *et al.* (1995) midieron el caudal de todos los goteros que ensayaron durante 10 minutos en tres momentos (50, 70 y 90 h). Resende *et al.* (2000) también hallaron el caudal emitido por los 50 emisores de cada lateral durante 5 minutos y en 9 ocasiones a lo largo del ensayo.

Chica *et al.* (2001) medían, cada 4 horas de riego y hasta las 100 horas, el caudal emitido por cada gotero a distintas presiones. En otro ensayo, que duró 620 h, los mismos autores determinaron cada 4 horas de riego, el caudal emitido a 100 kPa y, cada 100 h, el caudal emitido a distintas presiones.

En la Tabla 2.6 se presentan distintos coeficientes utilizados para la evaluación de la uniformidad de riego. Mientras que algunos autores utilizan la uniformidad de emisión de Karmeli y Keller (1975) otros presentan el porcentaje de emisores totalmente embozados.

Tabla 2.6. Coeficientes utilizados para evaluar la obturación de los goteros ensayados.

Trabajo	Coeficiente utilizado
Abedi-Koupai y Bakhtiarifar (2003)	Uniformidad de emisión de Karmeli y Keller (1975)
	Uniformidad de emisión de Christiansen
	Uniformidad de distribución
	Uniformidad de distribución absoluta
Adin y Sacks (1987)	Caudal emitido
Capra y Scicolone (2007)	Ratio entre el caudal emitido y el inicial
	Porcentaje de goteros completamente obturados
	Uniformidad de emisión de Karmeli y Keller (1975)
Cararo <i>et al.</i> (2006)	Grado de obturación
Chica <i>et al.</i> (2001)	Disminución de caudal
	Grado de obturación
Dehghanisanij <i>et al.</i> (2004)	Coefficiente de variación del comportamiento de Bralts <i>et al.</i> (1986)
	Coefficiente de uniformidad de Bralts <i>et al.</i> (1981)
Dehghanisanij <i>et al.</i> (2005)	Caudal emitido medio, desviación estándar, mediana, percentil 20
	Media del porcentaje del caudal inicial
	Coefficiente de variación del comportamiento de Bralts <i>et al.</i> (1986)
El-Berry <i>et al.</i> (2003)	Coefficiente de uniformidad de Bralts <i>et al.</i> (1981)
	Ratio entre el caudal emitido y el nominal
Granados <i>et al.</i> (2001)	Obturación de los goteros
	Grado de obturación
	Variación del caudal
Hills y Brenes (2001)	Coefficiente de Uniformidad
	Porcentaje de completamente obturados
	Caudal emitido
Hills <i>et al.</i> (2000)	Ratio entre el caudal emitido y el nominal
	Uniformidad de emisión de caudales
Nakayama <i>et al.</i> (1978)	Ratio entre el caudal emitido y el nominal
Nakayama <i>et al.</i> (1978)	Caudal emitido
Oron <i>et al.</i> (1979)	Porcentaje de reducción del caudal emitido
Oron <i>et al.</i> (1980)	Ratio entre el caudal emitido y el nominal

Tabla 2.6. Coeficientes utilizados para evaluar la obturación de los goteros ensayados. (Continuación)

Trabajo	Coeficiente utilizado
Puig-Bargués et al. (2005b)	Uniformidad de emisión
	Uniformidad de emisión absoluta (Keller y Karmeli, 1974)
	Uniformidad de presiones
	Coeficiente de variación del caudal emitido
	Coeficiente de variación de presión
Ravina et al. (1992)	Coeficiente de variación debido al gotero
	Caudal del lateral (% del inicial), mínimo, máximo y CV
	Tiempo emitiendo por debajo del 50/90/110 % del caudal inicial
	Desviación respecto el caudal de diseño
	Goteros totalmente obturados
Resende et al. (2000)	Caudal medio mínimo emitido por un gotero (% del inicial)
	Coeficiente de variación del caudal emitido por un emisor
	Caudal emitido (l/h)
	Ratio entre el caudal emitido y el nominal
Rowan (2004)	Reducción del caudal
	Coeficiente de variación del caudal emitido
Schischa et al. (1997)	Caudal emitido (l/h)
Tajrishy et al. (1994)	Caudal del lateral (% del inicial)
Taylor et al. (1989)	Uniformidad de Bralts et al. (1986)
Taylor et al. (1995)	Caudal emitido
Trooien et al. (2000)	% de goteros que emiten menos del 50 % del caudal nominal
	Caudal del lateral (% del de diseño)

2.6. Monitorización y control de los sistemas de riego.

Las condiciones de funcionamiento de una instalación de riego por goteo pueden variar debido a problemas en el sistema de impulsión, pérdida de carga en los filtros y tuberías, y obturación de los goteros. Cuando se utilizan aguas regeneradas, y sobretodo cuando éstas son de baja calidad, la probabilidad de que se presenten problemas de operación se incrementa debido principalmente a la aparición de obturaciones. En la mayoría de instalaciones de riego localizado, el control que se efectúa es manual y discontinuo en el tiempo, de forma que cualquier incidencia tarda en ser detectada y solucionada. Además, dada la variabilidad de los efluentes, el control en continuo es imprescindible para la investigación de los procesos de filtración y embozamiento. Por este motivo, la implantación de sistemas de monitorización y control del funcionamiento de la instalación es especialmente útil para poder detectar la obturación en las primeras fases de desarrollo (Ravina et al., 2002). La monitorización es la automatización de los procesos de vigilancia dotando al operario de los mecanismos necesarios para su alerta, así como la interacción con el proceso y el registro de su evolución, con el propósito de facilitar la detección de situaciones anómalas y su diagnóstico a través del seguimiento continuo de las variables de comportamiento (Colomer et al., 2000).

En un sistema de riego se pueden utilizar sensores para obtener valores en tiempo real de variables importantes como son los caudales, volúmenes, presiones y calidades del agua, y de condicionantes del contorno como son el viento, la temperatura ambiente, el contenido de agua en el suelo y radiación solar, entre otros (Ayars y Phene, 2007). La monitorización y control del funcionamiento de un sistema de riego permite la operación del sistema con una máxima eficiencia (Clark y Phene, 1992).

Comercialmente hay una gran variabilidad de instrumentación con distintas características de funcionamiento para realizar la automatización una instalación de riego. Esta instrumentación se divide en seis categorías (Ayars y Phene, 2007):

- Controladores: son instrumentos que comparan los valores de referencia programados con los valores medidos al instante y actúan según lo programado
- Válvulas, que activadas remotamente abren, cierran o regulan el paso del agua
- Medidores de caudal: son instrumentos de medida de caudal para conocer el volumen de agua aplicado o utilizado por unidad de tiempo. Pueden tener funciones para totalizar volúmenes.
- Filtros o sistemas para variar la calidad física del agua: para prevenir la obturación de la instalación y requieren un mantenimiento.
- Inyectores químicos: para inyectar en la instalación productos químicos para la fertilización del cultivo o para el mantenimiento de la instalación.
- Otros medidores: para medir variables de interés ya sean ambientales (temperatura, viento, etc.), de características del suelo (humedad del suelo) o de planta (estrés hídrico de la hoja, temperatura, etc.).

Un sistema utilizado para la monitorización es el SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*). SCADA es un conjunto de aplicaciones de software con acceso a campo mediante comunicación digital con los instrumentos y dispositivos que accionan, e interfaz gráfica de alto nivel con el usuario (Domingo *et al.*, 2003).

Los requisitos que debe cumplir un sistema SCADA para un máximo rendimiento son: (a) tener una arquitectura abierta para poder crecer y adaptarse a las necesidades cambiantes; (b) permitir una comunicación transparente y eficaz entre el usuario y los controladores y reguladores de la planta; (c) tener una instalación simple, sin excesivas exigencias de hardware; y (d) ser sencillo de utilizar y con interfaces sencillos de interpretar (Domingo *et al.*, 2003).

Las funciones que realiza un SCADA son: (a) la adquisición de datos para recoger, procesar y almacenar la información recibida; (b) la supervisión, para observar desde un monitor o panel de control la evolución de las variables del proceso; y (d) el control, para modificar la evolución del proceso, actuando sobre los reguladores autónomos (Balcells y Romeral, 2003).

Para ello un sistema SCADA está formado por un ordenador principal con una gran capacidad de procesamiento de información y de interfaz con el operador y una unidad de control o autómatas programables con un sistema operativo en tiempo real, robusto y orientado al proceso. Estas dos estaciones deben estar comunicadas entre sí y a los medidores y automatismos (Domingo *et al.*, 2003).

Los sistemas SCADA se han utilizado en la automatización de canales de riego (Rijo, 2008) pero no aún en la programación y evaluación del funcionamiento de instalaciones de riego por goteo, si bien diversos métodos de control automático se utilizan para programación del riego (Ayars y Phene, 2007).

3. Objetivos

Puesto que el uso de las aguas regeneradas en los sistemas de riego localizado es una alternativa viable pero que requiere un manejo específico dirigido a evitar obturaciones, en esta tesis doctoral se pretende ampliar el conocimiento existente para facilitar el diseño y la gestión de estas instalaciones.

Para conseguir este objetivo general, se deben alcanzar los siguientes objetivos específicos:

1. Analizar el comportamiento hidráulico de un sistema de riego localizado con aguas regeneradas a lo largo de 1000 h de funcionamiento en relación a:
 - 1.1. Definir el potencial embozante del agua regenerada utilizada a partir de la caracterización física, química y biológica de los efluentes y contrastarlo con los resultados obtenidos.
 - 1.2. Conocer la variación de las características físicas, químicas, biológicas y de las partículas de los efluentes causada por distintos sistemas de filtración.
 - 1.3. Determinar los volúmenes de efluente filtrados en cada ciclo de filtración, los tiempos y las características del embozamiento en los distintos sistemas de filtración, analizando los lavados en cuanto a frecuencia, volumen de efluente utilizado y eficiencia.
 - 1.4. Encontrar ecuaciones explicativas de los procesos de filtración a partir de relacionar la evolución de la pérdida de presión en los filtros con el volumen de efluente filtrado y desarrollar fórmulas mediante análisis dimensional que relacionen estas dos variables con las características del efluente y de los filtros.
 - 1.5. Conocer la adecuación de los distintos emisores y filtros a partir de los tiempos y características del embozamiento en los goteros, la uniformidad de riego conseguida y la evolución del caudal de los goteros a lo largo del tiempo, el efecto de la compensación de presiones y la localización de los atascamientos en los laterales.
2. Caracterizar las deposiciones de material en los filtros, laterales y goteros.
3. Evaluar la utilidad de un sistema SCADA para manejar y controlar un sistema de riego por goteo utilizando aguas regeneradas.

4. Material y métodos

4.1. Planteamiento

Para la consecución de los objetivos planteados se diseñó un banco de ensayos de filtración y una instalación experimental de riego por goteo con distintos emisores, los cuales operaron con los efluentes secundario y terciario generados en una estación depuradora de aguas residuales.

4.2. Localización

Los ensayos se realizaron en unos terrenos adyacentes a la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) del municipio de Celrà (provincia de Girona) (Figura 4.1) que tenía censados 3783 habitantes a 1 de enero de 2006 (Idescat, 2007). Esta EDAR trataba tanto las aguas residuales urbanas como las procedentes del polígono industrial del municipio.



Figura 4.1. Imagen por satélite de la situación de la parcela de goteros (recuadro blanco) y del banco de ensayo de filtración (circunferencia blanca) Fuente: Google Earth 4.0.2737 (Google Earth, 2007).

4.3. Características meteorológicas durante los ensayos

Los datos de temperatura y pluviometría existentes durante los ensayos se registraron en continuo con una estación meteorológica Davis (Davis Instruments, Hayward, CA, EE.UU.) situada a unos 2300 m de la parcela experimental. En la Figura 4.2 y en la Figura 4.3 se presentan la evolución de la temperatura máxima, mínima y media diaria y, la media mensual de medias diarias durante los periodos en los que se realizaron los ensayos con efluente secundario (año 2005) y terciario (año 2006), respectivamente.

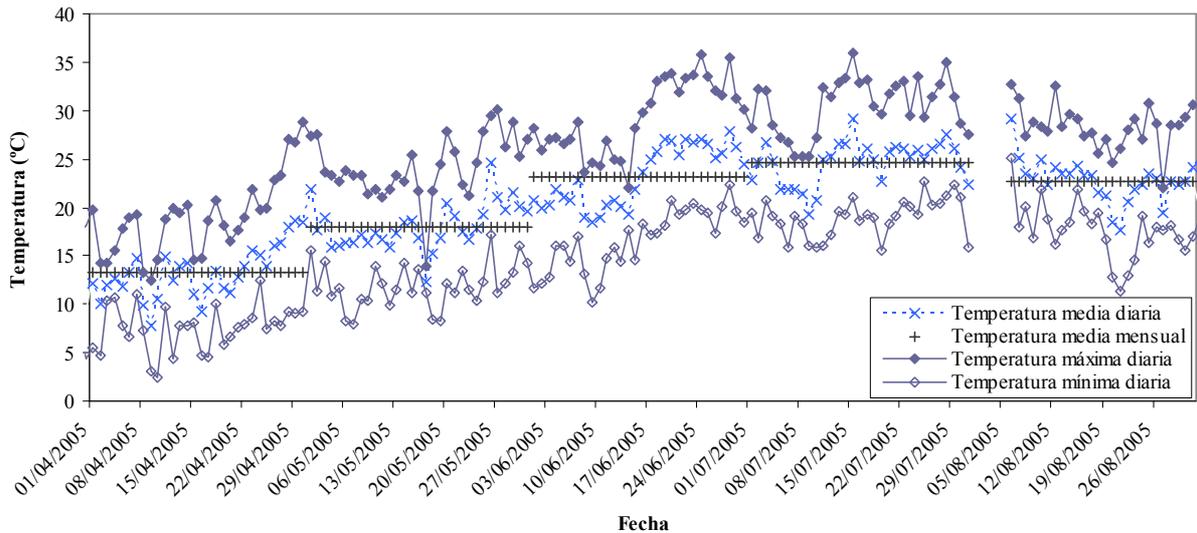


Figura 4.2. Evolución de la temperatura durante la realización del ensayo con efluente secundario (2005).

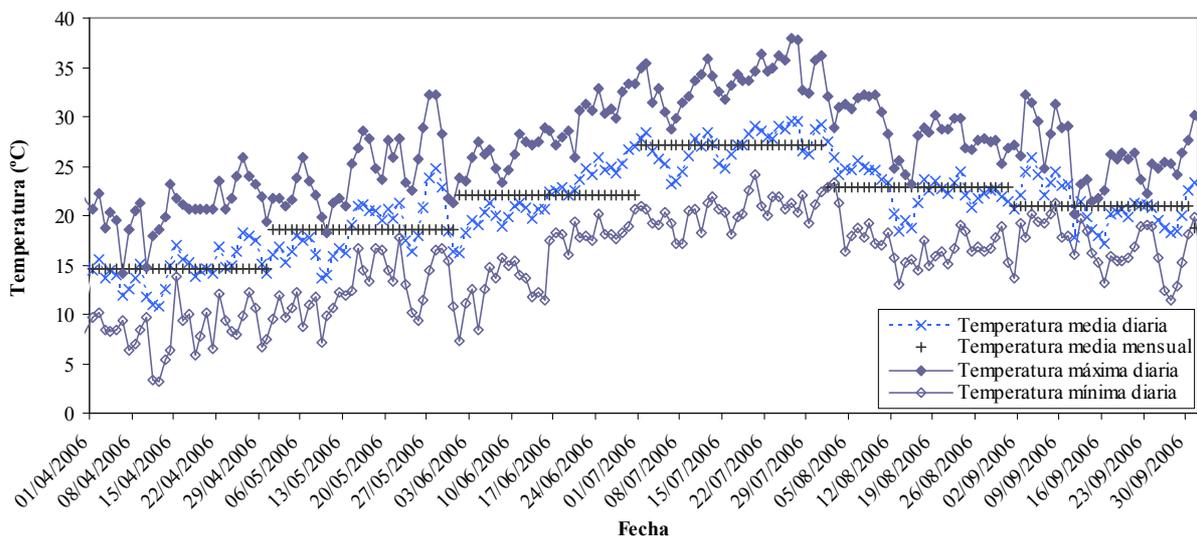


Figura 4.3. Evolución de la temperatura durante la realización del ensayo con efluente terciario (2006).

En la Tabla 4.1 se presentan los valores medios mensuales y del periodo de ensayo de las temperaturas diarias medias, máximas y mínimas. Se observa que las temperaturas media y mínima diaria del ensayo fueron, respectivamente, 1.1 y 0.4 °C significativamente ($P < 0.05$) superiores en el año 2006 (ensayo con efluente terciario) que en el año 2005 (ensayo con efluente secundario). La media de la temperatura máxima diaria también fue 1 °C superior el año 2006, aunque no se diferenció estadísticamente de la del año 2005. Estas diferencias fueron debidas a que el ensayo con efluente terciario transcurrió durante casi dos meses más que el ensayo con efluente secundario. En estos dos meses, agosto y septiembre, las temperaturas fueron elevadas e hicieron aumentar la media del ensayo. El único mes de ensayo en el que las temperaturas fueron significativamente diferentes fue el mes de julio, tradicionalmente el más caluroso. En el año 2005, las temperaturas de julio fueron inferiores a las del año 2006 debido a la mayor cantidad de días con precipitaciones registradas.

En general, los descensos puntuales de las temperaturas coincidieron con los episodios de lluvias registrados (Figura 4.4).

Tabla 4.1. Media de la temperatura media, máxima y mínima diaria por cada mes y año de ensayo. Por cada temperatura y mes, y por cada temperatura y media del ensayo, años con letra distinta indica que existen diferencias significativas ($P < 0.05$).

Media T ^a diaria (°C)	Año	Mes						Media del ensayo
		Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	
Media	2005	14.1	18.1	23.2	24.7 b	-	-	20.7 b
	2006	15.8	18.4	22.0	27.1 a	22.9	21.0	21.8 a
Máxima	2005	20.4	24.2	29.3	30.5 b	-	-	26.8
	2006	22.2	24.5	28.2	33.8 a	28.6	26.0	27.8
Mínima	2005	7.9	11.9	16.7	19.0 b	-	-	14.6 b
	2006	9.1	12.6	15.5	20.4 a	17.3	17.0	16.0 a

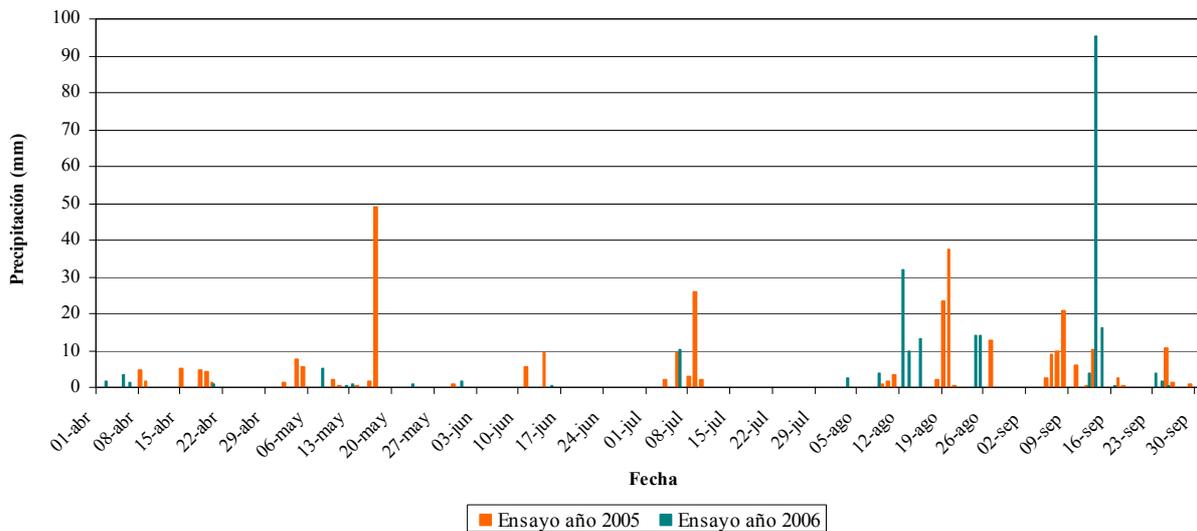


Figura 4.4. Precipitación diaria durante la realización de los ensayos con efluente secundario (2005) y terciario (2006).

4.4. Descripción de la estación depuradora

El agua procedente de las zonas urbana e industrial del municipio llegaba al colector de entrada de la estación depuradora, se hacía pasar por las rejillas de desbaste, se bombeaba hasta la planta y se hacía circular a través de otras rejillas de desbaste más fino. A partir de aquí el agua entraba al canal de desarenado y de desgrasado. En este canal, con la ayuda de una inyección de aire, se separaban por diferencia de densidad las arenas y las grasas.

Entre este pretratamiento inicial y el siguiente tratamiento, el agua se conducía a un pozo de regulación, lo que permitía homogenizar el caudal y estabilizar los procesos de depuración. La depuradora tenía una capacidad para tratar 250 m³/h.

En el tratamiento secundario se pretendía reducir la contaminación orgánica y los nutrientes, fundamentalmente fósforo y nitrógeno. El 30 % del fósforo era eliminado por acción de los microorganismos, pero para llegar a reducciones de entre el 85 % y el 90 % se adicionaba cloruro de hierro. El primer paso en el tratamiento secundario era la liberación, en los reactores anaeróbicos, del fósforo que estaba en forma de polifosfatos a fósforo soluble en el agua. El segundo paso consistía en la eliminación del nitrógeno mediante la combinación de los procesos de nitrificación, que debía desarrollarse en condiciones aeróbicas, y de

desnitrificación, que tenía lugar en condiciones anaeróbicas. Estos dos procesos se realizaban en un reactor biológico tipo canal de oxidación, donde se diferenciaban los dos ambientes. El agua entraba por la parte aeróbica del reactor donde se realizaba la nitrificación y la eliminación del fósforo que había quedado soluble en el agua después del reactor anaeróbico. Después pasaba por la parte anaeróbica donde se realizaba la desnitrificación y volvía a empezar otro ciclo para la eliminación del fósforo y del nitrógeno. En el proceso del tratamiento secundario, se reducía la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) en un 90 % lo que significaba la reducción de la materia orgánica biodegradable.

El agua de salida del reactor biológico se repartía hacia los dos decantadores donde permanecía unas 4 h antes de llegar a la arqueta de agua tratada. Desde esta arqueta, el agua o bien podía pasar a la línea de tratamiento terciario donde se filtraba en un filtro de anillas de 130 µm (Arkal Filtration Systems, Jordan Valley, Israel) y se sometía a radiación ultravioleta o bien podía ser vertida al río.

El equipo de tratamiento con rayos ultravioletas era un LBA 20 (Wedeco Rex, San Sebastián de los Reyes, España) con capacidad para tratar 29 m³/h a 300 J/m² y con 0.76 kW de potencia consumida.

Parte de los fangos recogidos en el decantador se recirculaban hacia el reactor biológico y el resto se eliminaba del sistema en la línea de fangos, donde eran deshidratados y compactados mediante la utilización de un filtro de bandas y una centrífuga.

4.5. Dispositivo experimental

4.5.1. Captación e impulsión del agua

La captación del agua regenerada para los ensayos con efluente secundario se producía desde la arqueta de aguas tratadas, situada aguas abajo del decantador del tratamiento secundario. La altura de aspiración fue de 1.3 m. El bombeo se realizó mediante una bomba centrífuga multicelular en línea modelo CR 15 (Grundfos, Bjerringbro, Dinamarca), trifásica y de 4 kW de potencia. La presión en la salida del grupo de bombeo era de 370 kPa.

Para los ensayos con efluente terciario se recogía éste desde el circuito de agua de servicio de la EDAR en un tanque Aquablock (Schütz, Selters, Alemania) de 3 m³. Desde este tanque se bombeó el agua mediante dos bombas centrífugas de iguales características a la utilizada en los ensayos con efluente secundario, si bien en este caso la presión a la salida de las bombas fue de 550 kPa. Ambos efluentes, una vez impulsados, se conducían al banco de filtración con tuberías de polietileno de 63 mm de diámetro exterior y 1013.25 kPa (PN 10) de presión nominal.

4.5.2. Filtración

Los filtros que se utilizaron en el banco de ensayos fueron tres:

- Filtro de arena de 50.8 cm (20 pulgadas) (Regaber, Parets del Vallès, España) con una superficie de filtración de 1963 cm², relleno con 175 kg de arena silíceo de diámetros entre 0.7 y 1.2 mm y un caudal máximo de filtración de 18 m³/h.
- Filtro de malla B2 de 5.08 cm (2 pulgadas) (Arkal Filtration Systems, Jordan Valley, Israel) y de luz de malla de 120 µm, con una superficie de filtración de 1100 cm² y caudal máximo de filtración de 25 m³/h.

- Filtro de anillas de 5.08 cm (2 pulgadas) (Arkal Filtration Systems, Jordan Valley, Israel) y de 130 μm de diámetro de paso, con una superficie de filtración de 940 cm² y caudal máximo de filtración de 20 m³/h.

Con estos filtros se estudió el comportamiento de 4 sistemas de filtración utilizados frecuentemente en instalaciones comerciales de riego localizado. Los 4 sistemas de filtración que constituyeron los cabezales de filtración fueron:

- Dos filtros de arena colocados en paralelo (Unidad 1).
- Combinación, en serie, de un filtro de malla, primero, y otro de anillas a continuación. El filtrado con filtro de anillas se realizó mediante un cabezal Spin Klin (Arkal Filtration Systems, Jordan Valley, Israel) formado por dos filtros de anillas en paralelo (Unidad 2).
- Un cabezal Spin Klin (Arkal Filtration Systems, Jordan Valley, Israel) con dos filtros de anillas colocados en paralelo (Unidad 3).
- Un filtro de malla (Unidad 4).

Los distintos sistemas de filtración o unidades se dispusieron e instalaron para un riego en continuo, sin paradas de riego mientras se realizaba el lavado de los filtros. Se instaló un regulador de presión después de los medidores de caudal para reducir e igualar las presiones de entrada a los laterales. La presión se limitó a 150 kPa durante el ensayo con efluente secundario y a 200 kPa durante el ensayo con efluente terciario. El esquema hidráulico del banco de filtración se presenta en la Figura 4.5.

Las velocidades medias de filtración superficial de cada filtro (Tabla 4.2) se calcularon con la siguiente expresión:

$$v_{media} = \frac{Q_{medio}}{S} \tag{4-1}$$

donde:

v_{media} : velocidad media de filtración superficial (l/m²·s)

Q_{medio} : caudal medio de filtración en un sistema de filtración y ensayo (l/s)

S : sección transversal de filtración del medio filtrante (m²)

El caudal medio de filtración se halló a partir de los caudales de filtración instantáneos medidos durante las 1000 h de duración de los ensayos. Para calcular este valor no se utilizaron los valores de los caudales cuando los filtros estaban en procesos de lavado ni los valores registrados durante la puesta de la instalación en régimen de funcionamiento.

Tabla 4.2. Velocidades medias de filtración superficial en los distintos filtros y efluentes utilizados. Para cada sistema de filtración, efluentes con letra distinta indica que existen diferencias significativas (P<0.05)

Efluente	Velocidad media de filtración superficial (l/m ² ·s)				
	Arena	Malla en combinado	Anillas en combinado	Anillas	Malla
Secundario	5.93 ± 0.11 b	20.68 ± 0.78 b	12.10 ± 0.46 b	12.47 ± 0.52 b	20.91 ± 0.91 b
Terciario	6.06 ± 0.08 a	21.89 ± 0.25 a	12.81 ± 0.15 a	13.14 ± 0.13 a	22.68 ± 0.18 a

El sistema de filtración de arena fue el que filtró los efluentes a una menor velocidad superficial ya que era el que tenía una mayor superficie de filtración y filtraba el mismo caudal que los otros filtros. Por lo contrario, los filtros de malla, con la menor superficie de filtración fueron los que filtraron a una velocidad superficial de filtración mayor. Se encontraron diferencias significativas ($P < 0.05$) en todos los sistemas de filtración entre la velocidad de filtración en el ensayo con efluente secundario y con efluente terciario.

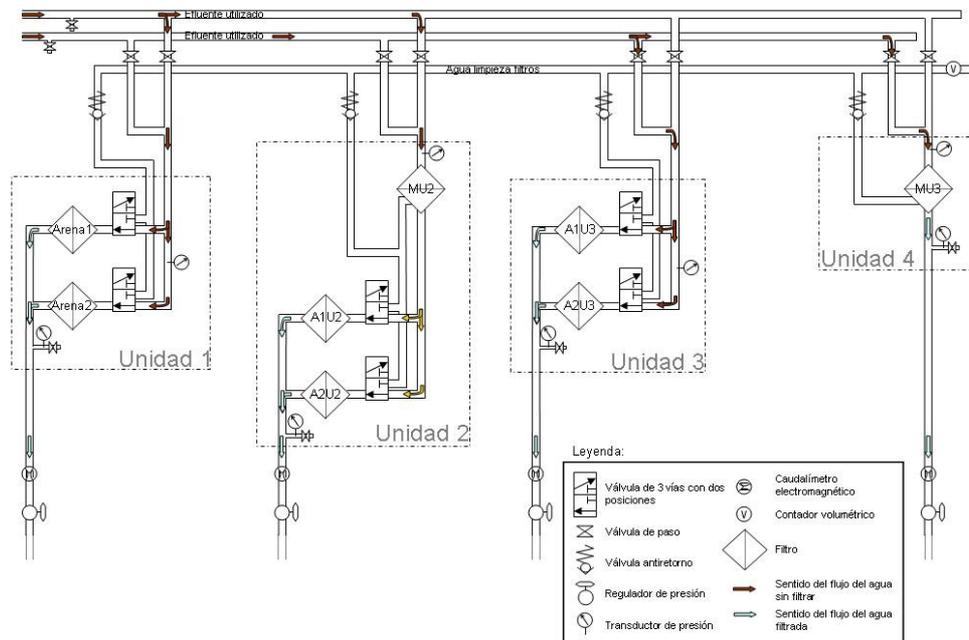


Figura 4.5. Esquema hidráulico del banco de filtración.

4.5.3. Emisores

Las características de funcionamiento y disposición en parcela de los emisores ensayados se presentan en la Tabla 4.3. Se utilizaron seis goteros comerciales distintos (Netafim, Tel Aviv, Israel) con un coeficiente de variación de fabricación inferior a 0.03 según comunicación del fabricante. El emisor P8 no se utilizó en los ensayos con efluente secundario. El número de emisores por lateral se determinó conjuntamente con la empresa suministradora del material atendiendo a criterios técnicos, comerciales y de disponibilidad.

Tabla 4.3. Características de funcionamiento y disposición en parcela de los emisores utilizados en los ensayos. Valores según información del fabricante.

	Emisor					
	UN	RM	P2	P8	TO	TI
Caudal nominal (l/h)	2.3	2.3	2.0	8.5	1.75	2.0
Presión nominal (kPa)	50-400	50-400	50-400	50-400	100	100
Diámetro exterior (mm)	17.0	17.0	16.0	16.0	16.6	16.1
Grosor de la tubería (mm)	1.2	1.2	1.2	1.2	0.5	1.0
Espaciamiento (m)	0.40	0.75	1.00	1.00	1.50	0.75
Longitud de lateral (m)	87	87	87	87	87	87
Caudal del lateral (l/h)	499	267	174	740	102	232
Número de goteros	217	116	87	87	58	116
Coefficiente descarga x	0	0	0	0	0.48	0.46
Constante K	2.3	2.3	2.0	8.5	0.579	0.693
Compensado de presiones	Sí	Sí	Sí	Sí	No	No

Leyenda: UN: Unibioline 17; RM: Ram 17/20; P2: PC 2.0; P8: PC 8.5; TO: Tody 17/50; TI: Tiran 16/100.

A partir de los valores de caudal nominal, espaciamento y longitud del lateral, se calculó el caudal de entrada a los laterales. Este valor osciló entre 102 l/h para los laterales con gotero TO y 740 l/h para los del gotero P8. Los laterales con el gotero UN presentaron mayor caudal (499 l/h) que los laterales con los goteros TI, P2 y RM (232, 174 y 267 l/h).

En la Tabla 4.4 se presentan las propiedades del diseño interno de los goteros ensayados. El gotero integrado UN está especialmente diseñado y recomendado para ser utilizado con aguas residuales tratadas, ya sea enterrado o en superficie. Es un gotero con un filtro interior más grande y con un paso de agua de mayor dimensión que mantiene el flujo turbulento. El gotero integrado RM permite utilizar aguas de baja calidad gracias al diseño del gotero autocompensante. Los goteros de botón insertados (P2 y P8) utilizados son de flujo turbulento generado en el laberinto con anchos pasos de agua y tienen un diseño que asegura altas uniformidades y dificulta las obturaciones. El gotero integrado modelo TO es resistente a la obturación gracias a que la entrada del agua en el gotero se hace desde el centro de la tubería. Las ranuras de entrada al gotero pueden actuar también como filtro y el laberinto interior mantiene el flujo turbulento. Por último, el gotero integrado TI en tubería de pared delgada es un gotero laberíntico con largos pasos de agua y con una área de filtrado elevada, lo que permite conseguir un buen comportamiento aunque se utilice agua regenerada (Netafim, 2004).

Tabla 4.4. Características de diseño interno de los emisores utilizados en el ensayo (Netafim, 2004).

Tipo de gotero	Características del paso de agua				
	Ancho (mm)	Profundidad (mm)	Sección (mm ²)	Longitud (mm)	Área de filtrado (mm ²)
UN	1.20	1.00	1.20	40.0	130.0
RM	1.15	0.95	1.09	22.0	8.0
P2	1.17	1.07	1.25	61.0	2.3
P8	1.60	1.60	2.56	17.0	2.3
TO	0.78	0.67	0.52	23.0	55.0
TI	0.76	1.08	0.82	75.0	70.0

El emisor TO fue el emisor que tenía una menor sección de paso del agua, con 0.52 mm². El emisor TI, el otro gotero no autocompensante de presiones utilizado, fue el siguiente con una menor sección de paso del agua. Los goteros insertados P2 y P8 fueron los que ofrecieron una mayor área de paso para el efluente.

En la Ilustración 4.1 y en la Ilustración 4.2 se presentan los despieces de los emisores utilizados en los ensayos.

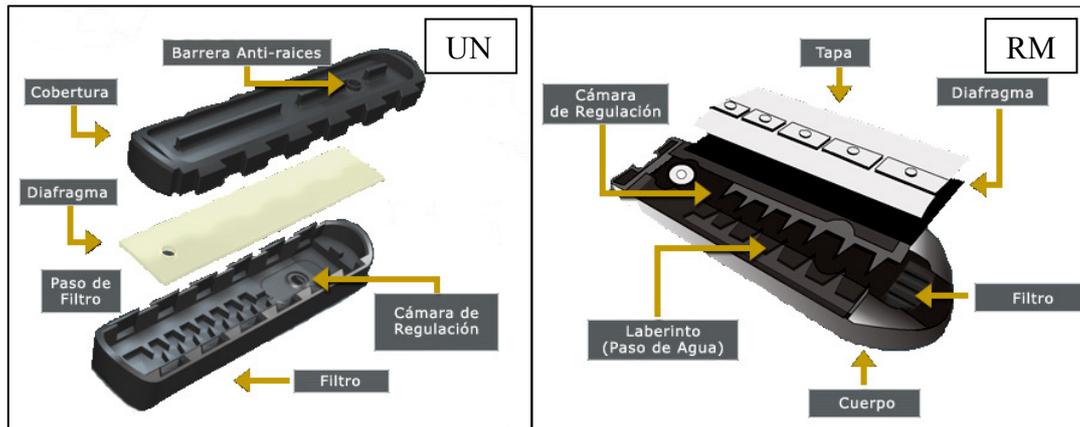


Ilustración 4.1. Elementos de los emisores UN y RM utilizados en los ensayos.

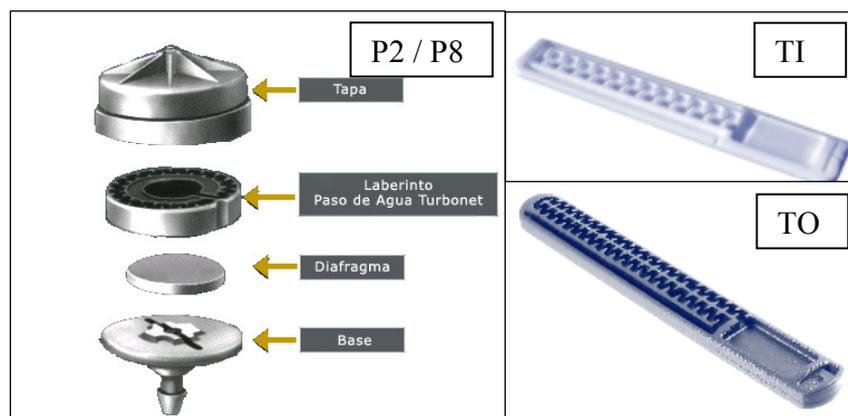


Ilustración 4.2. Elementos de los emisores P2 y P8, TI y TO utilizados en los ensayos.

En la Ilustración 4.3 se presentan las fotografías tomadas desde el interior del lateral de los emisores integrados (UN, RM, TI y TO) antes de ser utilizados, y los de la primera parte del laberinto de los emisores insertados (P2 y P8). Estas imágenes se tomaron cortando

longitudinalmente el lateral en los emisores integrados y realizando el despiece de los insertados. Todas las fotografías se realizaron con una cámara fotográfica Canon Ixus 40 (Nikon Corporation, Tokio, Japón) con una resolución de 4.00 megapixels.

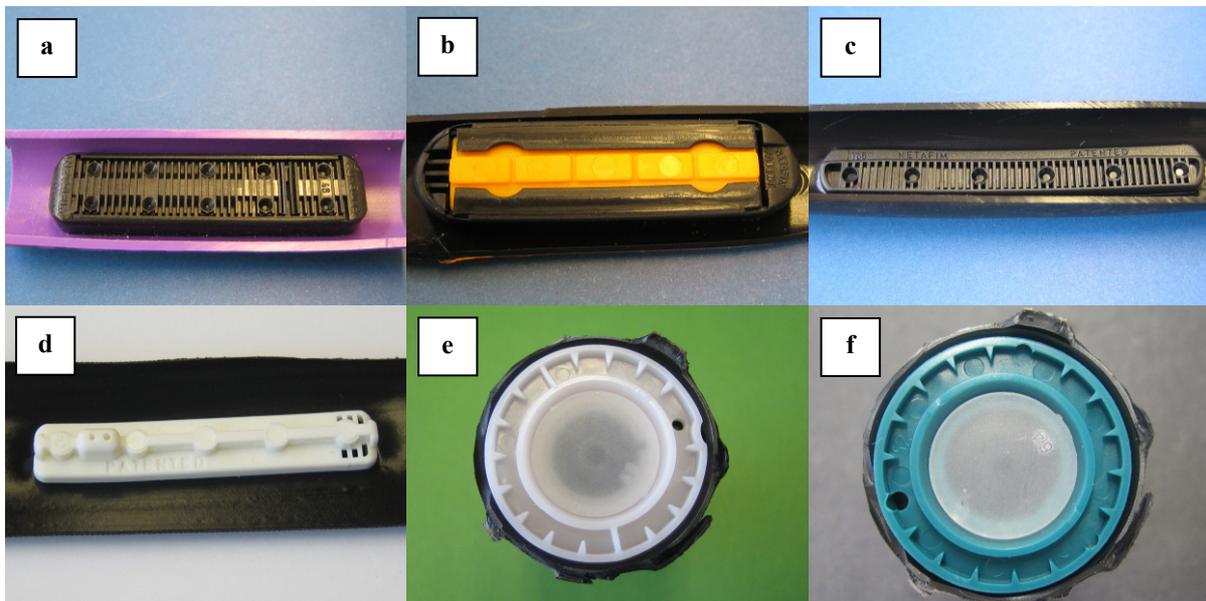


Ilustración 4.3. Vista de los emisores integrados UN (a), RM (b), TI (c) y TO (d), desde el interior del lateral y de la primera parte del laberinto de los emisores insertados P2 (e) y P8(f).

En la Ilustración 4.4 se presenta el laberinto de los emisores utilizados. Las imágenes fueron tomadas después de cortar longitudinalmente los emisores integrados y continuar el despiece en los insertados.

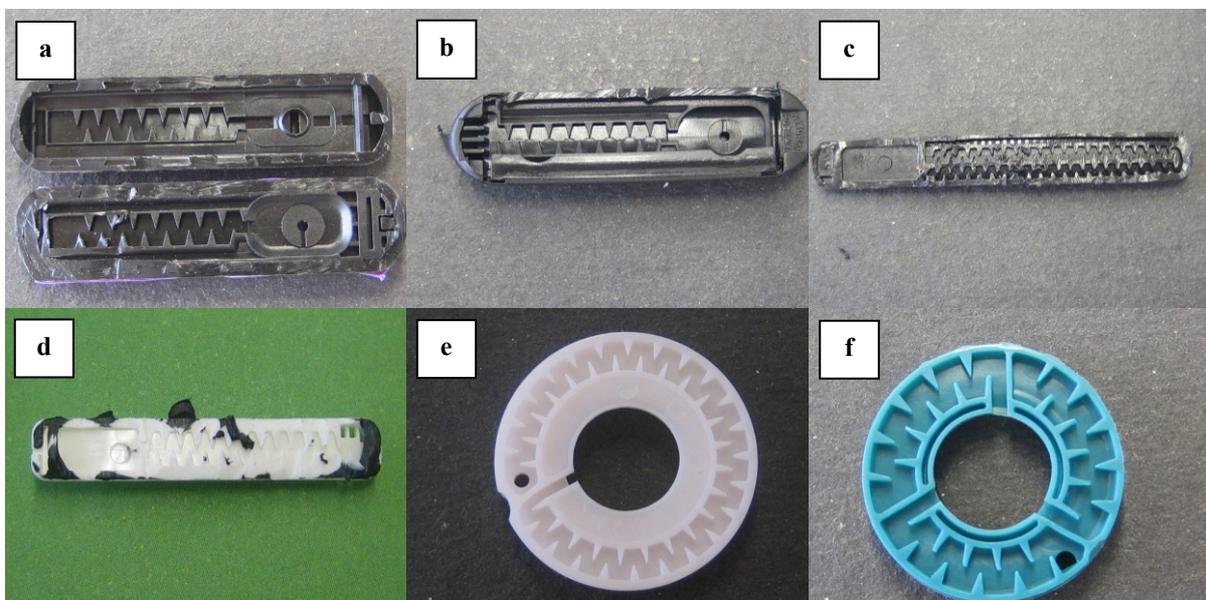


Ilustración 4.4. Vista del laberinto de los emisores UN (a), RM (b), TI (c), TO (d), P2 (e) y P8 (f) utilizados en los ensayos con efluente secundario y terciario.

La disposición en parcela de los goteros para cada una de las unidades de filtración se presenta en la Figura 4.6. Cada unidad se dividió en cuatro subunidades y cada subunidad estuvo formada por seis laterales, cada uno con un tipo de gotero distinto. Este diseño de la

parcela de riego se realizó para poder evaluar la uniformidad de emisión según el método de Merriam y Keller (1978) modificado por Vermeiren y Jobling (1986). El caudal de diseño de la unidad de riego fue de 8056 l/h correspondiente a la suma de los caudales de los laterales de cada subunidad (2014 l/h, ver Tabla 4.3).

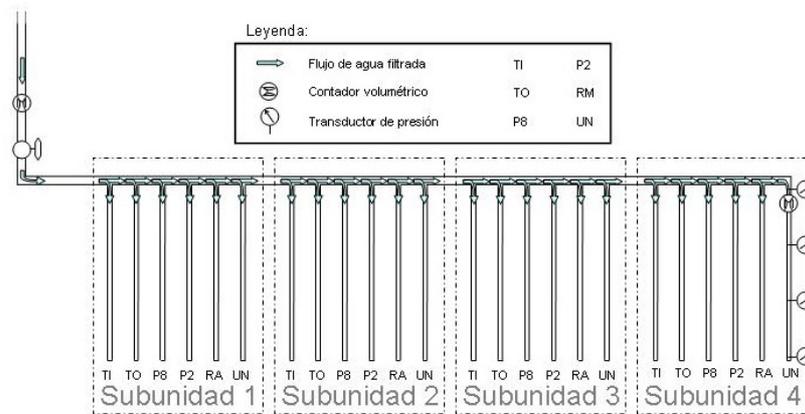


Figura 4.6. Esquema de la disposición, por unidad, de los laterales y tipos de emisores.

4.6. Supervisión, control y adquisición de datos

Una vez diseñado el sistema de riego, se procedió a la implantación de los automatismos de control, de los sistemas de comunicación y de los sensores para la determinación de la presión, del volumen y del caudal en distintos puntos de la instalación. La ubicación de estos sensores se detalla en la Figura 4.5 y en la Figura 4.6. El sistema SCADA que se implantó para gobernar el sistema, estaba formado por un ordenador personal, un autómatas programable y una red de comunicación entre ambos.

4.6.1. Automatismos

Los sensores utilizados para medir la presión y el caudal producían una señal eléctrica de 4 a 20 mA que después de ser transformada a formato digital (16 bits) se almacenaba en un ordenador. En concreto, para medir la presión a la entrada y salida de los cabezales de filtración se utilizaron transductores de presión con diafragma rasante modelo MBS 4010 (Danfoss, Nordborg, Dinamarca) de rango de medida de 0 a 600 kPa y una precisión $\leq \pm 0.3$ % F.S. (fondo de escala o valor leído) y $\leq \pm 0.8$ % F.S. (máximo). La medición del caudal a la salida de los cabezales de filtración se efectuó mediante caudalímetros electromagnéticos modelo MP-400-CB (Comaquinsa, Llinars del Vallès, España) de rango de medida de 2 a 20 m³/h y precisión $\leq \pm 1$ % F.S. Un contador de turbina con emisor de impulsos modelo WP-Dynamic DN 50 (Sensus, Raleigh, NC, EE.UU.) de rango de medida de 0.30 a 90 m³/h y precisión $\leq \pm 2$ % F.S. (normal) $\leq \pm 5$ % F.S. (mínimo) instalado en la tubería que recogía el agua de limpieza de los filtros permitió medir el volumen de agua de lavado. Se colocaron válvulas motorizadas para la maniobra de los cabezales, las cuales se gobernaron desde dos tipos de controladores de lavado de filtros. Se utilizó el controlador de lavado Filtron 246 2 DC (Talgil, Kiryat Motzkin, Israel) para los filtros de malla y el Reg 8 plus (Regaber, Parets del Vallès, España) con un presostato diferencial modelo Cas 155 (Danfoss, Nordborg, Dinamarca) para los filtros de anillas y arena.

Por otra parte, en 4 laterales de riego con el mismo gotero (UN) y en las posiciones inicial, 1/3, 2/3 y final de los laterales (Figura 4.6), se instaló un medidor de caudal electromagnético

MP-400-CB (Comaquinsa, Llinars del Vallès, España) de rango de medida de 0.4 a 4 m³/h y precisión $\leq \pm 1$ % F.S. al inicio del lateral y 4 transductores de presión con diafragma rasante tipo MBS 4510 (Danfoss, Nordborg, Dinamarca) de rango de medida de 0 a 100 kPa y una precisión $\leq \pm 0.2$ % F.S. (normal) y $\leq \pm 0.5$ % F.S. (máximo).

4.6.2. Ordenador personal

El ordenador personal enviaba datos y órdenes hacia el autómatas programable y, a su vez, recibía datos desde éste. También ordenaba, clasificaba y archivaba los datos necesarios para su posterior análisis y servía de interfaz entre el usuario y la instalación. El ordenador principal no actuaba directamente sobre los automatismos sino que lo hacía a través del autómatas programable.

El ordenador personal era un Dell (Round Rock, TX, EE.UU.) Pentium 4, de 2.80 GHz y 256 MB de RAM, con sistema operativo Windows XP Professional Versión 2002 (Microsoft, Redmond, WA, EE.UU.) y con las aplicaciones del paquete informático Office Professional Edición 2003 (Microsoft, Redmond, WA, EE.UU.). Además, el ordenador disponía de la aplicación del software RSView32 Enterprise visualization (Rockwell Software, Milwaukee, WI, EE.UU.).

El software RSView32 disponía de una interfaz gráfica para la visualización del estado del sistema mediante objetos animados, gráficos, textos, listados, y ventanas múltiples, entre otros. Este software utilizaba tecnología abierta a otros software de Rockwell Software, de Microsoft u otras aplicaciones y permitía la realización de proyectos de supervisión, control y adquisición de datos.

4.6.3. Autómata programable

El autómatas programable, modelo SLC 500 (Allen-Bradley, Milwaukee, WI, EE.UU.), aceptaba órdenes desde el ordenador personal, al que también enviaba datos. El autómatas estaba compuesto por un procesador, una fuente de alimentación para el procesador, módulos para entradas y salidas, los interfaces de comunicación y otra fuente de alimentación para los automatismos de medida.

Se utilizó un chasis modelo 1446-A7 (Allen-Bradley, Milwaukee, WI, EE.UU.) de dimensiones 171 x 282 x 145 mm y 1.1 kg de peso y con capacidad para instalar 7 módulos, y una fuente de alimentación modelo 1746-P2 (Allen-Bradley, Milwaukee, WI, EE.UU.) que permitía satisfacer las necesidades del autómatas del sistema. El voltaje de entrada a la fuente era de 240 V en corriente alterna y suministraba corriente continua a 24 V.

El módulo procesador escogido fue el modelo SLC 5/03 8 K 1747-L531 (Allen-Bradley, Milwaukee, WI, EE.UU.) con puerto RS-232 para facilitar la conectividad con la red local DH-485 a través del interfaz 1761-NET-AIC (Allen-Bradley, Milwaukee, WI, EE.UU.).

Para realizar las funciones de conexión deseadas se precisaron seis módulos (Allen-Bradley, Milwaukee, WI, EE.UU.):

- Un módulo 1746-IB16 con 16 entradas digitales de corriente continua de 24 V para detectar el paso de corriente continua procedente de los cuatro pulsadores de limpieza de los cabezales, del paro de emergencia, del sensor de nivel de la arqueta de aguas tratadas o del tanque, del contador volumétrico de agua de limpieza de los filtros, de

los cinco presostatos diferenciales de presión de los programadores de lavado de los filtros y del selector de bomba automático.

- Un módulo 1746-IV8 con 8 entradas digitales de corriente continua de 24 V para recibir los pulsos de los 8 medidores de caudal y así conocer el volumen total.
- Dos módulos 1746-OW16 con 16 salidas digitales tipo relé de contacto cada uno para accionar las 8 válvulas motorizadas, los 5 programadores de lavado, el grupo de bombeo y los 9 pilotos indicadores del cuadro eléctrico.
- Dos módulos 1746-NI16 con 16 entradas analógicas con un rango de medida entre 4 y 20 mA y una resolución de 16 bits (0 a 65535 particiones). Estos módulos estaban conectados a los 8 medidores de caudal y a los 24 transductores de presión.

Para la alimentación de los automatismos de campo que lo requerían, se escogió una fuente de alimentación 1606-XLP-72-E (Allen-Bradley, Milwaukee, WI, EE.UU.) que subministraba 72 W de potencia a un voltaje de 24 V de corriente continua.

4.6.4. Red de comunicaciones

Para la comunicación entre el ordenador personal y el autómatas programable, se utilizó una red de área local DH-485 (Data highway). La conexión del ordenador a la red se realizó a través de un interfaz que conectaba el puerto de salida (RS-232) del ordenador con la red de área local (DH-485). La red de área local tenía una longitud de 30 m e iba desde el ordenador principal al autómatas programable situado en el campo. El cable utilizado era del tipo Belden 9842 (Belden, St. Louis, MO, EE.UU.) que permitía salvar distancias de hasta 1219 m y tenía una velocidad de transmisión máxima de 19.2 kbits/s. El autómatas programable dispuso de conectividad vía puerto RS-232 y se conectó a la red DH-485 utilizando el mismo interfaz.

Todos los instrumentos y medidores se conectaron al autómatas programable. La red de comunicaciones resultante se puede observar en la Figura 4.7.

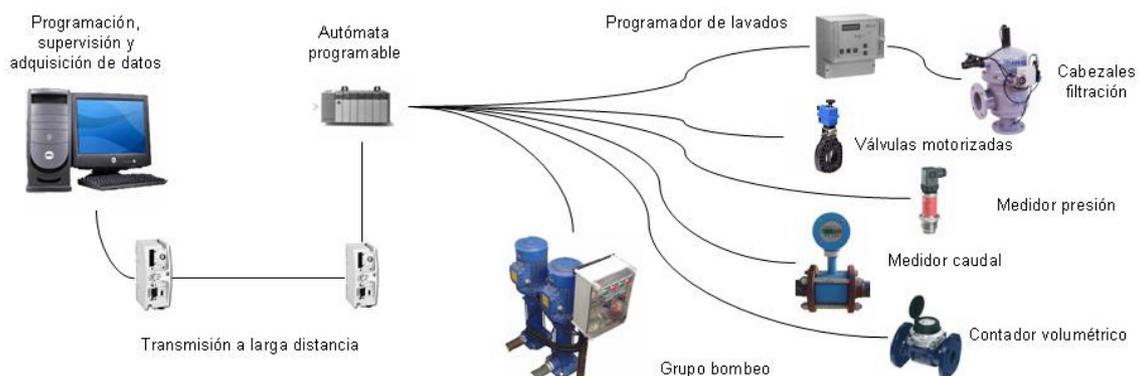


Figura 4.7. Esquema de comunicaciones del sistema SCADA utilizado en los ensayos.

4.6.5. Funcionamiento del sistema SCADA

Desde el ordenador personal se accedía a distintas pantallas del entorno desde donde se podía programar los riegos, modificar las condiciones para provocar los lavados a los filtros y poder visualizar en tiempo real los datos adquiridos (ver Figura 4.8).

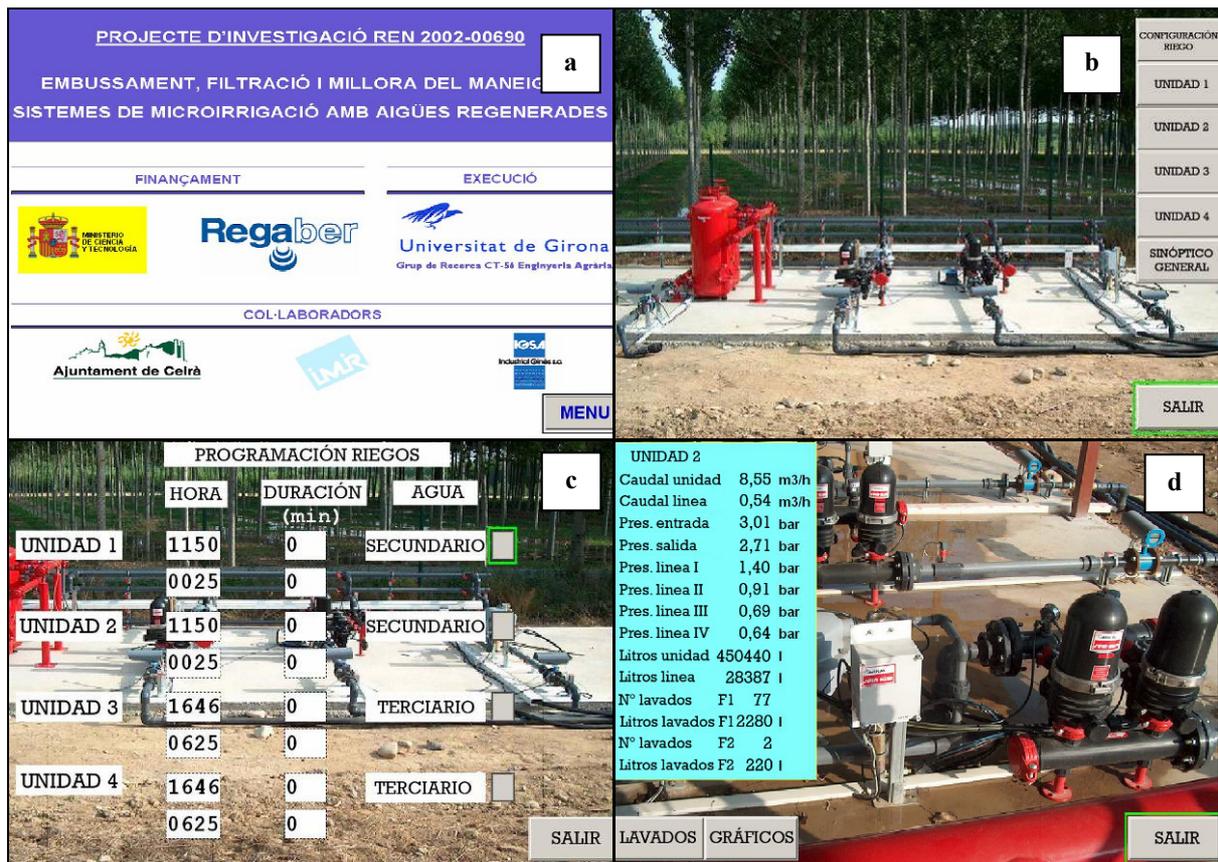


Figura 4.8. Pantallas del sistema SCADA de presentación (a), de acceso a las opciones (b), de programación de los riegos (c) y de supervisión en tiempo real del funcionamiento (d).

Los datos controlados fueron:

- el caudal y volumen filtrado en cada cabezal
- el caudal y volumen en la entrada de los cuatro laterales monitorizados
- el volumen utilizado en el lavado de los filtros
- el número de lavados de los filtros de los sistemas de filtración
- la presión en la entrada y en la salida de cada cabezal
- la presión al inicio, a 1/3, a 2/3 de la longitud y al final de los cuatro laterales monitorizados
- las horas acumuladas de riego

Los valores instantáneos de todos estos datos eran registrados cada minuto para generar una base de datos que era fácilmente exportable a programas de gestión y elaboración de datos. El sistema proporcionaba un archivo para cada unidad con los registros del funcionamiento de una semana.

4.7. Control remoto

Durante la pausa entre el ensayo con efluente secundario y terciario se proporcionó al sistema la posibilidad de acceso remoto al ordenador de control ubicado en la parcela de experimentación desde cualquier punto dotado de conexión a Internet.

Se utilizó una tarjeta PCMCIA (*Personal Computer Memory Card International Association*) de internet móvil 3G modelo E612 (Huawei, Bantian, China) en la cual se insertó una tarjeta SIM (*Subscriber Identity Module*). Mediante la utilización del programa Escritorio Movistar (Telefónica Móviles España, Madrid, España) se permitió el acceso a la red de internet.

El servicio de internet contratado adjudicaba una dirección IP (*Internet Protocol*) variable cada vez que el ordenador se conectaba. Para solucionar el problema de su identificación desde cualquier otro sitio en la red, se utilizó un proveedor de dominios gratuitos (DynDNS, Manchester, NH, EE.UU.). Después de registrar un dominio fijo, el proveedor asociaba éste a la IP variable.

Se utilizó el programa UltraVNC con GPL (*General Public Licence*) para acceder remotamente (Ilustración 4.5) y poder controlar la instalación (Ilustración 4.6).

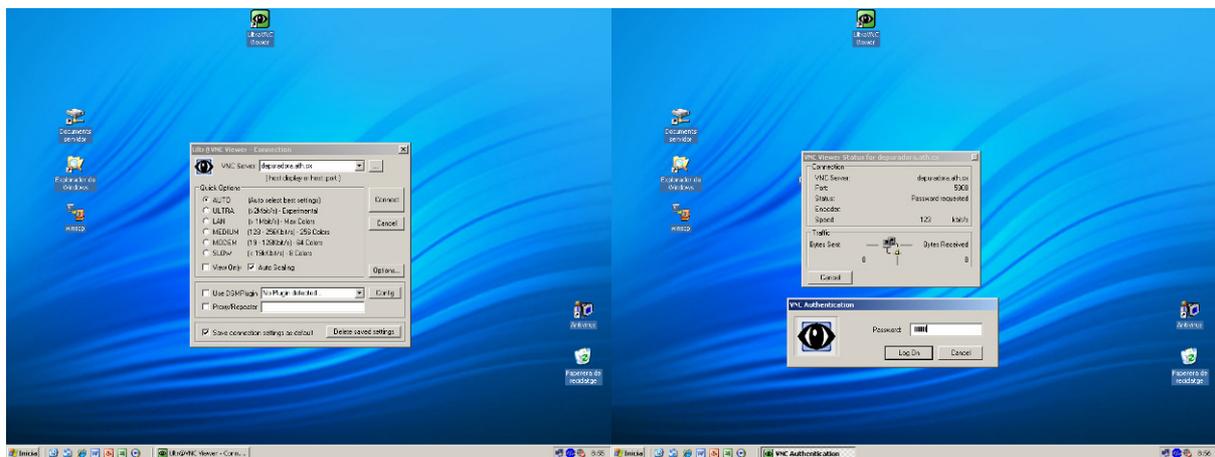


Ilustración 4.5. Pantallas presentadas para acceder remotamente al ordenador de control de la instalación.



Ilustración 4.6. Presentación de la pantalla del ordenador de control en un ordenador remoto.

También fue necesario el uso de un programa de registro y ejecución de macros para configurar la reconexión a la red de internet del ordenador de la instalación. Se registró el procedimiento del ratón y sus instrucciones para poder reconectar a la red en el caso de que se produjeran desconexiones o fallos en el suministro eléctrico y se programó para su ejecución periódica.

4.8. Ejecución del ensayo

4.8.1. Calendario de funcionamiento

El ensayo con efluente secundario se inició el día 11 de abril de 2005. Durante la primera semana se realizó la puesta en marcha del sistema, efectuándose los ajustes necesarios para conseguir el correcto funcionamiento de la instalación. El ensayo se ejecutó bajo dos tipos de funcionamiento, el doble y el individual. En el funcionamiento doble, se estableció un régimen diario normal de riego de 12 h al día por unidad repartidas en 2 sesiones de 6 h, lo que representaba el funcionamiento de las unidades de 2 en 2 y con el mismo grupo de bombeo (Tabla 4.5). Periódicamente se realizó una rotación de la distribución horaria de los funcionamientos, de manera que cada unidad operara en todas las horas del día. También se realizó una rotación del emparejamiento en el funcionamiento para asegurar que todas las unidades hubieran trabajado con todas. Esto se decidió para evitar que las variaciones de presión debidas a los lavados de los filtros afectasen siempre a la misma unidad de trabajo emparejada.

Tabla 4.5. Ejemplo de programación durante la realización del ensayo con efluente secundario.

Funcionamiento	Distribución horaria	Sistema de filtración			
		Arena	Combinado	Anillas	Malla
Doble (0-930 h)	00:00 - 06:00	Bomba 1		Bomba 1	
	06:00 - 12:00		Bomba 1		Bomba 1
	12:00 - 18:00	Bomba 1		Bomba 1	
	18:00 - 00:00		Bomba 1		Bomba 1
Individual (930-1000 h)	00:00 - 06:00	Bomba 1			
	06:00 - 12:00		Bomba 1		
	12:00 - 18:00			Bomba 1	
	18:00 - 00:00				Bomba 1

Después del día 30 de ensayo y con 300 h de riego acumuladas, y después del día 58 y con 600 h de riego acumuladas, se paró el riego durante 4 y 3 días, respectivamente. Estos paros se realizaron para estudiar el efecto de los mismos en la obturación de los goteros y se aprovecharon para efectuar labores de mantenimiento del sistema. Concretamente, en el paro a las 600 h, se reparó la bomba para recuperar la presión de funcionamiento que había disminuido durante las últimas horas debido a la aparición de incrustaciones en los rodetes y la carcasa.

El 27 de julio de 2005 con 930 h de riego, se decidió cambiar la programación del riego a 6 h al día por cada unidad (Tabla 4.5). Este funcionamiento se identifica como el individual y de esta forma, el grupo de bombeo suministraba agua a una sola unidad de filtración en cada sesión de riego.

El día 9 de agosto de 2005, después de 1000 h y 104 días de riego de cada unidad se dio por finalizado el ensayo con efluente secundario.

Antes de empezar el ensayo con efluente terciario se cambió la arena de los filtros de arena. También se lavaron las mallas y las anillas de los filtros con agua a presión y se sumergieron durante 8 h en hipoclorito sódico (al 5 %) para eliminar los restos de materia orgánica, tal y como recomienda el fabricante. Además, todos los laterales y goteros se sustituyeron por otros de nuevos.

El ensayo con efluente terciario se inició el día 19 de abril de 2006. Después de la puesta en marcha del sistema se estableció un régimen diario normal con una sesión de 7 h al día por unidad en los días laborables y 12 h al día, por unidad, repartidas en 2 sesiones de 6 h, los fines de semana y festivos (Tabla 4.6). Como se ha visto en el apartado 4.5.1 la captación del efluente terciario se hacía a través de un tanque de 3 m³ dónde llegaba el efluente propulsado por el grupo de bombeo del circuito de aguas de servicio de la EDAR. Durante el llenado del tanque, se producía una caída de presión en el circuito de agua de servicio que impedía el normal funcionamiento de algunos equipos de la EDAR. Para resolver esta situación se concentró el régimen horario de riego de los días laborales en el periodo en el que estos equipos no funcionaban (de las 18:00 h a las 08:00 h).

Con el efluente terciario también se planteó el funcionamiento de las unidades de 2 en 2, pero en este caso, cada unidad tenía un sistema de impulsión del agua independiente. Por este motivo cada unidad trabajaba con caudal y presión independiente del trabajo de la unidad emparejada por lo que se decidió no realizar la rotación del emparejamiento. Sí que se efectuó, al igual que con el secundario, una rotación de la distribución horaria de los funcionamientos para asegurar que todas la unidades funcionaran en todas las horas de operación.

Tabla 4.6. Ejemplo de programación durante la realización del ensayo con efluente terciario.

Funcionamiento	Distribución horaria	Sistema de filtración			
		Arena	Combinado	Anillas	Malla
Laborables	18:00 - 01:00	Bomba 1		Bomba 2	
	01:00 - 08:00		Bomba 1		Bomba 2
Fin de semana y festivos	00:00 - 06:00	Bomba 1			Bomba 2
	06:00 - 12:00		Bomba 2	Bomba 1	
	12:00 - 18:00		Bomba 2	Bomba 1	
	18:00 - 00:00	Bomba 1			Bomba 2

Después del día 18 de ensayo y con 120 h acumuladas se paró la instalación por falta de suministro de agua depurada debido a problemas en el grupo de bombeo del agua de servicio de la estación depuradora. Después de 5 semanas, se pudo retomar el ensayo, hasta que, en el día 76 y con 575 h, se paró la instalación debido a que la EDAR procedió al vaciado del reactor secundario para realizar labores de reparación y mantenimiento, dejando sin suministro de efluente la instalación experimental durante dos días.

El día 1 de octubre de 2006, después de 1000 h de riego de cada unidad y de 132 días de funcionamiento se terminó el ensayo con efluente terciario.

En la Figura 4.9 se presenta la evolución de funcionamiento acumulado de los ensayos durante los dos periodos de estudio. Las cuatro unidades con los dos efluentes trabajaron al mismo ritmo horario excepto durante el periodo de tiempo comprendido entre las 400 y las 700 h del ensayo con efluente terciario. Al inicio de este periodo (21 de julio de 2006) se averió el presostato de presión diferencial del programador de lavado del filtro de malla de la unidad con sistema de filtración combinado (unidad 2). En este momento se decidió parar el funcionamiento de esta unidad y continuar operando con las otras tres. Después de 9 días, y una vez cambiado el presostato, se reinició el funcionamiento de la unidad 2, incrementándose temporalmente el régimen de trabajo de esta unidad para poder igualar las horas acumuladas de funcionamiento y el ritmo horario de trabajo.

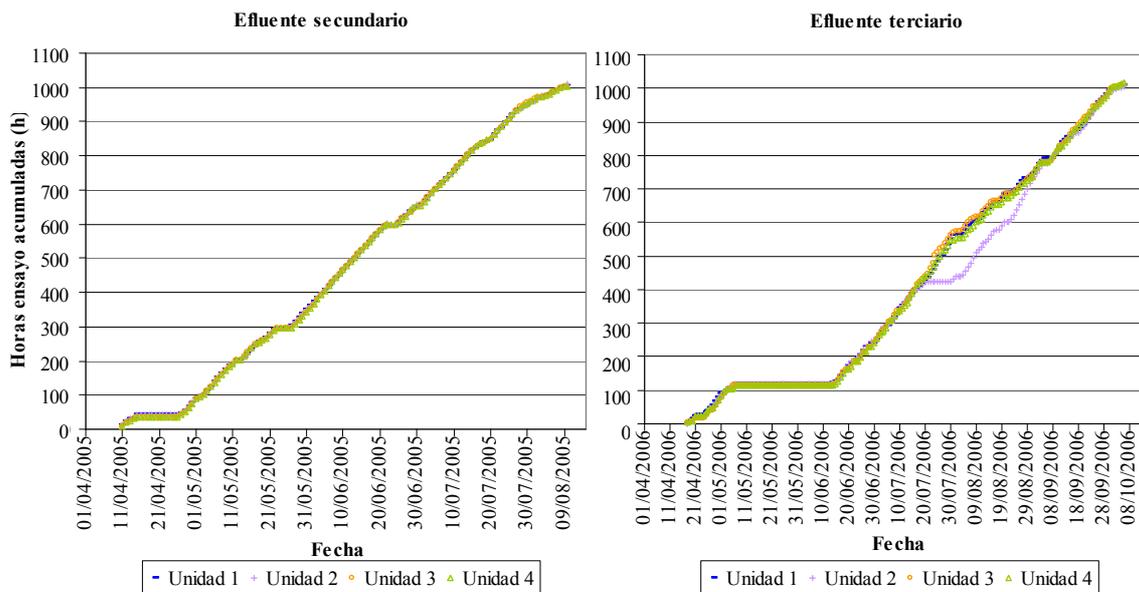


Figura 4.9. Evolución de las horas de funcionamiento acumulado por cada sistema de filtración en el ensayo con efluente secundario y terciario, respectivamente.

4.8.2. Toma y análisis de muestras de los efluentes

Durante los ensayos se tomaron muestras de agua a la entrada y a la salida de los filtros en 12 ocasiones con el efluente secundario y en 10 ocasiones con el efluente terciario. En concreto, en el ensayo con efluente secundario se tomó muestra de agua a las 100, 200, 260, 370, 450, 535, 650, 715, 780, 860, 935 y 970 h y en el ensayo con efluente terciario se tomó muestra a las 50, 175, 235, 350, 430, 550, 650, 760, 880 y 970 h.

La muestra a la entrada del filtro se recogía después del lavado del mismo y antes de que transcurriesen 15 minutos. La muestra a la salida del filtro se tomaba a los 15 minutos de haberse realizado una limpieza. Si en el momento de la toma de muestra se observaba que alguno de los filtros estaba en un ciclo de lavado continuo, se tomaba muestra del agua de la entrada y la salida del filtro embozado, se procedía a lavar manualmente los filtros y se volvía a tomar muestra en la entrada y salida del filtro. Este hecho sucedió con los filtros de malla, de la unidad con filtro de malla y de la unidad con sistema de filtración combinado, durante el ensayo con efluente secundario en los muestreos de las 450, 535, 650, 715, 780 y 935 h.

A diferencia del ensayo con efluente secundario, en el que se esperaba a que los sistemas de filtración se lavaran automáticamente para tomar la muestra, en el ensayo con efluente terciario, debido al funcionamiento en horario nocturno del sistema, el muestreo se realizaba después de provocar manualmente los lavados a través del cuadro de mandos. En este caso, al ser consecutivos en el tiempo los lavados de las dos unidades en funcionamiento, se tomaba una única muestra representativa de la entrada a las dos unidades.

La determinación de la turbidez se realizó en campo utilizando un turbidímetro HI 93703 (Hanna Instruments, Woonsocket, RI, EE.UU.), cuya precisión era de ± 0.5 FTU cuando el valor medido era inferior a 10 y de $\pm 5\%$ del valor medido si éste era mayor de 10 FTU. El pH, la conductividad eléctrica y el oxígeno disuelto también se determinaron en campo, en este caso mediante un medidor de múltiples parámetros Multi 340i (WTW, Weilheim, Alemania). Este medidor determinaba el pH con una sonda Sentix 41-3 (WTW, Weilheim, Alemania) y una precisión de ± 0.01 del valor medido, el oxígeno disuelto con una sonda Cell

Ox 325-3 (WTW, Weilheim, Alemania) y una precisión de ± 0.5 % del valor medido y la conductividad eléctrica con una sonda TetraCon 325-3 (WTW, Weilheim, Alemania) y una precisión de ± 1 % del valor medido. La misma sonda de medida del oxígeno permitía determinar la temperatura del agua con una precisión de ± 0.1 °C.

La determinación de los sólidos en suspensión (SS) se realizó en el laboratorio siguiendo el siguiente procedimiento operatorio. En primer lugar, se secaron los filtros de microfibras de vidrio (Ahlstrom, Helsinki, Finlandia) de 4.7 cm de diámetro y 1.2 μm de poro en una estufa de convección natural Digitheat 190 L (Selecta, Abrera, España). Después de un día de secado a 105 °C se templaban los filtros en un desecador (Nalgene, Rochester, NY, EE.UU.) de policarbonato con gel de sílice e indicador durante 2 h. Una vez secos y a temperatura ambiente, se pesaban los filtros con una balanza Basic (Sartorius, Goettingen, Alemania) con una precisión de ± 0.1 mg. Seguidamente se medían 300 ml de muestra de agua homogeneizada con una probeta de 500 ml y se colocaba el filtro de microfibras de vidrio con la cara lisa hacia abajo en el embudo del sistema de filtración. El sistema de filtración, Magnetic Filter Funnel (Pall Corporation, East Hills, NY, EE.UU.), consistía en un embudo con capacidad de 300 ml y un filtro unidos magnéticamente. Con la ayuda de una bomba de vacío SV 1004 B (Busch, Maulburg, Alemania) con una capacidad de succión de 4 m³/h, un vacío límite de 15 kPa y una potencia nominal del motor de 0.18 kW, se filtraba la muestra, recogiendo el filtrado en un matraz de filtración. Se enjuagaba con agua bidestilada la probeta y el filtro y se secaba el filtro de microfibras de vidrio en la estufa a 105 °C durante 2 h. Una vez seco, se atemperaban los filtros en el desecador durante 2 h y se pesaban. Si el residuo seco del filtro no estaba entre el intervalo de 5 mg a 50 mg, se repetían las operaciones descritas anteriormente aumentando o disminuyendo el volumen de la muestra según conviniera. Con el volumen filtrado y el residuo seco del filtro, se procedía a calcular los sólidos en suspensión.

Para la determinación de la distribución de partículas se utilizó un analizador de partículas láser Galai Cis 1 (Galai, Migdal Haemek, Israel). El procedimiento experimental de lectura consistía, en primer lugar, en calibrar automáticamente el analizador de partículas sin ninguna interposición en el haz del rayo láser. Una vez efectuada esta calibración previa se procedía al análisis de las diferentes muestras disponiéndola en una célula de lectura con una capacidad de 5 ml. En la célula de lectura se colocaba un agitador magnético para que el líquido se mantuviera en continua agitación y evitar así la sedimentación de partículas.

4.8.3. Análisis del efluente secundario

Con la caracterización del efluente secundario de los dos años, se pretendía poder comparar directamente estos efluentes y explicar, en caso que fuera necesario, las diferencias que pudieran aparecer entre el efluente secundario del ensayo del año 2005 y el efluente terciario del ensayo del año 2006.

Los técnicos responsables de la estación depuradora realizaban, periódicamente, muestreos a la salida del tratamiento secundario para determinar los niveles de los SS, DQO, CE, pH, nitrógeno total, nitrógeno amoniacal, nitrógeno nítrico y fósforo total.

La determinación de los sólidos en suspensión la efectuaron siguiendo la norma UNE-EN 872 (AENOR, 1996). La CE la midieron utilizando un aparato HI9233 (Hanna Instruments, Woonsocket, RI, EE.UU.) provisto de una sonda HI7630W (Hanna Instruments, Woonsocket, RI, EE.UU.) con una precisión de ± 1 % del valor. Se utilizó un medidor pH330 (WTW, Weilheim, Alemania) con una sonda Sentix 41 (WTW, Weilheim, Alemania) y una precisión

de ± 0.01 del valor medido. Para la determinación del nitrógeno amoniacal se utilizó un electrodo de amonio 290a+ (Thermo Orion, Waltham, MA, EE.UU.). El método fotométrico se utilizó para analizar el nitrógeno nítrico, el nitrógeno total y el fósforo total. En concreto se utilizó un medidor DR 890 (Hach Lange, Düsseldorf, Alemania). Para la determinación de la DQO se utilizó el método de reflujo abierto (APHA *et al.*, 1998).

4.8.4. Reducción de los parámetros físico-químicos del efluente

Se utilizaron los resultados de las muestras tomadas antes y después de los sistemas de filtración para determinar la reducción del pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, turbidez, sólidos en suspensión y número de partículas del efluente de entrada. Con los datos de cada parámetro a la entrada (N_0) y a la salida (N) se calculó el porcentaje de reducción (R) conseguido por cada sistema de filtración mediante la ecuación:

$$R = \frac{N_0 - N}{N_0} \cdot 100 \quad 4-II$$

Se realizó el cálculo para cada parámetro y día de muestreo y se presentaron los valores medios por cada sistema de filtración, parámetro y efluente.

4.8.5. Análisis microbiológico del efluente

En tres muestras de agua se analizó la presencia de coliformes fecales, microorganismos aerobios mesófilos (30 °C) y huevos de nemátodo. Una vez recogidas las muestras se llevaron a un laboratorio de análisis homologado para su determinación mediante procedimientos normalizados de trabajo basados en los métodos especificados en la IT 200 (DGQA, 2003).

4.8.6. Manejo del banco de filtración

Debido a las cambiantes características de los efluentes utilizados, se decidió que el lavado de los filtros sería gobernado por la diferencia de presión entre la entrada y la salida de los mismos. Como se ha comentado, cada cabezal de filtración tenía su controlador de lavados que, entre otras funciones, medía la diferencia de presión entre la entrada y la salida. El programador Reg 8 plus (Regaber, Parets del Vallès, España) controlaba los lavados de los dos filtros de arena de la Unidad 1, los dos filtros de anillas de la Unidad 2 y, los dos filtros de anillas de la Unidad 3. El programador Filtron 246 2 DC (Talgil, Kiryat Motzkin, Israel) controló el filtro de malla de la Unidad 2 y el de la Unidad 4. Además de los programadores, como ya se ha descrito, cada sistema de filtración tenía sus transductores de presión a la entrada y a la salida.

En los sistemas de filtración de arena, anillas y malla, se activaba un lavado cuando la diferencia de presión entre la entrada y la salida (medida con los transductores de presión) era superior durante más de dos minutos al valor prefijado. A partir de la activación del lavado, el controlador pasaba a gobernar los mecanismos hidráulicos y temporales del lavado. En el sistema de filtración combinado, la posición de los transductores de presión, antes y después de los dos filtros, dieron información de la pérdida de presión del conjunto de los dos filtros del sistema, por lo que estos valores no se utilizaron para la activación del lavado sino que se usaron los presostatos diferenciales de presión de los controladores de los lavados. Cuando los presostatos diferenciales activaban el lavado, independientemente para cada filtro, los programadores de lavados pasaban a gobernar el lavado.

Por recomendación del fabricante, se estableció que una diferencia de presión, entre la entrada y la salida del filtro, superior a 50 kPa activaría el lavado. Igualmente, Ravina *et al.* (1997) utilizó 50 kPa y Puig-Bargués *et al.* (2005b) 49 kPa. Estos valores se ajustaron a 40 kPa para los filtros de anillas y malla en el ensayo con efluente secundario para optimizar su funcionamiento. También se adoptaron las recomendaciones comerciales de los tiempos de lavado para cada filtro. Así, se escogieron 90, 20 y 30 segundos para los filtros de arena, malla y anillas, respectivamente. Estos tiempos también se ajustaron para conseguir un óptimo funcionamiento. Mientras se realizaron los lavados de los filtros no se cerró el sistema de riego.

El control visual utilizando las pantallas del sistema SCADA y el análisis de los datos registrados fue de gran importancia para detectar problemas en el funcionamiento del sistema, como por ejemplo las obturaciones de los filtros. Cuando se comprobaba que un filtro se lavaba continuamente se procedía a lavarlo manualmente. Los filtros de malla y de anillas se desmontaban y se lavaban a presión con el agua de servicio de la estación depuradora hasta que se observaba que las mallas o las anillas no tenían restos de suciedad visibles.

La presión en la entrada de los filtros durante el ensayo con efluente secundario, se mantuvo alrededor de los 300 kPa en el funcionamiento doble y de 465 kPa en el funcionamiento individual (Figura 4.10). A las 600 h se observó un aumento y estabilización de la presión de entrada gracias a la reparación del grupo de bombeo, motivada por irregularidades en el funcionamiento y en la presión de entrada a los sistemas de filtración. A las 930 h de riego con efluente secundario, tal y como se ha indicado en el apartado 4.8.1, se varió el funcionamiento de los sistemas de riego. Se pasó de bombear a dos unidades a la vez con la misma bomba a bombear un único sistema de filtración con una bomba. Este cambio se realizó para comprobar si un aumento de la presión en el sistema de filtración provocaba una mejora en el funcionamiento de los filtros ya que en el momento de los lavados la demanda de presión fue elevada porque se requería presión para el lavado del filtro y para mantener el riego. Con este aumento se pretendía superar el mínimo de presión en los filtros durante el lavado, sobretudo en el de anillas y malla, y garantizar unos lavados correctos.

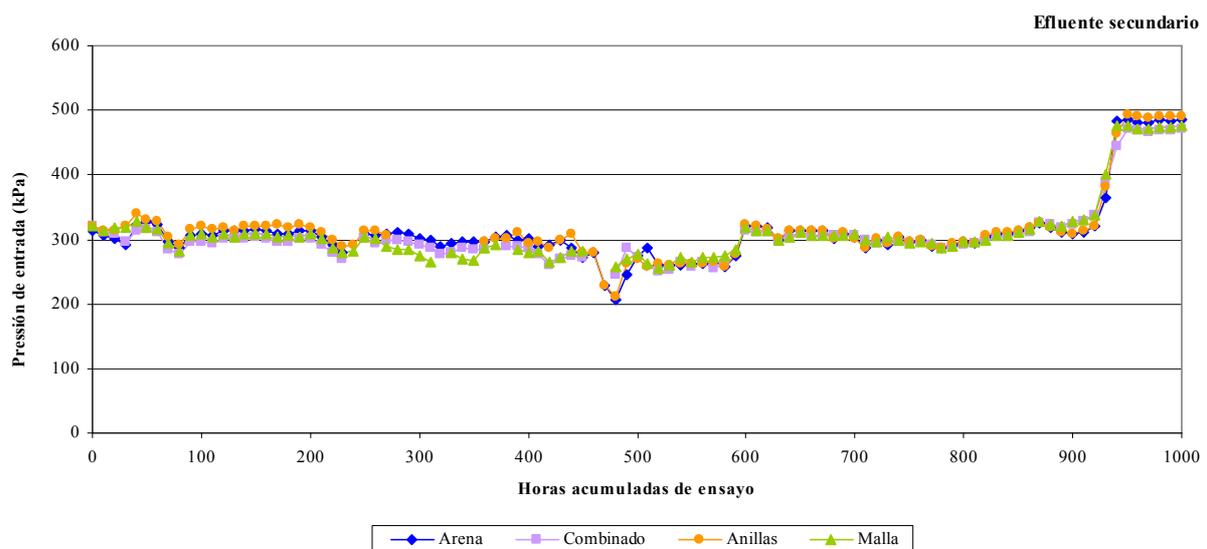


Figura 4.10. Evolución de la presión de entrada a los distintos sistemas de filtración durante la ejecución del ensayo con efluente secundario.

Después de observar una mejoría en el comportamiento de los sistemas de filtración en la última etapa del ensayo con efluente secundario, con mayor presión, se decidió realizar el ensayo con efluente terciario, con una presión a la entrada de los cuatro sistemas de filtración de unos 500 kPa. Esta presión se consiguió con la instalación de una nueva bomba de características idénticas a la ya instalada (apartado 4.5.1). En la gráfica de la evolución de esta presión (Figura 4.11) se observa que no hubo registro de datos antes de las 100 h de funcionamiento en dos sistemas de filtración. Esto fue debido a que la presión durante este tiempo estaba por debajo de la normal por unas pérdidas detectadas en el sistema. Además, alrededor de las 500 h de funcionamiento, se detectó una disminución puntual de la presión en dos unidades debida a un error de programación que llevó a funcionar durante un periodo corto de tiempo estas dos unidades con el mismo grupo de bombeo.

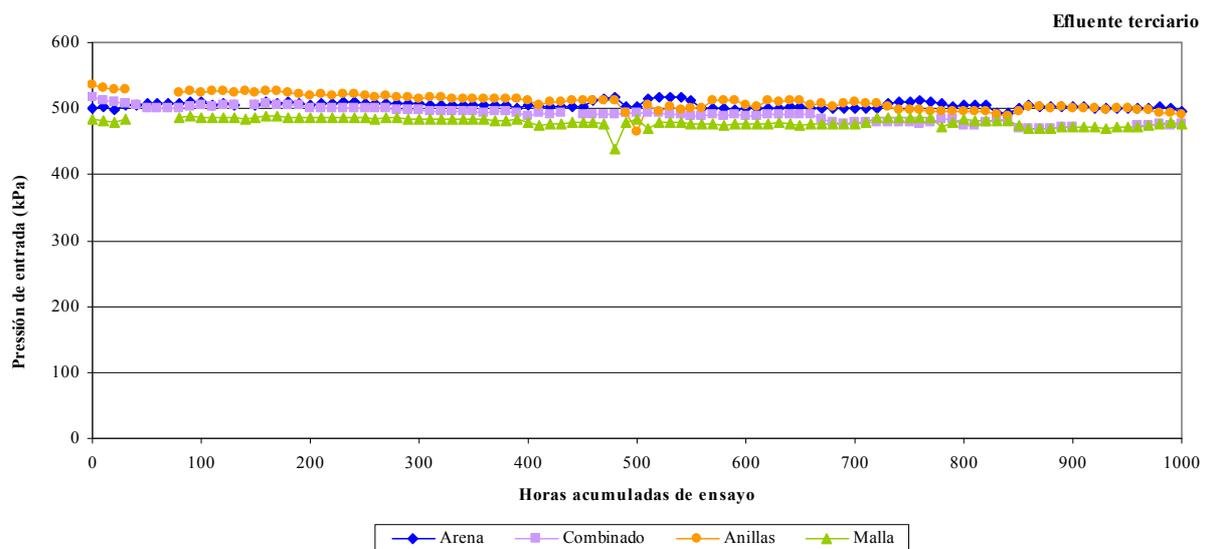


Figura 4.11. Evolución de la presión de entrada a los distintos sistemas de filtración durante la ejecución del ensayo con efluente terciario.

4.9. Caracterización de la granulometría de la arena de los filtros

Se caracterizó la granulometría de la arena de los filtros antes y después de su utilización con cada tipo de efluente. Durante el llenado de los filtros se tomaron varias muestras de los sacos de arena y se mezclaron para obtener una muestra compuesta, homogénea y representativa. Durante el vaciado de la arena de los filtros y después de 1000 h de utilización se tomaron las otras muestras de arena para su caracterización.

Para la caracterización de la granulometría de la arena de los filtros se tomaron 100 g de muestra, después de secarla a 105 °C, y se colocaron en una tamizadora Microcomputer Screener (Filtra Vibración, Badalona, España) en la que se dispusieron un bloque de tamices con luces de 60, 120, 150, 177, 200, 250, 400, 630, 750, 840, 1000, 1200, 1500 y 2000 μm . Se colocaron los tamices uno encima del otro en orden creciente de grado de apertura. Se tamizó la muestra durante 5 minutos, con una potencia correspondiente a la posición 9 del aparato y con una frecuencia de vibración de 2 segundos. Una vez finalizado el proceso, se pesó cada tamiz con la muestra retenida y restándole de la tara del tamiz, se obtuvo la masa retenida. Se realizaron 4 repeticiones de la caracterización granulométrica de la arena.

Con los datos de la masa de arena retenida en cada tamiz se pudo calcular el porcentaje de muestra retenido en cada uno y crear la curva granulométrica en la que se expresa el porcentaje liberado de arena en función del paso de malla del tamiz.

A partir de la curva granulométrica se pudieron hallar tanto su diámetro efectivo como su coeficiente de uniformidad. El diámetro efectivo (D_e) es el orificio de tamiz que libera un 10 % de la muestra y, el coeficiente de uniformidad (CU) es la relación entre las aperturas de tamices que liberan un 60 % y 10 % de la arena.

En la Figura 4.12 se muestra la curva granulométrica de la arena utilizada en los ensayos con efluente secundario y terciario. A partir de esta curva, se encontró el diámetro efectivo y el coeficiente de uniformidad. El diámetro efectivo era de 0.40 mm y 0.27 mm para el efluente secundario y el terciario, respectivamente y sin diferenciarse estadísticamente ($P < 0.05$). En cuanto al coeficiente de uniformidad de la arena utilizada, éste fue de 2.41 en los ensayos con el efluente secundario y de 2.89 con el terciario, siendo en este caso significativamente diferentes ($P < 0.05$).

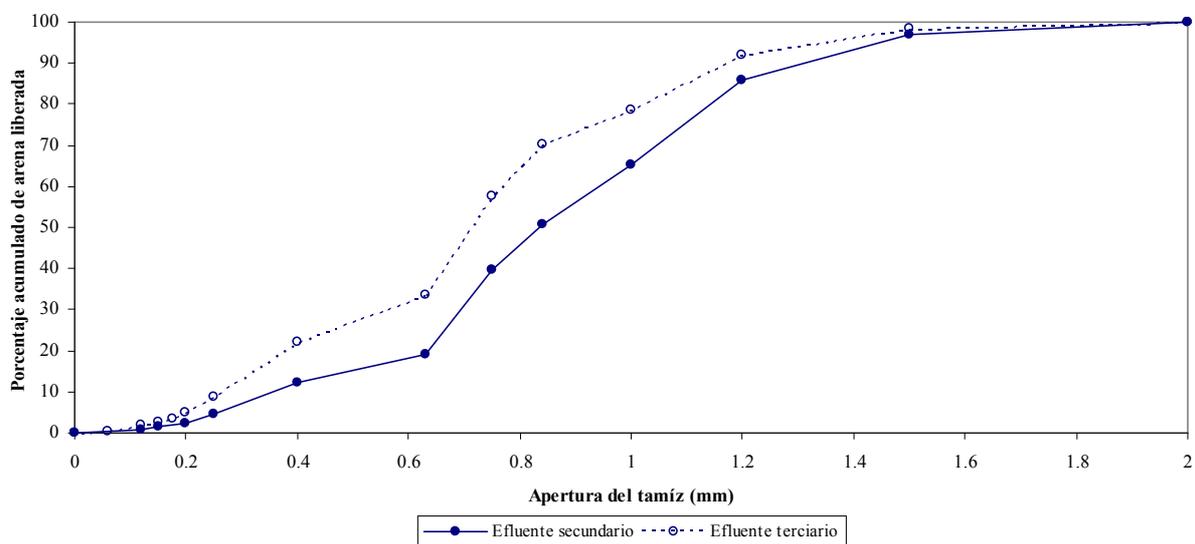


Figura 4.12. Curva granulométrica de la arena silícea utilizada en los filtros de arena.

4.10. Determinación de la conductividad hidráulica saturada de la arena del filtro y del tamaño del poro

El filtro de arena es un medio poroso que durante la filtración es atravesado por un flujo de agua. Este movimiento del agua se rige por la Ley de Darcy (ecuación 4-III) a partir de la cual se puede definir la conductividad hidráulica saturada en cada instante de la filtración (Radcliffe y Rasmussen, 2002):

$$K_s = \frac{v}{\frac{\Delta H}{L}} \tag{4-III}$$

donde:

K_s : conductividad hidráulica saturada (m/s)

v : velocidad instantánea del flujo de agua a través del medio filtrante (m/s)

ΔH : diferencia de presión entre la entrada y la salida del filtro (mca)

L : altura del medio granular (m)

La velocidad del flujo de agua a través del filtro se calculó según la siguiente expresión:

$$v = \frac{Q}{S} \quad 4-IV$$

donde:

v : velocidad instantánea del flujo de agua a través del medio filtrante (m/h)

Q : caudal instantáneo filtrado por el medio filtrante (m³/h)

S : sección transversal del filtro filtrante (m²)

Aplicando la ecuación Poiseuille (ecuación 4-V) se determinó el diámetro efectivo del poro de la arena en el filtro:

$$\left(\frac{d_o}{2}\right)^2 = \frac{8 \cdot \mu \cdot K_s}{\rho \cdot g} \quad 4-V$$

donde:

d_o : diámetro efectivo del poro del medio granular (m)

μ : viscosidad del efluente (Pa·s)

K_s : conductividad hidráulica saturada (m/s)

ρ : densidad del agua (kg/m³)

g : aceleración de la gravedad (m/s²)

4.11. Identificación de la eficiencia de lavado de los filtros

Los lavados de los filtros no fueron todos iguales. Por este motivo se clasificaron en 6 categorías en función de la recuperación de las condiciones de funcionamiento y de las condiciones en que se realizó el lavado. Las categorías que se establecieron fueron:

- **Lavado automático y eficiente:** lavado realizado automáticamente después de detectarse una diferencia de presión, entre la entrada y la salida del filtro, mayor a la establecida. Después del lavado la diferencia de presión se restablecía como la normal en un filtro limpio y permitía un ciclo de filtración normal. Los valores aceptables de pérdida de carga para después de un lavado eficiente se indican en la Tabla 4.7.
- **Lavado automático y no eficiente:** lavado efectuado automáticamente después de detectarse una diferencia de presión entre la entrada y la salida del filtro mayor a la establecida por el controlador y en el que después del lavado no se recuperaba la diferencia de presión correspondiente a un filtro limpio. Esta categoría incluyó lavados de los filtros de anillas y malla del ensayo con efluente secundario en el que, durante los lavados, no se mantuvo la presión mínima requerida y recomendada por el fabricante. También incluyó lavados de todos los sistemas de filtración en los que, durante la realización del ensayo con efluente terciario, el caudal de agua para la

limpieza no fue suficiente, y los lavados realizados durante el episodio de mal funcionamiento del presostato diferencial del controlador de lavados del filtro de malla del sistema de filtración combinado en el ensayo con efluente terciario.

- **Lavado automático y no eficiente de origen desconocido:** lavado realizado automáticamente después de detectarse una diferencia de presión entre la entrada y la salida del filtro mayor al límite prefijado. En este caso, al igual que la anterior categoría, no se restablecía la pérdida de carga de un filtro lavado eficientemente y no se llegó a conocer la causa por la que se realizó un lavado no eficiente.
- **Lavado provocado:** lavado efectuado automáticamente después de ordenar manualmente un proceso de lavado en el cuadro de mandos. Estos lavados se provocaron para intentar recuperar aquellos filtros que permanecían en continuo lavado por hallarse en estado de ciclo obturado, para poder tomar muestra de agua de los filtros, para realizar una medida de uniformidad del riego, o para controlar el proceso de lavado.
- **Lavado no detectado por el sistema SCADA:** lavado no contabilizado por el sistema SCADA y que fue posteriormente identificado con la observación de los datos de presión registrados. Los programadores Reg-8 de los filtros de anillas y arena tenían una cuenta atrás que al llegar a cero activaba un lavado. Cuando se advirtió la existencia de esta función, se modificó para evitar estos lavados no registrados.
- **Lavado manual:** lavado ejecutado manualmente después de detectar que el filtro permanecía en un ciclo de obturación y por tanto en continuo lavado.

En la Tabla 4.7 se presentan los valores mínimos de presión para la realización de los lavados de los filtros y el rango de la pérdida de presión aceptable después de un lavado para considerarlo eficiente. La presión mínima de lavado vino determinada por el fabricante y el rango de pérdida de carga aceptable después de un lavado eficiente se determinó a partir de los datos experimentales. El motivo por el cual los valores de la pérdida de carga admisible en el ensayo con efluente terciario fueron mayores que con el ensayo con efluente secundario fue porque los sistemas de filtración del ensayo con efluente terciario tenían una presión de entrada mayor a la de los sistemas de filtración del ensayo con efluente secundario, lo que, provocó que la pérdida de carga del filtro en estado limpio fuera mayor.

Los altos requerimientos de presión de funcionamiento vinieron determinados porque se tenía que garantizar la presión mínima de lavado durante los lavados (Tabla 4.7) sin cerrar el riego a la parcela de goteros. Esto creaba una gran demanda de presión con el agravante que si no se alcanzaba y superaba el mínimo de presión en los filtros, sobretodo en de anillas y malla, éstos no podían lavarse correctamente.

Tabla 4.7. Descripción de los parámetros aceptados para un lavado eficiente.

	Efluente	Filtro de arena	Filtro de anillas	Filtro de malla
Presión mínima de lavado (kPa)	Secundario	-	250	200
	Terciario	-	250	200
Pérdida de carga aceptable después de un lavado eficiente (kPa)	Secundario	18 - 30	18 - 28	10 - 18
	Terciario	28 - 40	28 - 36	15 - 24

4.12. Consumo de agua de lavado de los filtros

El agua utilizada para el lavado de los filtros supone un consumo de agua adicional por la instalación y es un parámetro característico del tipo de filtro, por lo que constituye una variable de interés en el manejo de los mismos.

A partir de los datos de tiempo y volúmenes registrados durante los ensayos se determinó el volumen filtrado (V_f) y el volumen utilizado por cada lavado (V_u). El volumen filtrado durante un ciclo se calculó según la siguiente expresión:

$$V_f = V_{ff} - V_{fo} \quad 4\text{-VI}$$

donde:

V_f : volumen filtrado durante un ciclo de filtración (l)

V_{ff} : volumen total filtrado al finalizar el ciclo de filtración (l)

V_{fo} : volumen total filtrado al comenzar el ciclo de filtración (l)

Para obtener el volumen de agua utilizado en el lavado se utilizó la fórmula:

$$V_u = V_{uf} - V_{uo} \quad 4\text{-VII}$$

donde:

V_u : volumen utilizado en cada lavado del filtro (l)

V_{uf} : volumen total utilizado después del lavado del filtro (l)

V_{uo} : volumen total utilizado antes del lavado del filtro (l)

El agua utilizada para el lavado de los filtros se calculó en forma de porcentaje según indica la siguiente ecuación:

$$C_{lav} = \frac{V_u}{V_f + V_u} \cdot 100 \quad 4\text{-VIII}$$

donde:

C_{lav} : porcentaje de agua utilizada para el lavado del filtro del total disponible (%)

V_u : volumen agua utilizada para el lavado del filtro (l)

V_f : volumen agua filtrada en un ciclo de funcionamiento (l)

4.13. Estudio del proceso de filtración

Se calculó la variación del caudal filtrado por cada filtro en los ciclos de filtración eficientes. Para ello, se extrajo, de la base de datos de caudales y para cada ciclo de filtración eficiente, el caudal filtrado máximo y mínimo. Los datos de caudales utilizados no contenían los valores de caudales filtrados durante los lavados de los filtros ni tampoco aquellos registros tomados durante la puesta en régimen de funcionamiento. La expresión utilizada para calcular esta relación es la siguiente:

$$q_{\text{var}} = \frac{q_{\text{máx}} - q_{\text{mín}}}{q_{\text{máx}}} \cdot 100 \quad 4\text{-IX}$$

donde:

- q_{var} : variación del caudal filtrado durante un ciclo de filtración eficiente (%)
- $q_{\text{máx}}$: caudal filtrado máximo registrado durante un ciclo de filtración eficiente (l/h)
- $q_{\text{mín}}$: caudal filtrado mínimo registrado durante un ciclo de filtración eficiente (l/h)

Para cada tipo de filtro, efluente y modo de funcionamiento en el ensayo con efluente secundario, se calculó la media y desviación típica de la variación del caudal filtrado (Tabla 4.8). Se decidió calcular dos medias de la variación del caudal filtrado por cada filtro en el ensayo con efluente secundario porque este ensayo se realizó en dos modos de funcionamiento que proporcionaron dos presiones de funcionamiento claramente diferenciadas (apartado 4.8.1 y apartado 4.8.6).

Tabla 4.8. Media y desviaciones típicas de la variación del caudal filtrado por cada filtro utilizado, efluente, y en el ensayo con efluente secundario, tipo de funcionamiento.

Filtro	Funcionamiento	Efluente	
		Secundario	Terciario
Arena	Doble	3.23 ± 1.26	-
	Individual	2.93 ± 0.51	1.89 ± 0.58
Anillas en el combinado	Doble	3.28 ± 0.91	-
	Individual	-	3.86 ± 0.77
Malla en el combinado	Doble	5.22 ± 1.32	-
	Individual	4.89 ± 1.29	3.12 ± 0.93
Anillas	Doble	2.98 ± 0.85	-
	Individual	3.40 ± 0.62	2.43 ± 0.99
Malla	Doble	5.28 ± 1.82	-
	Individual	4.68 ± 0.78	2.72 ± 0.61

Los ciclos de filtración eficientes obtuvieron, de media en los dos ensayos, unas variaciones inferiores al 5.30 %. Se observó que esta variación fue inferior en el ensayo con efluente terciario que la obtenida con los dos funcionamientos en el ensayo con efluente secundario excepto con el filtro de anillas del sistema de filtración combinado. Esta situación puede justificarse por el hecho que en el ensayo con efluente terciario la presión de entrada a los distintos sistemas de filtración fue más estable que en el ensayo con efluente secundario (Figura 4.10 y Figura 4.11).

4.14. Cálculo del índice de filtrabilidad

Los índices de filtrabilidad de los sistemas de filtración de los que se disponía de la presión a la entrada y a la salida (arena, anillas y malla) se calcularon con la ecuación de Boucher (Adin y Alon, 1986):

$$\Delta H = \Delta H_0 e^{I \cdot V} \quad 4-X$$

donde:

ΔH : caída de presión final en el filtro (Pa)

ΔH_0 : caída de presión inicial en el filtro (Pa)

I : índice de filtrabilidad (m^{-3})

V : volumen de efluente filtrado (m^3)

Aunque esta relación es de aplicación en filtración superficial, fenómeno predominante en los sistemas de filtración de malla y anillas, también se puede utilizar en la filtración con arena si esta se realiza a bajas velocidades ya que se observa que la pérdida de presión en el filtro aumenta exponencialmente en función del agua filtrada (Adin, 2003). En la Tabla 4.2 se presentan las velocidades medias superficiales de filtración de los ensayos. Tanto en el ensayo con efluente secundario como en el ensayo con efluente terciario, el sistema de filtración con el filtro de arena filtró los efluentes a unos 21.6 m/h, velocidad inferior a la de los otros sistemas de filtración pero muy superior a la que ensayó Adin (2003) que era de 0.15 m/h. Puig-Bargués *et al.* (2005c) con un filtro de arena con una velocidad de filtración de 10.4 m/h, también ajustó esta relación obteniendo unos buenos ajustes.

4.15. Análisis dimensional de la filtración

En este apartado se relaciona la obturación de los filtros, medida como la diferencia de presión entre la entrada y la salida de los emisores, con las variables que intervienen en este proceso. Para ello, se han utilizado relaciones dimensionales ya existentes y se han hallado otras nuevas.

4.15.1. Relaciones dimensionales existentes

Estudiando la filtración en sistemas de riego con aguas residuales, Puig-Bargués (2003) consideró que con nueve variables que intervenían en el proceso se podía establecer una relación del tipo:

$$f(\Delta H, \phi_f, d_p, A, Q, C, V, \mu, \rho) = 0 \quad 4-XI$$

donde:

ΔH : caída de presión en el filtro (Pa)

ϕ_f : diámetro de paso del agua en los filtros de anillas y malla o diámetro efectivo en el filtro de arena (m)

d_p : diámetro medio de las partículas del agua (m)

A : superficie total de filtración (m^2)

Q : caudal que atraviesa el filtro (m^3/s)

C : contenido en sólidos en suspensión del agua (kg/m^3)

V : volumen del agua que atraviesa el filtro (m^3)

μ : viscosidad del agua (Pa·s)

ρ : densidad del agua (kg/m^3)

A partir de la relación anterior, Puig-Bargués (2003) obtuvo la siguiente ecuación con diferentes números adimensionales:

$$\frac{\mu}{\Delta H^{\frac{1}{4}} \cdot Q^{\frac{1}{2}} \cdot C^{\frac{3}{4}}} = a \cdot \left(\frac{\Delta H^{\frac{3}{4}} \cdot V}{C^{\frac{3}{4}} \cdot Q^{\frac{3}{2}}} \right)^{e1} \cdot \left(\frac{\Delta H^{\frac{1}{2}} \cdot A}{C^{\frac{1}{2}} \cdot Q} \right)^{e2} \cdot \left(\frac{\Delta H^{\frac{1}{4}} \cdot \phi_f}{C^{\frac{1}{4}} \cdot Q^{\frac{1}{2}}} \right)^{e3} \cdot \left(\frac{\Delta H^{\frac{1}{4}} \cdot d_p}{C^{\frac{1}{4}} \cdot Q^{\frac{1}{2}}} \right)^{e4} \cdot \left(\frac{\rho}{C} \right)^{e5} \quad 4-XII$$

La ecuación 4-XII se particularizó, a partir de datos experimentales, para cada tipo de filtro, resultando las siguientes ecuaciones:

para el filtro de arena:

$$\frac{\mu}{\Delta H^{\frac{1}{4}} \cdot Q^{\frac{1}{2}} \cdot C^{\frac{3}{4}}} = 8.61 \cdot 10^{-8} \cdot \left(\frac{\Delta H^{\frac{3}{4}} \cdot V}{C^{\frac{3}{4}} \cdot Q^{\frac{3}{2}}} \right)^{-0.14} \cdot \left(\frac{\Delta H^{\frac{1}{2}} \cdot A}{C^{\frac{1}{2}} \cdot Q} \right)^{0.81} \cdot \left(\frac{\Delta H^{\frac{1}{4}} \cdot \phi_f}{C^{\frac{1}{4}} \cdot Q^{\frac{1}{2}}} \right)^{0.69} \cdot \left(\frac{\Delta H^{\frac{1}{4}} \cdot d_p}{C^{\frac{1}{4}} \cdot Q^{\frac{1}{2}}} \right)^{-0.18} \cdot \left(\frac{\rho}{C} \right)^{0.52}$$

4-XIII

para el filtro de anillas:

$$\frac{\mu}{\Delta H^{\frac{1}{4}} \cdot Q^{\frac{1}{2}} \cdot C^{\frac{3}{4}}} = 4.81 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{\Delta H^{\frac{3}{4}} \cdot V}{C^{\frac{3}{4}} \cdot Q^{\frac{3}{2}}} \right)^{-0.21} \cdot \left(\frac{\Delta H^{\frac{1}{2}} \cdot A}{C^{\frac{1}{2}} \cdot Q} \right)^{0.67} \cdot \left(\frac{\Delta H^{\frac{1}{4}} \cdot \phi_f}{C^{\frac{1}{4}} \cdot Q^{\frac{1}{2}}} \right)^{0.65} \cdot \left(\frac{\Delta H^{\frac{1}{4}} \cdot d_p}{C^{\frac{1}{4}} \cdot Q^{\frac{1}{2}}} \right)^{-0.12} \cdot \left(\frac{\rho}{C} \right)^{0.67}$$

4-XIV

y, para el filtro de malla:

$$\frac{\mu}{\Delta H^{\frac{1}{4}} \cdot Q^{\frac{1}{2}} \cdot C^{\frac{3}{4}}} = 1.10 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{\Delta H^{\frac{3}{4}} \cdot V}{C^{\frac{3}{4}} \cdot Q^{\frac{3}{2}}} \right)^{-0.17} \cdot \left(\frac{\Delta H^{\frac{1}{2}} \cdot A}{C^{\frac{1}{2}} \cdot Q} \right)^{0.74} \cdot \left(\frac{\Delta H^{\frac{1}{4}} \cdot \phi_f}{C^{\frac{1}{4}} \cdot Q^{\frac{1}{2}}} \right)^{0.72} \cdot \left(\frac{\Delta H^{\frac{1}{4}} \cdot d_p}{C^{\frac{1}{4}} \cdot Q^{\frac{1}{2}}} \right)^{-0.19} \cdot \left(\frac{\rho}{C} \right)^{0.61}$$

4-XV

4.15.2. Obtención de nuevas relaciones adimensionales

Dado que el desarrollo de ecuaciones explicativas de la obturación de los filtros mediante análisis dimensional es prometedor y ha sido muy poco explorado, se ha creído conveniente intentar obtener nuevas ecuaciones que incluyan variables distintas a las consideradas por Puig-Bargués (2003).

La primera nueva relación de variables que se evaluó fue:

$$f(\Delta H, \phi_f, A, C, \mu, \rho, v, d_t) = 0 \quad 4\text{-XVI}$$

donde:

v : velocidad de filtración (m/s)

d_t : diámetro de la tubería de entrada al filtro (m)

La matriz que resulta de la combinación de las 8 variables y de sus dimensiones (longitud, L; masa, M, y tiempo, T) fue:

	ΔH	ρ	v	d_t	μ	ϕ_f	A	C
L	-1	-3	1	1	-1	1	2	-3
M	1	1	0	0	1	0	0	1
T	-2	0	-1	0	-1	0	0	0

Puesto que el rango de la matriz dimensional es 3 y el número de variables utilizadas es 8, deben obtenerse $8 - 3 = 5$ grupos π adimensionales. Un grupo de números π adimensionales obtenidos según el método de Buckingham, fue:

$$\pi_1 : \frac{\Delta H}{\rho \cdot v^2} = Eu \quad \pi_2 : \frac{\rho \cdot v \cdot d_t}{\mu} = Re \quad \pi_3 : \frac{\phi_f}{d_t}$$

$$\pi_4 : \frac{A}{d_t^2} \quad \pi_5 : \frac{C}{\rho}$$

Debe resaltarse que, de esta forma se incluyen el de Euler (π_1) que relaciona las fuerzas de inercia de una masa en movimiento con las fuerzas de presión que lo producen (Losada, 2000) y el número de Reynolds (π_2) que expresa la relación entre las fuerzas de inercia y las viscosas.

A partir de la relación 4-XVI se halló la siguiente ecuación:

$$\frac{\Delta H}{\rho \cdot v^2} = b \left(\frac{\rho \cdot v \cdot d_t}{\mu} \right)^{e_6} \cdot \left(\frac{\phi_f}{d_t} \right)^{e_7} \cdot \left(\frac{A}{d_t^2} \right)^{e_8} \cdot \left(\frac{C}{\rho} \right)^{e_9} \quad 4\text{-XVII}$$

Si a la ecuación 4-XVI se le añaden las variables volumen filtrado y diámetro de partícula del efluente, la nueva función será:

$$f(\Delta H, \phi_f, A, C, \mu, \rho, v, d_t, V, d_p) = 0 \quad 4\text{-XVIII}$$

siendo la nueva matriz:

	ΔH	ρ	v	d_t	μ	ϕ_f	A	C	V	d_p
L	-1	-3	1	1	-1	1	2	-3	3	1
M	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0
T	-2	0	-1	0	-1	0	0	0	0	0

Al ser 3 el rango de la matriz adimensional, se tienen que hallar $10 - 3 = 7$ grupos π adimensionales. El nuevo grupo de números π adimensionales obtenidos según el método de Buckingham, fue

$$\begin{aligned} \pi_6 &: \frac{\Delta H}{\rho \cdot v^2} & \pi_7 &: \frac{\rho \cdot v \cdot d_t}{\mu} & \pi_8 &: \frac{\phi_f}{d_t} & \pi_9 &: \frac{A}{d_t^2} \\ \pi_{10} &: \frac{C}{\rho} & \pi_{11} &: \frac{V}{d_t^3} & \pi_{12} &: \frac{d_p}{d_t} \end{aligned}$$

La ecuación que se obtiene con este grupo de números adimensionales fue:

$$\frac{\Delta H}{\rho \cdot v^2} = c \left(\frac{\rho \cdot v \cdot d_t}{\mu} \right)^{e_{10}} \cdot \left(\frac{\phi_f}{d_t} \right)^{e_{11}} \cdot \left(\frac{A}{d_t^2} \right)^{e_{12}} \cdot \left(\frac{C}{\rho} \right)^{e_{13}} \cdot \left(\frac{V}{d_t^3} \right)^{e_{14}} \cdot \left(\frac{d_p}{d_t} \right)^{e_{15}} \quad 4\text{-XIX}$$

Con las mismas variables utilizadas en la ecuación 4-XVIII, se pueden calcular otros grupos de números π . Por ejemplo:

$$\begin{aligned} \pi_{13} &: \frac{\Delta H}{\rho \cdot v^2} & \pi_{14} &: \frac{d_t \cdot \rho \cdot v}{\mu} & \pi_{15} &: \frac{\phi_f \cdot \rho \cdot v}{\mu} & \pi_{16} &: \frac{A \cdot \rho^2 \cdot v^2}{\mu^2} \\ \pi_{17} &: \frac{C}{\rho} & \pi_{18} &: \frac{V \cdot \rho^3 \cdot v^3}{\mu^3} & \pi_{19} &: \frac{d_p \cdot \rho \cdot v}{\mu} \end{aligned}$$

Estos números adimensionales se relacionaron dando lugar a la siguiente ecuación:

$$\frac{\Delta H}{\rho \cdot v^2} = d \cdot \left(\frac{d_t \cdot \rho \cdot v}{\mu} \right)^{e_{16}} \cdot \left(\frac{\phi_f \cdot \rho \cdot v}{\mu} \right)^{e_{17}} \cdot \left(\frac{A \cdot \rho^2 \cdot v^2}{\mu^2} \right)^{e_{18}} \cdot \left(\frac{C}{\rho} \right)^{e_{19}} \cdot \left(\frac{V \cdot \rho^3 \cdot v^3}{\mu^3} \right)^{e_{20}} \cdot \left(\frac{d_p \cdot \rho \cdot v}{\mu} \right)^{e_{21}} \quad 4\text{-XVII}$$

Finalmente, otra combinación de números π adimensionales calculados con las mismas variables utilizadas para calcular la ecuación 4-XVIII fue:

$$\begin{aligned} \pi_{20} &: \frac{\rho}{C} & \pi_{21} &: \frac{v \cdot C^{\frac{1}{2}}}{\Delta H^{\frac{1}{2}}} & \pi_{22} &: \frac{\mu}{\Delta H^{\frac{1}{2}} \cdot C^{\frac{1}{2}} \cdot d_t} & \pi_{23} &: \frac{\phi_f}{d_t} \\ \pi_{24} &: \frac{A}{d_t^2} & \pi_{25} &: \frac{V}{d_t^3} & \pi_{26} &: \frac{d_p}{d_t} \end{aligned}$$

que originaron la ecuación:

$$\frac{v \cdot C^{\frac{1}{2}}}{\Delta H^{\frac{1}{2}}} = e \cdot \left(\frac{\rho}{C} \right)^{e_{22}} \cdot \left(\frac{\mu}{\Delta H^{\frac{1}{2}} \cdot C^{\frac{1}{2}} \cdot d_t} \right)^{e_{23}} \cdot \left(\frac{\phi_f}{d_t} \right)^{e_{24}} \cdot \left(\frac{A}{d_t^2} \right)^{e_{25}} \cdot \left(\frac{V}{d_t^3} \right)^{e_{26}} \cdot \left(\frac{d_p}{d_t} \right)^{e_{27}} \quad 4\text{-XXI}$$

4.15.3. Obtención experimental de las relaciones dimensionales

Para comprobar la validez de las ecuaciones existentes y las desarrolladas con los nuevos grupos adimensionales obtenidos, se utilizaron los datos de los ensayos realizados con los cuatro sistemas de filtración y dos tipos de efluente.

Se utilizaron los datos registrados en continuo por el sistema SCADA y los resultados de los análisis realizados a los efluentes. Los valores de viscosidad y densidad del efluente considerados fueron los establecidos para el agua, de 0.001 Pa·s y de 998 kg/m³, respectivamente (Lide, 2003).

4.16. Medidas de uniformidad del riego

4.16.1. Uniformidad de emisión de caudales

La medida de la uniformidad del riego se realizó siguiendo el método de Merriam y Keller (1978) modificado por Vermeiren y Jobling (1986), consistente en los siguientes pasos:

- Determinar las cuatro tuberías laterales sobre una tubería secundaria. Estas estarían localizadas cerca del principio, otra cerca del extremo, y las otras dos entre las dos primeras y situadas a igual distancia.
- Medir en condiciones normales de funcionamiento las presiones al principio y al final de cada lateral.
- En cada tubería lateral escoger dos emisores contiguos y cuatro emplazamientos distintos: al principio, a 1/3 de su longitud, a 2/3 y al extremo (Figura 4.13).
- Medir el caudal de todos los goteros escogidos durante un número entero de minutos de manera que se obtenga un volumen comprendido entre 100 y 250 ml por emisor, es decir 32 medidas de caudal en 16 puntos.
- Calcular el caudal medio de cada pareja formada por los dos goteros contiguos, lo que hará 16 caudales medios.
- Calcular la media de los cuatro valores más pequeños, que representan el caudal mínimo de distribución.
- Calcular la media general de los 16 valores, que representan el caudal medio de los goteros.

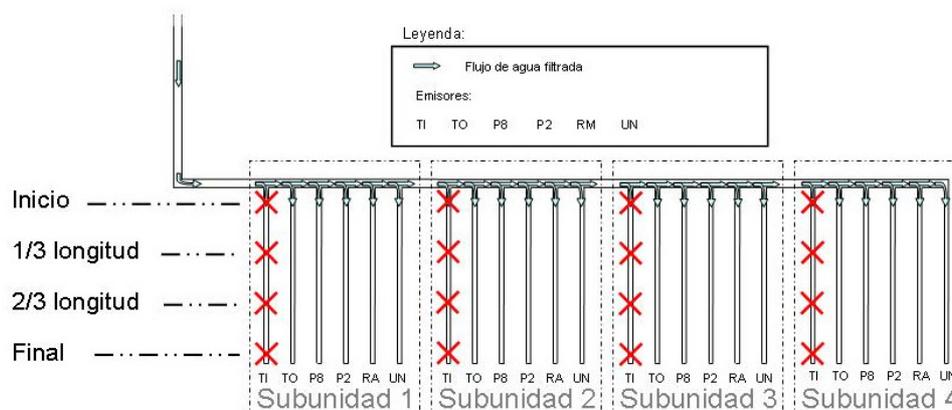


Figura 4.13. Localización de los emisores a muestrear para la medida de la uniformidad en un lateral.

El caudal de los 16 emisores se determinó recogiendo el volumen emitido por cada uno durante 5 minutos en un recipiente de plástico de 5 cm de alto y 20 cm de diámetro (Ilustración 4.7). La presión se midió dentro del lateral utilizando una toma de presión (Eintal, Or-Akiva, Israel) y con un manómetro digital modelo Leo 2 (Keller, Winterthur, Suiza) y un adaptador de aguja (Ilustración 4.7). Este manómetro tenía un error máximo de 0.065 % del valor según el certificado de calibración emitido por el fabricante.

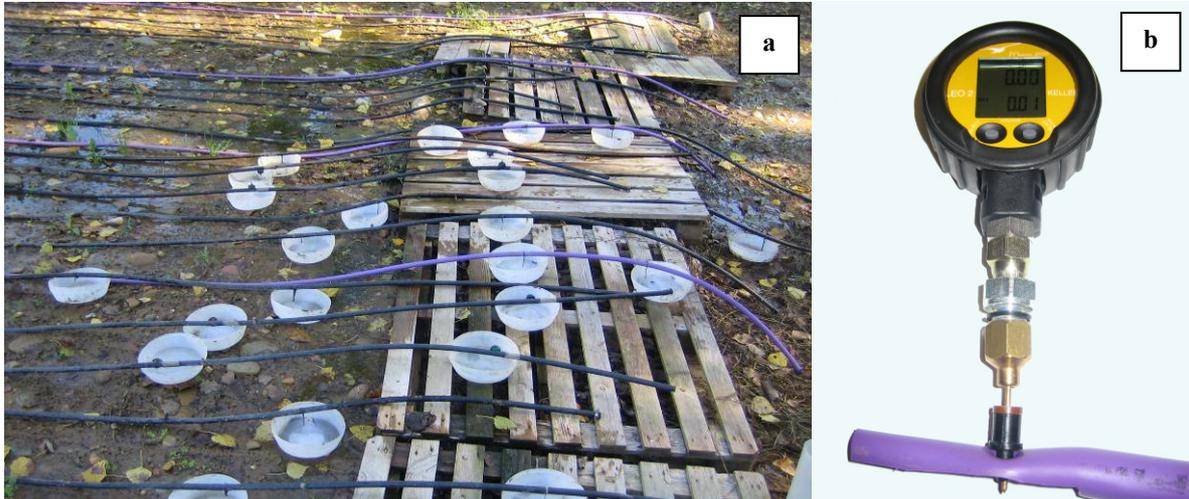


Ilustración 4.7. Proceso de recogida del volumen emitido por los emisores en las pruebas de uniformidad (a) y manómetro digital, adaptador de aguja y toma de presión en una porción de lateral con emisores UN (b).

En los emisores no autocompensantes de presión, aquellos en los que el caudal emitido es función de la presión de trabajo del emisor, se corrigió el caudal medido a la presión de campo para obtener un caudal a la presión de referencia. Esta transformación del caudal permitió comparar los caudales sin tener en cuenta la diferencia producida por la diferente presión de trabajo. El cálculo para la transformación que se realizó fue:

$$Q_{P\ norm} = Q_{P\ campo} \cdot \left(\frac{P_{norm}}{P_{campo}} \right)^x \quad 4-XXII$$

donde:

$Q_{P\ norm}$: Caudal emitido a la presión normalizada (100 kPa) (l/h)

$Q_{P\ campo}$: Caudal emitido a la presión medida en campo (l/h)

P_{norm} : Presión normalizada (100 kPa)

P_{campo} : Presión medida en campo (kPa)

x : Coeficiente de descarga de la ecuación característica del emisor (adimensional) (Tabla 4.3)

Se tomaron las medidas de campo para calcular la uniformidad en el ensayo con efluente secundario a las 0, 175, 350, 525, 650, 825 y a las 1000 h de funcionamiento y, con efluente terciario a las 0, 125, 300, 475, 600, 800 y 1000 h de funcionamiento. Para poder comparar entre las horas de los ensayos con los dos efluentes, se utilizó una nomenclatura conjunta para los dos efluentes (Tabla 4.9).

Tabla 4.9. Nomenclatura de la medida de uniformidad de emisión de caudales en función de las horas transcurridas de ensayo.

Medida <i>UE</i> (h de ensayo)		Momento
Secundario	Terciario	
0	0	0
175	125	1
350	300	2
525	475	3
650	600	4
825	800	5
1000	1000	6

A partir de los datos medidos en campo se calculó la uniformidad de emisión de caudales (*UE*) para cada unidad y tipo de emisor. Este coeficiente se define como:

$$UE = \frac{q_{25}}{\bar{q}} \cdot 100 \quad 4\text{-XXIII}$$

donde:

UE : uniformidad de emisión de caudales (%)

*q*₂₅ : caudal medio del 25 % de los emisores que proporcionan un menor caudal (l/h)

\bar{q} : caudal medio de todos los emisores muestreados (l/h)

4.16.2. Porcentaje de emisores completamente obturados

Se determinó para cada efluente, sistema de filtración, emisor y localización, el porcentaje de emisores completamente obturados con la siguiente ecuación:

$$n_{ic} = \frac{n_c}{n^o} \cdot 100 \quad 4\text{-XXIV}$$

donde:

*n*_{ic} : porcentaje de emisores completamente obturados (%)

*n*_c : recuento de emisores completamente obturados

n^o : recuento de emisores controlados

4.16.3. Porcentaje de caudal inicial

Se calculó el porcentaje de caudal inicial emitido por los goteros a lo largo de los dos ensayos. Con esta medida se refleja la variación porcentual en la emisión del caudal respecto el caudal emitido por el emisor en la fase inicial del ensayo. Este valor de caudal emitido por cada tipo de emisor, en función del sistema de filtración y efluente utilizado, en los distintos momentos de muestreo se calculó como:

$$q_{po} = \left(\frac{q_{emisor}}{q_o} \right) \cdot 100 \quad 4\text{-XXV}$$

siendo:

q_{po} : caudal emitido por el emisor en un momento de muestreo en relación al caudal emitido al inicio del ensayo (%)

q_{emisor} : caudal emitido por el emisor en un momento de muestreo durante el ensayo (l/h)

q_o : caudal emitido por el emisor al inicio del ensayo (l/h)

4.16.4. Uniformidad de presiones

Se determinó la uniformidad de presiones (U_p) de la subunidad de riego como:

$$U_p = \left(\frac{p_{25}}{\bar{p}} \right)^x \cdot 100 \quad 4\text{-XXVI}$$

donde:

U_p : uniformidad de presiones (%)

p_{25} : presión media del 25 % de los puntos que presentaron una menor presión (kPa)

\bar{p} : presión media de todos los puntos muestreados (kPa)

x : coeficiente de descarga de la ecuación característica del emisor (adimensional)

Para los emisores no compensantes de presión se tomó el coeficiente de descarga proporcionado por el fabricante, mientras que para los emisores autocompensantes de presión se escogió el valor de $x = 0.05$ después de la búsqueda en la bibliografía de los exponentes encontrados experimentalmente por distintos autores (Chica, 1999; Kirnak *et al.*, 2004; Dehghanisani *et al.*, 2004, 2005; Cararo *et al.*, 2006) en emisores autocompensantes.

4.17. Relación entre el caudal del lateral medido con un caudalímetro electromagnético y el estimado a partir de las medidas de campo

El sistema SCADA estuvo registrando cada minuto el caudal de entrada a cuatro laterales provistos del emisor UN ubicados en los cuatro sistemas de filtración. De estos datos se eliminaron los que coincidieron con los lavados de los filtros y se obtuvieron las medias representativas para cada 10 h de funcionamiento.

El caudal del lateral se expresó como porcentaje del caudal inicial, considerando éste como el caudal medio de las primeras 10 h de riego en los ensayos.

También se buscó el grado de relación que había entre la medida del caudal realizada con el medidor de caudal electromagnético y la que se podía estimar a partir de las medidas de caudal realizadas para la medición de la *UE*.

Para la estimación del caudal del lateral a partir de los datos de campo, en cada momento de muestreo, se utilizó la siguiente ecuación:

$$Q_{lat\ est} = 54.25 \cdot (q_{e\ in} + q_{e\ 1/3} + q_{e\ 2/3} + q_{e\ fin}) \quad 4-XXVII$$

siendo:

$Q_{lat\ est}$: caudal del lateral estimado (l/h)

$q_{e\ in}$: caudal medio de los dos emisores contiguos medidos en campo al inicio del lateral monitorizado (l/h)

$q_{e\ 1/3}$: caudal medio de los dos emisores contiguos medidos en campo en la posición 1/3 de la longitud total del lateral monitorizado (l/h)

$q_{e\ 2/3}$: caudal medio de los dos emisores contiguos medidos en campo en la posición 2/3 de la longitud total del lateral monitorizado (l/h)

$q_{e\ fin}$: caudal medio de los dos emisores contiguos medidos en campo al final del lateral monitorizado (l/h)

El valor 54.25 se obtiene de dividir el número total de emisores del lateral (Tabla 4.3) entre las 4 posiciones de medida a lo largo del lateral. Con este coeficiente se reparte equitativamente la importancia del valor del caudal medido en las distintas posiciones.

Para obtener un valor comparable al caudal del lateral estimado, se extrajo de la base de datos el valor del caudal registrado en la línea monitorizada en el minuto en que se tomó el caudal en las cuatro posiciones del lateral. El valor de caudal se obtuvo de:

$$Q_{lat\ medido} = \frac{Q_{lat\ t\ in} + Q_{lat\ t\ 1/3} + Q_{lat\ t\ 2/3} + Q_{lat\ t\ fin}}{4} \quad 4-XXVIII$$

donde:

$Q_{lat\ medido}$: caudal del lateral monitorizado, registrado por el SCADA (l/h)

$Q_{lat\ t\ in}$: caudal del lateral monitorizado, registrado por el SCADA en el minuto de muestreo de los emisores del inicio del lateral (l/h)

$Q_{lat\ t\ 1/3}$: caudal del lateral monitorizado, registrado por el SCADA en el minuto de muestreo de los emisores de la posición de 1/3 de la longitud del lateral (l/h)

$Q_{lat\ t\ 2/3}$: caudal del lateral monitorizado, registrado por el SCADA en el minuto de muestreo de los emisores de la posición de 2/3 de la longitud del lateral (l/h)

$Q_{lat\ t\ fin}$: caudal del lateral monitorizado, registrado por el SCADA en el minuto de muestreo de los emisores del final del lateral (l/h)

4.18. Comportamiento del caudal emitido por un lateral y por el conjunto de los laterales

También se registró el caudal filtrado por cada sistema de filtración y tipo de efluente en cada minuto de los ensayos. De este caudal se eliminaron aquellos valores que coincidieron temporalmente con los lavados de los filtros y se obtuvieron las medias representativas por cada 10 h de funcionamiento. El caudal del sistema de filtración se expresó como porcentaje

del caudal inicial, siendo éste el caudal medio de las 10 primeras horas de riego en los ensayos.

4.19. Relación entre la uniformidad de presión medida manualmente con la del SCADA

El sistema SCADA también registró, en cada minuto del ensayo, la presión en los cuatro puntos de control de los cuatro laterales monitorizados con emisor UN ubicados en los cuatro sistemas de filtración. De estos datos se extrajeron los que coincidieron con los lavados de los filtros y se obtuvieron las medias representativas de cada 10 h de funcionamiento.

También se analizó el grado de relación entre la medida de la presión obtenida con el transductor de presión y la medida realizada al determinar la uniformidad de presión registrada con el manómetro digital en el mismo tiempo.

4.20. Lavado por arrastre de los laterales de riego

Una vez finalizado el ensayo con efluente terciario, el día 6 de octubre de 2006 se procedió a realizar un lavado de los laterales. Entre el día de la finalización del ensayo (1 de octubre de 2006) y el día del lavado de los laterales se continuó regando 4 h diarias.

Para efectuar el lavado de los laterales se abrió el final de los laterales de dos subunidades de riego y se dejó circular el agua en salida libre durante 10 minutos. Transcurridos los 10 minutos, se paró el bombeo, se taparon las salidas abiertas de las dos subunidades lavadas, se abrieron los laterales de las dos subunidades que quedaban por lavar y se dejó circular el agua 10 minutos en salida libre.

Para conocer la velocidad de lavado del final de los laterales, durante el proceso de lavado se recogió en una probeta graduada un volumen de agua de lavado durante un tiempo fijado. Se calculó la velocidad del agua según la siguiente ecuación:

$$v_{lav\ lat} = \frac{V_{lav\ lat}}{10 \cdot t \cdot S_{lat}} \quad 4-XXIX$$

donde:

$v_{lav\ lat}$: velocidad del agua durante el lavado del lateral (m/s)

$V_{lav\ lat}$: volumen recogido de agua de lavado (l)

t : tiempo de recogida del volumen (s)

S_{lat} : sección del lateral según las características de los laterales descritas en la Tabla 4.3. (dm²)

La velocidad del agua de lavado con la que se trabajó en el presente estudio estuvo comprendida entre 0.45 y 0.80 m/s y siempre por encima de la mínima recomendada de 0.3 m/s, tal y como se presenta en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10. Velocidad del agua de lavado al final de los distintos tipos de laterales.

	Lateral con gotero					
	UN	RM	P2	P8	TO	TI
Velocidad de lavado (m/s)	0.45	0.60	0.69	0.41	0.65	0.80

Los emisores UN y P8 fueron los que se lavaron con una menor velocidad porque fueron los que consumían un mayor caudal y presentaban una mayor pérdida de presión. Por lo contrario, el emisor TI, fue el que se lavó con una mayor velocidad.

Después de realizar el lavado y con la finalidad de evaluar la incidencia del lavado de los laterales se tomaron los volúmenes emitidos y las presiones en los puntos más desfavorables de control descritos en la metodología del apartado 4.16.1 y se compararon con los valores del final del ensayo con efluente terciario.

4.21. Observación del material

Al final del ensayo con efluente secundario y después del lavado de los laterales del ensayo con efluente terciario, se tomaron muestras de los emplazamientos con los emisores integrados y de los goteros insertados del inicio y del final del lateral para su posterior observación. Además, otra muestra de los emisores después de ser utilizados con el efluente secundario fue analizada por el Departamento de Agricultura de Netafim.

Durante el proceso de lavado por arrastre de los laterales después de la realización del ensayo con efluente terciario se recogieron muestras del agua de salida y se conservaron en un frigorífico para su posterior observación.

4.21.1. Observación de los emisores

En primer lugar, se realizó una observación exterior del emisor en su emplazamiento en el lateral examinando el punto de entrada del agua en el gotero y, en su caso, el filtro que lo protege. Seguidamente se procedió a la observación interior de los distintos emisores insertados e integrados. Para ello se cortaron longitudinalmente los emisores integrados. Los goteros insertados se desmontaron para examinar su laberinto interior. Se tomaron imágenes del estado de los emisores con una cámara fotográfica Canon Ixus 40 (Nikon Corporation, Tokio, Japón) con una resolución de 4.00 megapixels.

Para cada vista y emplazamiento, se ordenaron los emisores en función de la suciedad presentada y se adjudicó una puntuación numérica del 1 al 4; valorando con un 1 los emisores más limpios y con un 4 los más sucios. De esta manera se obtuvo una valoración numérica del aspecto del interior y exterior de los emisores del inicio y del final de los laterales.

Puesto que en el ensayo con efluente terciario se utilizaron 5 emisores y en el ensayo con efluente terciario se utilizaron 6, las sumas de las puntuaciones para cada posición fueron distintas. Para tener valores comparables, los resultados se ponderaron para que en cada posición se obtuvieran 100 puntos.

4.21.2. Observación de la deposición de los laterales

Los efluentes recogidos durante los lavados de los laterales se observaron con un microscopio electrónico de barrido (SEM, *Scanning Electron Microscopy*) Zeiss DSM 960 A (1994) (Carl Zeiss Electron Optics Division, Oberkochen, Alemania).

El primer paso para la preparación de la muestra era la fijación con glutanaldehído al 2.5 % en una solución tampón de cacodilato sódico 0.1 M. En segundo lugar se deshidrataron las muestras con una gradación creciente de etanol, se filtraron y se secaron por punto crítico (CPD, *Critical Point Dryer*) (Bozzola y Russell, 1998) en un equipo Emitech K850 (EM Integrated Technology, Kent, Reino Unido).

Una vez realizado el secado por punto crítico se prepararon dos muestras. Sobre una base doble adhesiva de carbono se fijó el grumo del filtrado y sobre un portaobjetos metálico se pegó por tres puntos el filtro con plata coloidal.

4.22. Tratamiento estadístico de los datos

4.22.1. Efluente secundario y temperaturas ambientales

Se realizó un análisis de la varianza mediante el procedimiento GLM (General Linear Model) del paquete estadístico SAS (SAS Institute, Cary, NC, EE.UU.) para determinar si existía un efecto del año de ensayo en el valor de las distintas temperaturas ambientales y de los parámetros físico-químicos del efluente secundario medidos en la EDAR. El modelo incluía el año de ensayo como efecto fijo.

4.22.2. Velocidad de filtración y características de la arena del filtro

El efecto del tipo de efluente sobre la velocidad de filtración superficial se analizó mediante el procedimiento GLM del paquete estadístico SAS (SAS Institute, Cary, NC, EE.UU.). El modelo incluía el tipo de efluente, el sistema de filtración y su interacción como efectos fijos. Se aplicó el test de Tukey para la separación de medias en aquellas variables con efectos significativos.

Para determinar si los parámetros descriptores de la arena del filtro (diámetro efectivo y coeficiente de uniformidad) eran diferentes entre los dos ensayos, se aplicó el procedimiento GLM considerando el ensayo como efecto fijo. Este mismo procedimiento también se usó para determinar el efecto de la utilización durante 1000 horas de riego en los mismos parámetros descriptivos de la arena del filtro. En este caso el modelo incluía como efecto fijo dicha utilización.

4.22.3. Efluente de entrada a los sistemas de filtración y su variación en los filtros

El análisis de la varianza también fue utilizado para determinar si había diferencias significativas en los parámetros físico-químicos y de partículas a la entrada de los distintos sistemas de filtración utilizados. El modelo incluyó el sistema de filtración como efecto fijo y se aplicó en los dos efluentes por separado. También se determinaron las diferencias en los anteriores parámetros entre los dos efluentes ensayados analizando la varianza. El modelo incluyó el efluente utilizado como efecto fijo.

La correlación entre los parámetros físico-químicos de los dos efluentes se analizó utilizando el procedimiento *Correlation* (CORR) del paquete estadístico SAS (SAS Institute, Cary, NC, EE.UU.). Se utilizó el coeficiente de Pearson para describir el grado de correlación y se estudiaron aquellos casos significativos ($P < 0.05$) con un mayor coeficiente. El procedimiento *Regression* (REG) del mismo paquete estadístico fue utilizado para definir la relación lineal entre la turbidez y los sólidos en suspensión.

Por otro lado, se utilizaron el análisis de la varianza y el test de Tukey para conocer las diferencias entre las reducciones en los distintos parámetros físico-químicos y de partículas conseguidas por los distintos sistemas de filtración. El modelo incluyó el sistema de filtración como efecto fijo y se aplicó a cada efluente por separado. También se aplicó el análisis de la varianza para comparar los resultados obtenidos en dichos parámetros con los sistemas de filtración combinado y de malla en estado obturado y no obturado. En este caso, el modelo incluyó el estado del filtro como efecto fijo y se aplicó por separado a los dos sistemas de filtración.

4.22.4. Ciclo de filtración e índice de filtrabilidad

El análisis de la varianza fue utilizado para determinar los efectos en la duración del ciclo de filtración. El modelo incluyó, como efectos fijos, los sistemas de filtración con cada efluente, y los periodos en el ensayo. Se realizó un test de separación de medias (Tukey) para determinar si había diferencias significativas ($P < 0.05$).

También se utilizó el análisis de la varianza para determinar el efecto del efluente y el sistema de filtración en el índice de filtrabilidad. El modelo incluyó el efluente, el sistema de filtración y la interacción de los dos como efectos fijos. Se realizaron tests de separación de medias para encontrar diferencias significativas ($P < 0.05$) entre los sistemas de filtración para cada efluente y entre los efluentes utilizados para cada sistema de filtración.

El índice de filtrabilidad y las relaciones dimensionales fueron obtenidos por ajuste de los valores experimentales mediante el procedimiento REG del paquete estadístico SAS (SAS Institute, Cary, NC, EE.UU.).

4.22.5. Obturación de los emisores

Se realizó un análisis de la varianza para estudiar detalladamente los factores que afectan en la obturación de los emisores. El modelo incluía como efectos fijos la subunidad de riego, el sistema de filtración, el emisor utilizado, la posición en el lateral y las interacciones entre la filtración y emisor, la filtración y la posición y, el emisor y la posición. No se introdujeron las interacciones triples por su dificultad de interpretación y su baja explicación de la obturación. Se realizaron tests de separación de medias para determinar si había diferencias significativas ($P < 0.05$).

4.22.6. Lavado de los laterales y estimación de la presión y caudal a partir de medidas realizadas con equipos portátiles

También se determinó el efecto del lavado de los laterales en el porcentaje de caudal inicial emitido realizando un análisis de la varianza. Se introdujo en el modelo el lavado, el sistema de filtración, el emisor y sus interacciones dobles y triples como efectos fijos.

Finalmente, se realizó un análisis de la varianza para determinar si había efecto significativo ($P < 0.05$) del método de medida en la obtención del caudal y la presión de los laterales.

5. Resultados y discusión

5.1. Descripción de los efluentes de entrada a los sistemas de filtración

Se caracterizó el efluente suministrado por la estación depuradora a partir del análisis de las muestras tomadas durante los ensayos (apartado 4.8.2) y de los datos de analíticas adicionales (apartados 4.8.3 y 4.8.5).

5.1.1. Caracterización físico-química y de partículas de los efluentes ensayados

En la Tabla 5.1 se presentan los valores medios de pH, conductividad eléctrica (CE), oxígeno disuelto (OD), turbidez, sólidos en suspensión (SS) y número de partículas por unidad de volumen de los efluentes secundario y terciario utilizados en los ensayos. Tal y como se indicó en el apartado 4.8.2, con el efluente secundario se tomaron y analizaron 12 muestras de los 4 sistemas de filtración después de los lavados eficientes y, en el caso del sistema combinado y de malla además, en otras 6 ocasiones, cuando los filtros estaban en régimen obturado. Con el efluente terciario, se tomaron y analizaron 10 muestras de los 4 sistemas de filtración únicamente después de lavados eficientes puesto que no se detectaron lavados ineficientes en los momentos de muestreo. Se midió también la temperatura de los dos efluentes en el momento de muestreo. El rango de temperaturas del efluente secundario osciló entre 19.4 °C y 28.9 °C, mientras que en el efluente terciario osciló entre 19.0°C y 31.0°C. No se observaron diferencias significativas ($P < 0.05$) entre las temperaturas del efluente de entrada a los distintos sistemas de filtración, ni con el efluente secundario ni con el terciario.

Tabla 5.1. Valores medios y desviación estándar de las características físico-químicas del efluente secundario y terciario en la entrada de los distintos sistemas de filtración. Para cada efluente y parámetro, sistemas de filtración con letra distinta indica que existen diferencias significativas ($P < 0.05$).

Efluente	Sistema de filtración	Parámetro						
		pH	CE (dS/m)	OD (mg/l)	Turbidez (FTU)	SS (mg/l)	Partículas /ml	
Secundario	Arena	7.50 ± 0.10	5.41 ± 0.82	2.80 ± 0.54 a	6.76 ± 2.34 a	10.03 ± 3.38	26118 ± 13395	
		Combinado	7.49 ± 0.10	5.47 ± 0.87	2.67 ± 0.58 ab	6.03 ± 2.50 ab	10.59 ± 4.30	28119 ± 16734
	Anillas		7.50 ± 0.09	5.46 ± 0.84	2.77 ± 0.54 a	6.32 ± 2.47 ab	10.46 ± 4.07	27627 ± 14400
		Malla	7.48 ± 0.08	5.41 ± 0.79	2.74 ± 0.63 ab	6.15 ± 2.61 ab	10.02 ± 3.25	27473 ± 17650
	Combinado obturado		7.47 ± 0.07	5.44 ± 0.96	2.61 ± 0.64 b	5.09 ± 1.34 b	7.59 ± 1.72	22505 ± 12204
		Malla obturada	7.46 ± 0.05	5.44 ± 0.96	2.46 ± 0.37 ab	5.28 ± 1.63 b	7.35 ± 1.81	25000 ± 10276
	Terciario		Arena	7.34 ± 0.07	5.11 ± 1.10	1.80 ± 0.18	4.08 ± 2.76	6.49 ± 2.80
		Combinado		7.34 ± 0.07	5.11 ± 1.10	1.80 ± 0.18	4.29 ± 2.86	6.96 ± 3.00
			Anillas	7.34 ± 0.09	5.11 ± 1.10	1.75 ± 0.17	4.02 ± 2.79	6.26 ± 3.01
		Malla		7.34 ± 0.09	5.11 ± 1.10	1.76 ± 0.17	4.02 ± 2.79	6.26 ± 3.01

Los dos efluentes utilizados, según la clasificación de Bucks *et al.* (1979) (ver Tabla 1.2), presentaron un riesgo débil de obturación con relación a los sólidos en suspensión y un riesgo moderado por lo que se refiere al pH.

Se estudió si los parámetros físico-químicos del efluente de entrada variaron en los distintos sistemas de filtración (Tabla 5.1). Con efluente secundario sólo la turbidez y el oxígeno disuelto fueron diferentes ($P < 0.05$) a la entrada de las unidades de filtración, aunque sin diferenciarse estadísticamente en los cuatro sistemas de filtración en estado no obturado. En cambio, sí que se encontraron diferencias significativas ($P < 0.05$) entre los valores de entrada a los filtros en régimen limpio y los valores de entrada al sistema combinado y de malla obturados. Este hecho pudo ser debido a la variabilidad del efluente y al diferente número de muestras tomadas, 6 con los sistemas de filtración embozados y 12 en régimen limpio. Cuando el estudio estadístico se realizaba sin los valores de los sistemas de filtración obturados, no se encontró efecto significativo ($P < 0.05$) del sistema de filtración sobre los parámetros físico-químicos del efluente secundario.

Con el efluente terciario, sólo se encontraron diferencias significativas ($P < 0.05$) en el número de partículas a la entrada. El valor de este parámetro en la entrada del sistema de filtración combinado y con arena, fue significativamente ($P < 0.05$) superior al obtenido en el sistema de filtración por anillas y malla. Este emparejamiento estadístico pudo ser provocado porque el momento de muestreo fue el mismo para las unidades de filtración de anillas y malla, por una parte y, para las unidades de filtración de arena y sistema combinado, por otra, ya que no se varió su emparejamiento a lo largo del ensayo.

Se encontró un efecto significativo ($P < 0.05$) del factor fecha de muestreo en todos los parámetros medidos con los dos efluentes ensayados. Este hecho evidenció la existencia de una variabilidad diaria del efluente en la estación depuradora, tal y como indicaron Nakayama y Bucks (1991) y Tajrishy *et al.* (1994). La razón por la cual esta variabilidad diaria no afectó a la diferenciación estadística del agua de entrada a los filtros sin obturar, excepto en el número de partículas con efluente terciario, fue consecuencia de la rotación programada en la distribución horaria del funcionamiento que se realizó durante la ejecución de los ensayos (ver apartado 4.8.1).

En la Tabla 5.2 se presentan la desviación típica de la media de las medias diarias y la media de las desviaciones típicas en los días muestreados de los parámetros físico-químicos medidos en los dos efluentes.

Tabla 5.2. Variación horaria y diaria de los parámetros físico-químicos medidos en los efluentes ensayados.

Efluente	Estadístico	Parámetro					
		<i>pH</i>	<i>CE</i> (dS/m)	<i>OD</i> (mg/l)	<i>Turbidez</i> (FTU)	<i>SS</i> (mg/l)	<i>Partículas</i> /ml
Secundario	<i>Desviación típica de la media de medias diarias</i>	0.09	0.72	0.60	2.35	3.58	13076
	<i>Media de desviaciones típicas diarias</i>	0.05	0.05	0.17	0.81	2.15	8664
Terciario	<i>Desviación típica de la media de medias diarias</i>	0.08	1.01	0.16	2.69	2.90	24839
	<i>Media de desviaciones típicas diarias</i>	0.05	0.08	0.06	0.21	0.71	9899

Se observa que en los efluentes ensayados había una mayor variación entre los días de muestreo que entre las horas del día de muestreo al ser la desviación típica de la media de medias diarias superior a la media de las desviaciones típicas medias. De estos resultados se extrae la importancia que todas las unidades funcionaran todos los días más que en todas las horas del día.

5.1.2. Comparación del efluente secundario del año 2005 con el del año 2006

Debido a que los ensayos con efluente secundario y terciario se realizaron en dos años diferentes, 2005 y 2006 respectivamente, se realizó un estudio comparativo de algunos de los parámetros físico-químicos del efluente secundario suministrado por la estación depuradora en estos dos años. En la Tabla 5.3 y en la Tabla 5.4 se presentan las medias mensuales con la desviación típica de algunos de los parámetros físico-químicos del efluente secundario medidos por los responsables del funcionamiento de la EDAR de Celrà durante los distintos periodos en los que se realizaron los ensayos.

Tabla 5.3. Medias mensuales, media del periodo de ensayo y desviaciones típicas de algunos de los parámetros físico-químicos del efluente secundario del año 2005 y del 2006. Para cada periodo y parámetro, año con letra distinta indica que existen diferencias significativas ($P < 0.05$).

Periodo	Año	Parámetro físico-químico		
		SS (mg/l)	DQO (mg O ₂ /l)	CE (dS/m)
Abril	2005	15.00 ± 4.69 b	57.60 ± 29.03	4.85 ± 0.60
	2006	39.75 ± 17.63 a	112.07 ± 22.23	5.88 ± 0.82
Mayo	2005	17.14 ± 5.11 b	99.20 ± 57.20	4.28 ± 0.86 b
	2006	40.67 ± 5.86 a	140.80 ± 19.98	8.58 ± 3.42 a
Junio	2005	23.89 ± 2.37	100.11 ± 24.07	-
	2006	32.33 ± 3.21	89.60 ± 22.17	6.37 ± 0.21
Julio	2005	17.70 ± 4.41 b	60.77 ± 37.85	4.87 ± 0.50
	2006	38.50 ± 4.95 a	86.40 ± 0.00	6.63 ± 0.55
Agosto	2005	13.25 ± 4.35	61.87 ± 47.06	4.32 ± 0.80
	2006	27.71 ± 7.79	108.80 ± 35.75	5.56 ± 1.63
Septiembre	2005	-	-	-
	2006	26.67 ± 7.51	115.20 ± 0.00	4.80 ± 1.25
Ensayo	2005	17.23 ± 5.43 b	75.19 ± 44.23 b	4.60 ± 0.71 b
	2006	31.03 ± 9.80 a	109.65 ± 28.32 a	6.15 ± 1.81 a

En todos los meses en que se realizaron los ensayos, el valor de los SS del efluente secundario fue mayor en el año 2006 que en 2005. Igualmente, la media de los SS a lo largo de todo el ensayo en 2006 fue significativamente ($P < 0.05$) superior a la del año 2005. Esto significa que el efluente secundario del año 2006, del cual se partía para realizar el tratamiento terciario, tenía una concentración de SS un 80 % superior al del efluente secundario del año 2005, año en que se realizó el ensayo con efluente secundario.

La DQO también presentó unos valores mayores en el año 2006 que en el 2005 en casi todos los meses y esto se reflejó en la comparación de la media, dando un valor significativamente ($P < 0.05$) más grande en el 2006 que en el 2005. Estos valores indican que el efluente del año 2006 tenía una mayor carga orgánica, que de media, provocó un 46 % más de consumo de oxígeno para la completa oxidación de las sustancias oxidables.

La CE también fue mayor en todos los meses del año 2006. La media del ensayo del 2006 fue significativamente superior a la media obtenida en 2005.

Tabla 5.4. Medias mensuales, media del periodo de ensayo y desviaciones típicas de algunos de los parámetros químicos medidos del efluente secundario del año 2005 y del 2006. Para cada periodo y parámetro, año con letra distinta indica que existen diferencias significativas ($P < 0.05$).

Periodo	Año	Parámetro químico			
		N_{total} (mg/l)	$N(NH_4^+)$ (mg/l)	$N(NO_3^-)$ (mg/l)	P_{total} (mg/l)
Abril	2005	12.35 ± 6.00	2.43 ± 1.64	5.86 ± 3.10	5.78 ± 2.09
	2006	21.50 ± 13.77	3.62 ± 1.21	5.68 ± 1.32	4.60 ± 0.68
Mayo	2005	17.80 ± 1.64	1.78 ± 0.96	2.77 ± 1.64	6.45 ± 1.74
	2006	28.67 ± 14.01	2.76 ± 0.42	4.00 ± 0.56	5.37 ± 1.07
Junio	2005	14.50 ± 10.02	1.54 ± 1.54	2.67 ± 0.74	5.67 ± 2.55
	2006	15.00 ± 0.00	1.78 ± 1.50	1.30 ± 0.98	4.63 ± 0.50
Julio	2005	11.67 ± 5.72	3.70 ± 2.49	1.67 ± 0.62	4.94 ± 1.26
	2006	17.50 ± 9.19	2.20 ± --	2.60 ± 3.25	3.85 ± 0.64
Agosto	2005	24.00 ± 14.14	0.97 ± 0.89	2.61 ± 0.52	5.25 ± 0.67
	2006	24.57 ± 10.15	2.55 ± 0.76	3.44 ± 2.09	3.99 ± 1.03
Septiembre	2005	-	-	-	-
	2006	20.67 ± 4.51	13.08 ± 8.28	1.80 ± 0.97	3.07 ± 1.04
Ensayo	2005	14.56 ± 7.25 <i>b</i>	2.11 ± 1.79 <i>b</i>	3.10 ± 2.15	5.57 ± 1.75 <i>a</i>
	2006	22.09 ± 9.95 <i>a</i>	4.16 ± 4.66 <i>a</i>	3.27 ± 2.06	4.23 ± 1.04 <i>b</i>

Por lo que se refiere a los macronutrientes del agua, en 2006 se encontró un 52 % y un 97 % más de nitrógeno total y amoniacal, respectivamente, que en 2005. Los valores de estos valores para los dos años fueron significativamente distintos ($P < 0.05$). Aunque también se presentó una tendencia a valores superiores de nitrógeno nítrico en 2006 que en 2005, estos resultados no se diferenciaron significativamente.

En cambio el valor de fósforo total, a diferencia de los otros parámetros medidos, fue estadísticamente superior ($P < 0.05$) durante el ensayo del año 2005 que en 2006.

5.1.3. Evolución de los parámetros físico-químicos de los efluentes de entrada a los sistemas de filtración

De la Figura 5.1 a la Figura 5.8 se presenta la evolución del pH, conductividad eléctrica, temperatura, oxígeno disuelto, turbidez, sólidos en suspensión y número de partículas por volumen de muestra medido en las muestras tomadas del efluente secundario y terciario durante la realización de los ensayos.

Se observa que el pH de los efluentes secundario y terciario (Figura 5.1) osciló durante los ensayos entre el 7.20 y 7.70. La media en los valores de los momentos de muestreo del efluente secundario fue de 7.50 mientras que la media en los valores de los momentos de muestreo del efluente terciario fue de 7.34. Estos dos valores fueron estadísticamente ($P < 0.05$) diferentes.

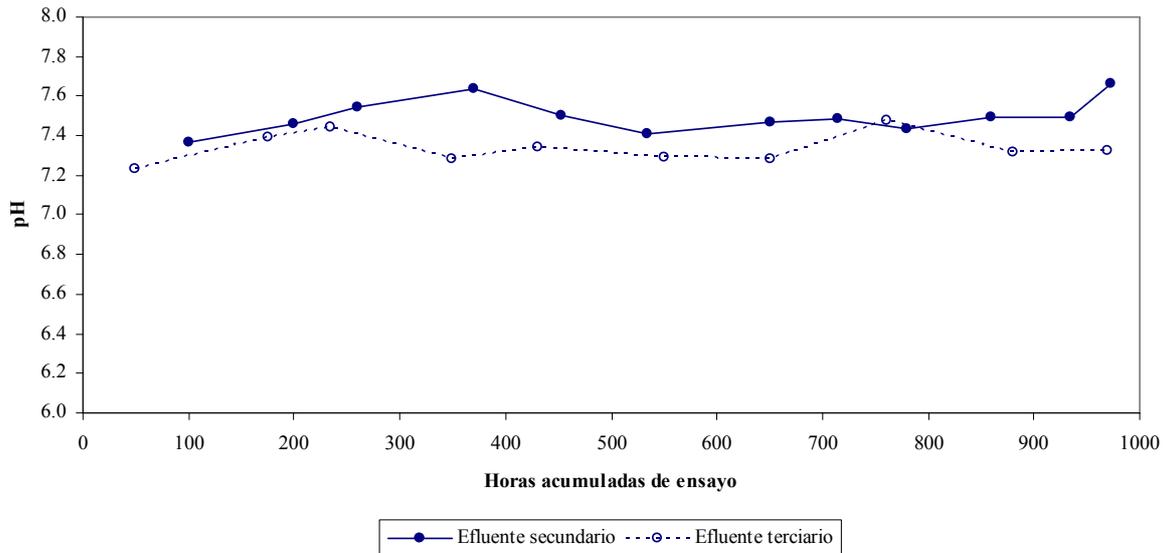


Figura 5.1. Evolución del pH de los efluentes a la entrada de los sistemas de filtración durante los ensayos.

Por lo que se refiere a la evolución de la conductividad eléctrica (Figura 5.2), se pueden relacionar los tres mínimos medidos a las 260, 535 y 780 h de ensayo con efluente secundario con los tres periodos de lluvia registrados entre los días 16 y 17 de mayo de 2005, 11 y 14 de junio de 2005 y 8, 9 y 10 de julio de 2005, respectivamente (Figura 4.4). Estos episodios de precipitación fueron de 51, 15 y 31 mm respectivamente y pudieron provocar una dilución del agua residual de entrada a la estación depuradora y, en consecuencia, una disminución del valor de la conductividad eléctrica. En la evolución de la conductividad eléctrica del efluente terciario, se puede relacionar el mínimo de las 650 h con la precipitación de los días 12, 13 y 15 de agosto de 2006 (Figura 4.4) en los cuales se recogieron 55 mm. El valor medio de conductividad eléctrica obtenido con el efluente secundario (5.43 dS/m) no se diferenció estadísticamente ($P > 0.05$) del valor medio de conductividad eléctrica medido con el efluente terciario (5.11 dS/m). La salinidad en el agua de riego reduce la disponibilidad del agua a las plantas a tal punto que pueden afectar a los rendimientos. Cuando el agua de riego sobrepasa los 3.0 dS/m existe un severo grado de restricción en el uso (Ayers y Westcot, 1985). Durante los ensayos con los efluentes secundario y terciario los valores de la CE permanecieron entre 2 y 8 dS/m. Rhoades *et al.* (1992) definieron las aguas con una CE entre 2 y 10 dS/m como aguas de moderada salinidad dentro de la clasificación de las aguas salinas para la producción de cultivos y con posibilidades de ser utilizadas por algunos cultivos, dependiendo de la salinidad del extracto saturado del suelo.

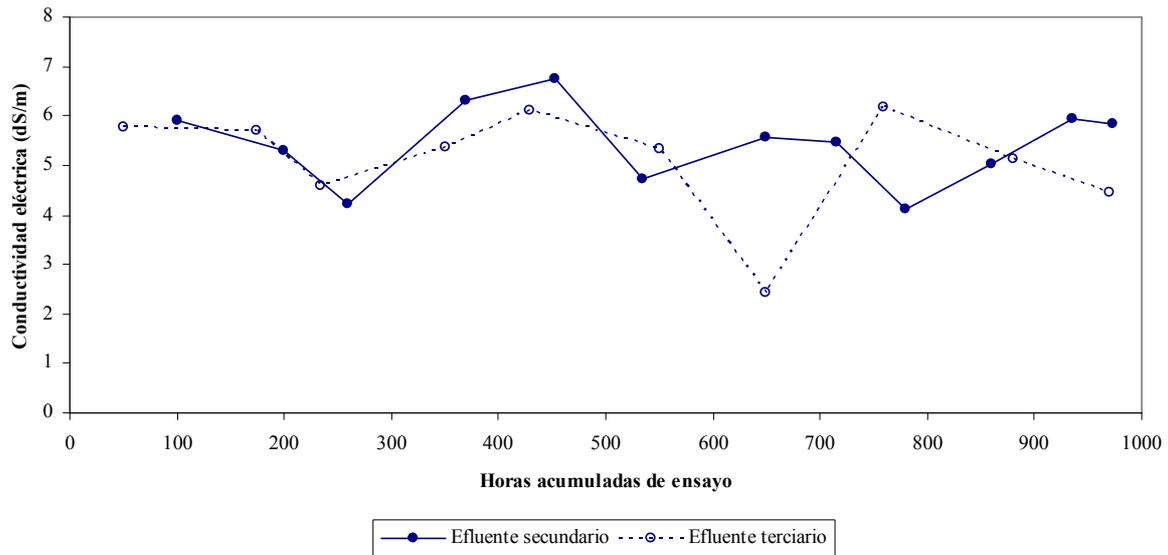


Figura 5.2. Evolución de la conductividad eléctrica de los efluentes a la entrada de los sistemas de filtración durante los ensayos.

La temperatura de los efluentes a la entrada a los sistemas de filtración (Figura 5.3) fue superior a los 25 °C entre las 535 y 935 h en el ensayo con efluente secundario y entre las 235 h y las 550 h en el ensayo con efluente terciario. Estos dos periodos, comprendidos entre finales de junio y principio de agosto (Figura 4.9), coincidieron con los periodos con las más altas temperaturas ambientales registradas durante los ensayos (Figura 4.2 y Figura 4.3). No se halló diferenciación estadística ($P < 0.05$) entre la media de la temperatura del efluente secundario (24.8 °C) y la del terciario (24.3 °C).

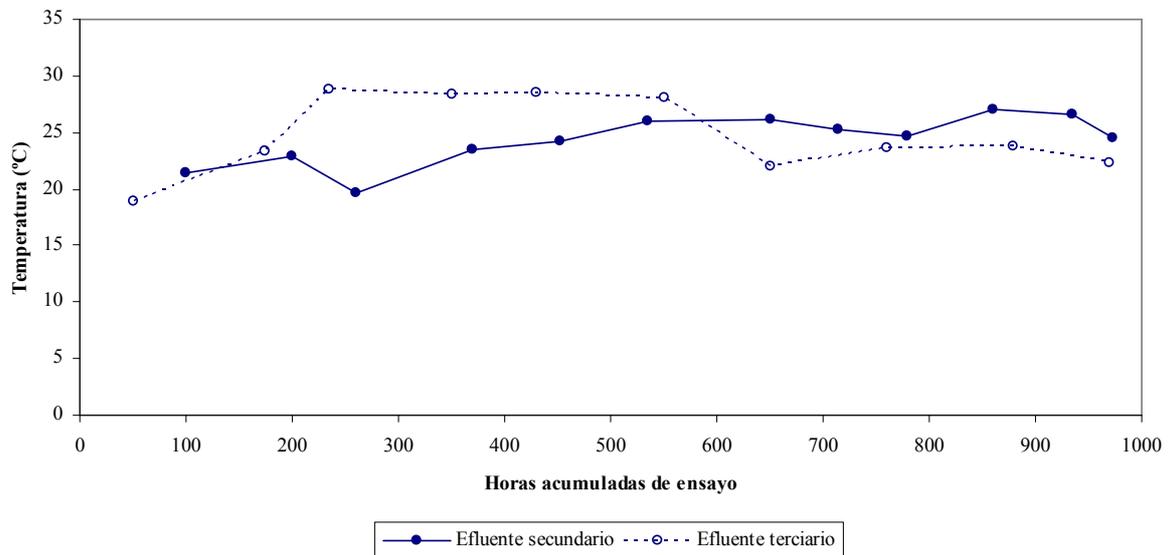


Figura 5.3. Evolución de la temperatura de los efluentes a la entrada de los sistemas de filtración durante los ensayos.

La concentración de oxígeno disuelto medida en el efluente terciario fue más baja y regular durante todo el ensayo que la medida en el efluente secundario (Figura 5.4). Durante el ensayo con efluente secundario este parámetro evolucionó a la baja, siendo la media 2.79 mg/l

y significativamente ($P < 0.05$) superior a la media obtenida durante el ensayo con efluente terciario (1.78 mg/l). Estos resultados indican que la contaminación orgánica fue mayor en el efluente terciario que en el secundario. Esta diferencia en el OD de los efluentes se puede explicar por la variabilidad del efluente secundario. Como se ha presentado en el apartado 5.1.2 en el año 2006, cuando se realizó el ensayo con efluente terciario, el efluente secundario obtuvo una DQO un 46% mayor a la obtenida en el año 2005, cuando se desarrolló el ensayo con efluente secundario.

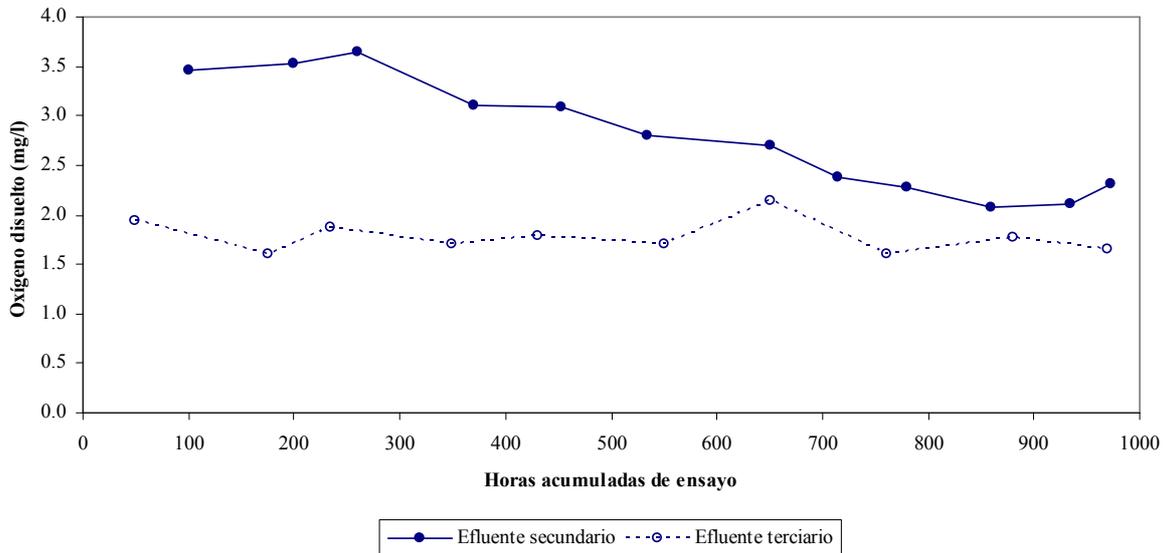


Figura 5.4. Evolución del oxígeno disuelto de los efluentes a la entrada de los sistemas de filtración durante los ensayos.

En la Figura 5.5 se presenta la demanda química de oxígeno del efluente secundario. Este valor fue medido en el laboratorio de la estación depuradora y representa el grado de contaminación del agua por materia orgánica. Los valores de la DQO del efluente secundario del año 2005 oscilaron entre 50 y 200 mg O_2 /l. Trooien y Hills (2007) indicaron que la contaminación orgánica de los efluentes secundarios se podría filtrar en el caso que estuviera en forma de sólidos en suspensión, mientras que si estuviera en forma de sólidos disueltos (no medidos en este ensayo), la eliminación sería más difícil y costosa. Estos autores también indicaron que las concentraciones de materia orgánica en los efluentes secundarios, no representaban problemas para las plantas.

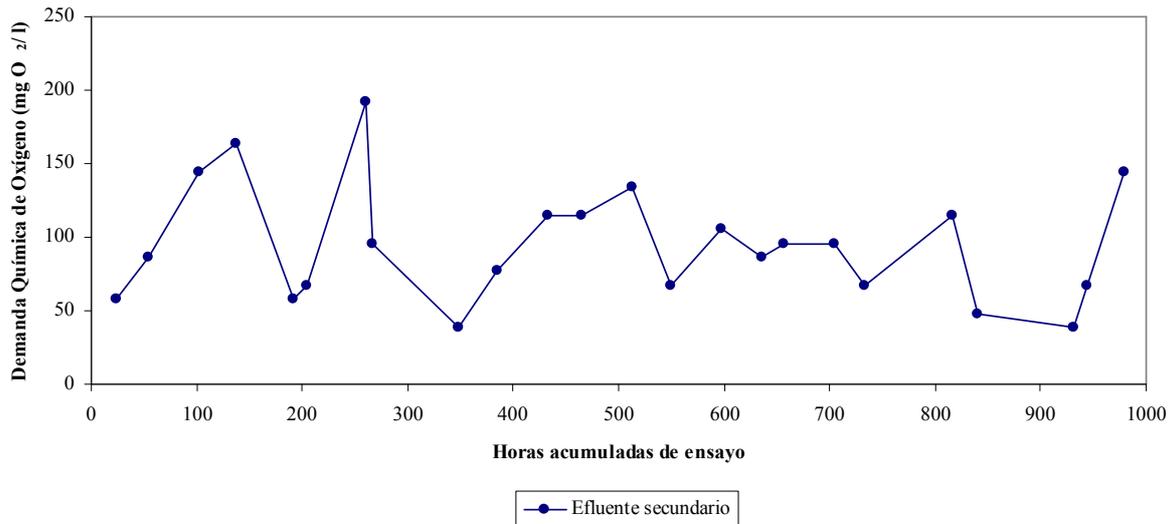


Figura 5.5. Evolución de la demanda química de oxígeno del efluente secundario.

De la comparación entre las evoluciones de la turbidez y los sólidos en suspensión (Figura 5.6 y Figura 5.7), se observa que estos dos parámetros siguieron una evolución cualitativa similar con ambos efluentes. En el apartado 5.1.4 se presentará la relación existente entre estos dos parámetros. No se encontró ninguna relación entre la evolución de la turbidez, sólidos en suspensión y el número de partículas y los eventos de lluvia registrados. El estudio estadístico determinó que el tipo de efluente no tenía un efecto significativo ($P > 0.05$) sobre estos tres parámetros, aunque se observó una tendencia a presentar mayores valores de turbidez y sólidos en suspensión con el efluente secundario y, en cambio, mayor número de partículas con el efluente terciario (Tabla 5.5). En el tratamiento terciario se encontraron un 34 % menos de sólidos en suspensión que en el efluente secundario. Puig-Bargués *et al.* (2005c) encontraron que el efluente terciario contenía un 54 % menos de sólidos en suspensión que el efluente secundario de una estación depuradora con un tratamiento terciario distinto, consistente en una filtración con arena. Con el efluente secundario los valores de turbidez y sólidos en suspensión fueron mayores porque el agua tenía un grado de tratamiento inferior, mientras que el número de partículas fue mayor con el efluente terciario porque el paso del agua por el tratamiento terciario (filtro y rayos ultravioletas, apartado 4.4) pudo provocar este incremento.

Tabla 5.5. Media de la turbidez, sólidos en suspensión y número de partículas durante los ensayos con efluente secundario y terciario. Para cada parámetro, letras distintas indican diferencias significativas ($P < 0.05$).

Efluente	Parámetro		
	<i>Turbidez (FTU)</i>	<i>SS (mg/l)</i>	<i>Partículas/ml</i>
Secundario	6.23 ± 2.25	10.19 ± 3.07	27559 ± 12533
Terciario	4.12 ± 2.79	6.53 ± 2.87	37111 ± 21385

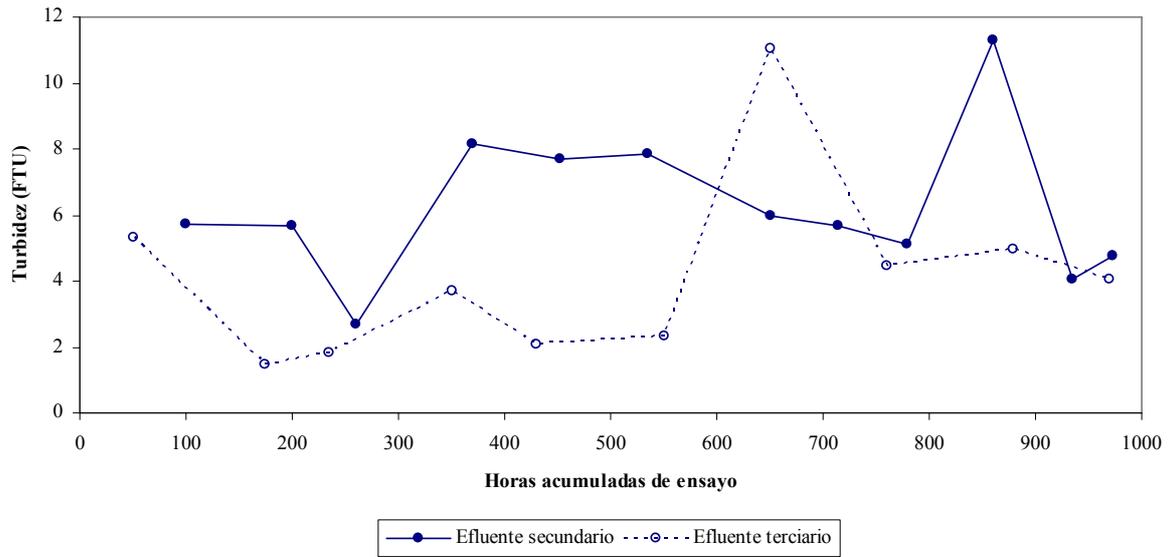


Figura 5.6. Evolución de la turbidez de los efluentes a la entrada de los sistemas de filtración durante los ensayos.

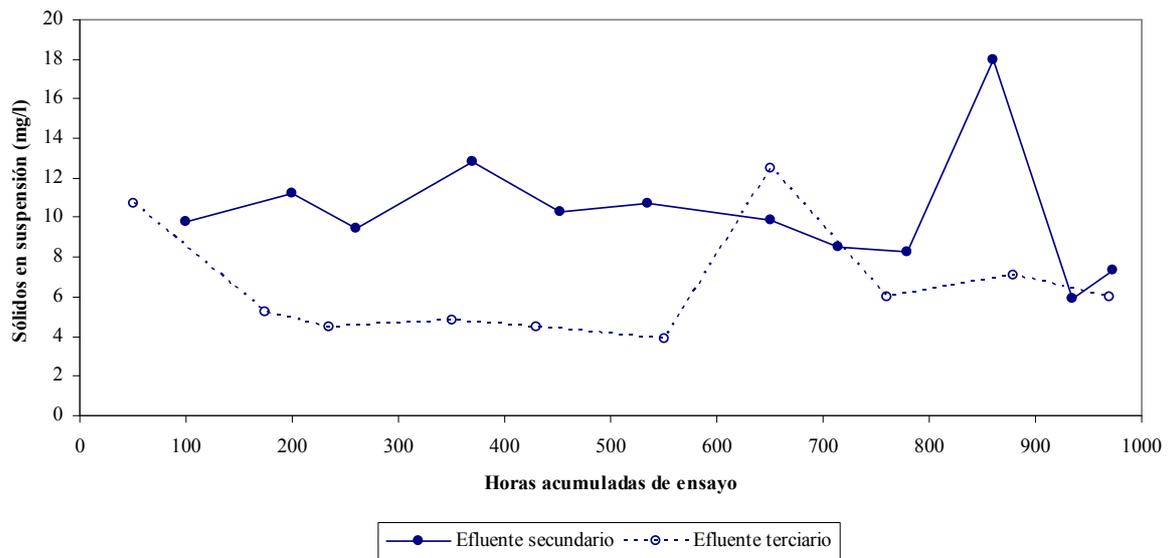


Figura 5.7. Evolución de los sólidos en suspensión de los efluentes a la entrada de los sistemas de filtración durante los ensayos.

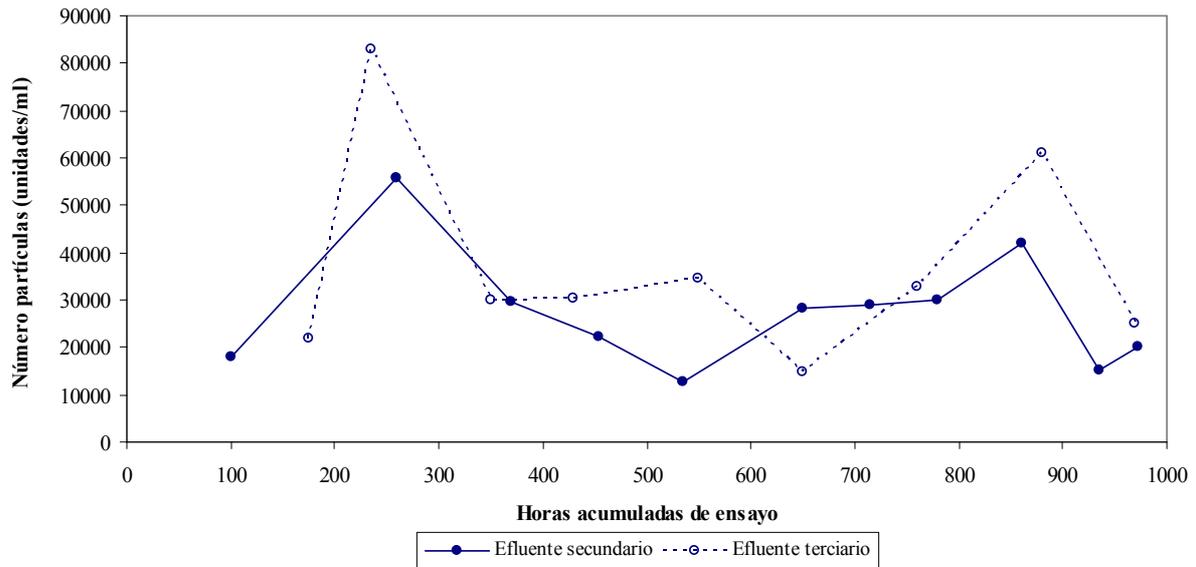


Figura 5.8. Evolución del número de partículas de los efluentes a la entrada de los sistemas de filtración durante los ensayos.

5.1.4. Correlación entre los parámetros físico-químicos de los efluentes ensayados

En la Tabla 5.6 se presentan los valores del índice de correlación de Pearson entre los parámetros físico-químicos del agua de entrada a los filtros para cada efluente ensayado. Los parámetros que obtuvieron un coeficiente de correlación más próximo a 1 y en consecuencia, presentaron mayor grado de correlación entre sí, fueron los sólidos en suspensión y la turbidez, tanto con el efluente secundario como con el terciario, con unos coeficientes de correlación mayores de 0.8 y un nivel de significación de $P < 0.001$. Adin y Elimelech (1989) obtuvieron buenas correlaciones lineales entre la turbidez y los sólidos en suspensión en efluentes procedentes de estaciones depuradoras con procesos de fangos activos. Ribeiro *et al.* (2004) también encontraron buenas correlaciones, aunque no lineales, entre la turbidez y los sólidos en suspensión. Estos mismos autores también hallaron buenas correlaciones entre los sólidos en suspensión y el número de algas por unidad de volumen en efluentes procedentes de un pantano. Por lo que se refiere a la correlación entre otros parámetros, solamente la conductividad eléctrica y la turbidez del efluente terciario obtuvieron un coeficiente de 0.68, mientras que todos los otros coeficientes de correlación de Pearson fueron inferiores a 0.5.

Sorprende también que no se encontrara correlación lineal entre el número de partículas y los sólidos en suspensión. Este hecho ya lo constató Puig-Bargués (2003), quien con efluentes de depuradoras de características de funcionamiento similar a la de este ensayo, apuntó a la posibilidad de que la no correlación fuera debida a la metodología de determinación de las partículas y los sólidos en suspensión. Mientras que los sólidos en suspensión contabilizados fueron los retenidos por un filtro de microfibras de vidrio de $1.2 \mu\text{m}$ de luz de paso, solamente se contabilizaron las partículas mayores de $2 \mu\text{m}$ en el analizador de partículas. El hecho que el mayor número de partículas fuera de diámetro inferior a $5 \mu\text{m}$ pudo aumentar la diferencia entre los resultados de los sólidos en suspensión y los de partículas.

Tabla 5.6. Coeficientes de correlación de Pearson y niveles de significación estadística entre los parámetros físico-químicos del agua de entrada a los filtros para los dos efluentes ensayados.

Secundario		<i>pH</i>	<i>CE</i> (dS/m)	<i>OD</i> (mg/l)	<i>Turbidez</i> (FTU)	<i>SS</i> (mg/l)	<i>Partículas</i> /ml
Terciario	<i>pH</i>						
<i>pH</i>	-		0.18979 (♦)	0.10403 (n.s.)	-0.13679 (n.s.)	-0.09238 (n.s.)	0.14811 (n.s.)
<i>CE</i> (dS/m)	0.33761 (*)		-	0.03165 (n.s.)	0.23429 *	0.07738 (n.s.)	-0.24337 (*)
<i>OD</i> (mg/l)	-0.02615 (n.s.)		0.11830 (n.s.)	-	-0.02144 (n.s.)	0.11836 (n.s.)	0.30486 (**)
<i>Turbidez</i> (FTU)	-0.45839 (***)		-0.68794 (***)	0.01521 (n.s.)	-	0.81289 (***)	-0.17747 (♦)
<i>SS</i> (mg/l)	-0.46624 (***)		-0.39858 (***)	0.22651 (♦)	0.83092 (***)	-	0.01064 (n.s.)
<i>Partículas/ml</i>	-0.02326 (n.s.)		-0.10793 (n.s.)	0.02426 (n.s.)	0.20641 (n.s.)	0.20326 (n.s.)	-

Leyenda: (♦) P<0.10; (*) P<0.05; (**) P<0.01; (***) P<0.001; (n.s.) no significativo

Se ajustó linealmente la turbidez y los sólidos en suspensión y se encontró que la variabilidad de la turbidez explicaba un 94.54 % y un 88.50 % de la variabilidad de los sólidos en suspensión con el efluente secundario y terciario, respectivamente. Los diagramas de los residuos (Figura 5.9) no presentaron estructura, lo que reflejó la bondad del ajuste.

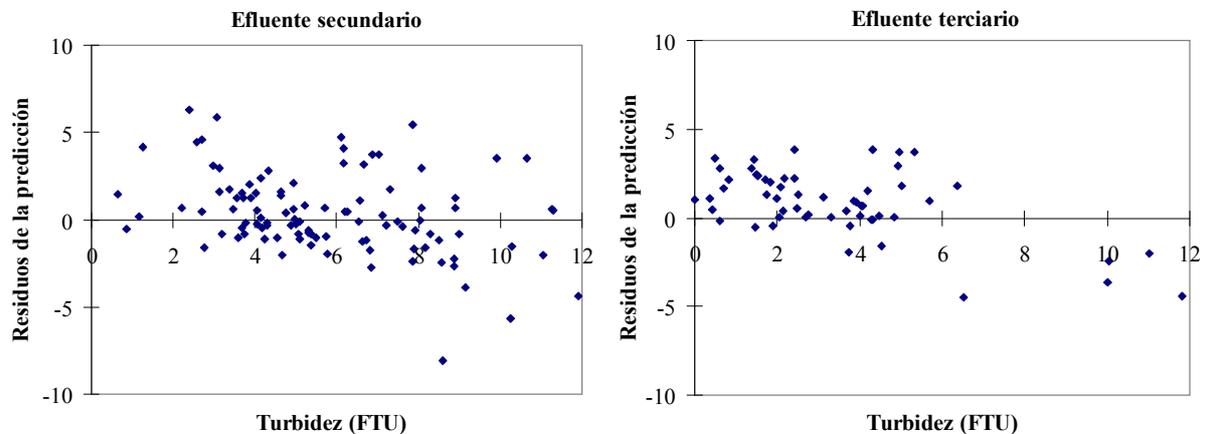


Figura 5.9. Representación de los residuos en el ajuste lineal de la turbidez y los sólidos en suspensión.

La ecuación que relacionaba los sólidos en suspensión a partir de la turbidez del efluente secundario utilizado, con un coeficiente $R^2=0.9454$ y un $P<0.001$, fue:

$$SS = 1.5466 \cdot Tur \tag{5-I}$$

mientras que la ecuación referida al efluente terciario utilizado, con un coeficiente $R^2=0.8850$ y un $P<0.001$, fue:

$$SS = 1.3161 \cdot Tur \tag{5-II}$$

siendo:

SS : sólidos en suspensión (mg/l)

Tur : turbidez (FTU)

Estos resultados concuerdan con los de Adin y Elimelech (1989), quienes utilizando efluente procedente de un sistema de depuración por fangos activos, encontraron una relación lineal entre estos dos parámetros con un coeficiente de correlación de 0.96. Puig-Bargués (2003) en su estudio con distintos efluentes encontró buenas relaciones lineales entre estos parámetros en un efluente terciario de EDAR y en el efluente de una industria cárnica, sin embargo los ajustes no fueron tan buenos en un efluente secundario. Por su parte, Ribeiro *et al.* (2005b) ajustaron la relación entre los sólidos en suspensión y la turbidez a una ecuación exponencial cúbica con un coeficiente R^2 de 0.8961. En los presentes ensayos, el ajustar los datos a esta ecuación, no mejoró la relación presentada.

5.1.5. Distribución de partículas en los efluentes de entrada a los sistemas de filtración

Después de comprobar que no había diferencias significativas ($P > 0.05$) entre la media de la distribución del número de partículas para cada efluente en las entradas de los sistemas de filtración, en la Figura 5.10 se presenta la distribución media del número de partículas de las muestras tomadas de cada efluente. Tampoco se encontró un efecto significativo ($P > 0.05$) del origen del efluente utilizado sobre la media de la distribución del número de partículas (Tabla 5.7).

Tabla 5.7. Media de la distribución del número de partículas para cada efluente ensayado. Efluente con letra distinta indica que existen diferencias significativas ($P < 0.05$).

Efluente	Media de la distribución del número de partículas (μm)
Secundario	3.51 ± 1.18
Terciario	3.03 ± 0.26

Más del 97 % de las partículas del efluente secundario y terciario tenían un diámetro inferior a 10 μm . Estos resultados concuerdan con los de otros autores que trabajaron con efluentes urbanos. En concreto, Puig-Bargués *et al.* (2005a) hallaron que más del 94 % de las partículas eran inferiores a 14 μm , Adin y Elimelech (1989) encontraron que más del 90 % de las partículas tenían un diámetro inferior a 10 μm y Adin (2002) que el 90 % de las partículas eran inferiores a 5 μm y que el 99 % eran inferiores a 10 μm . Como destacaron Adin y Alon (1986) y Puig-Bargués *et al.* (2005a) en sus trabajos, aunque la mayoría de las partículas eran de diámetro inferior al diámetro del orificio de los filtros, éstos continuaban embozándose.

La distribución del número de partículas difirió muy poco entre los dos efluentes (Figura 5.10), pero se observó que había un mayor porcentaje de las partículas más pequeñas (3 μm) en el efluente terciario que en el secundario y que el efluente secundario presentó un porcentaje superior de partículas mayores de 5 μm . Este hecho pudo causar que el efluente procedente del tratamiento terciario tuviera un mayor número de partículas, a pesar de tener una menor concentración de sólidos en suspensión (Tabla 5.5).

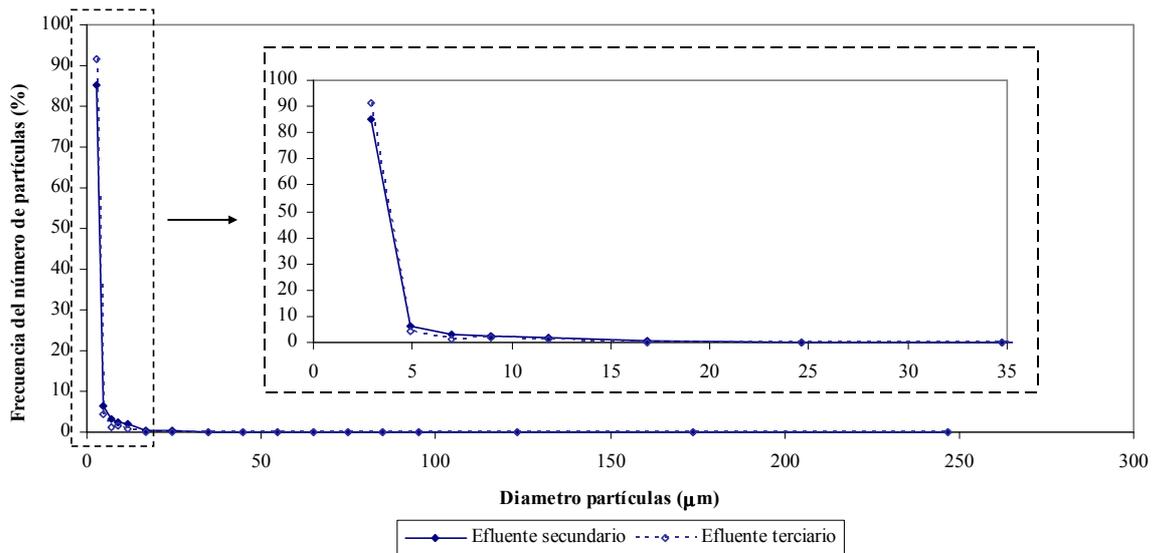


Figura 5.10. Distribución media del número de partículas de los efluentes utilizados.

En la Figura 5.11 se presenta la distribución media del volumen de partículas de las muestras tomadas en la entrada de todos los sistemas de filtración con los dos efluentes. No se encontraron diferencias significativas ($P > 0.05$) entre los valores en las entradas a los distintos sistemas de filtración utilizados en la mediana de la distribución del volumen de partículas en los dos efluentes. Sin embargo, se determinó que el origen del efluente influyó significativamente ($P < 0.05$) en la mediana de la distribución del volumen de partículas (Tabla 5.8).

Tabla 5.8. Mediana de la distribución del volumen de partículas para cada efluente ensayado. Efluente con letra distinta indica que existen diferencias significativas ($P < 0.05$).

Efluente	Mediana de la distribución del volumen de partículas (μm)
Secundario	24.89 ± 17.14 a
Terciario	13.36 ± 9.81 b

El 90 % del volumen de las partículas de los dos efluentes estaba formado por partículas de diámetro inferior a $70 \mu\text{m}$. Sin embargo, cada efluente presentaba una distribución de volúmenes distinta. El efluente terciario tenía un mayor porcentaje de partículas de diámetro inferior a $16 \mu\text{m}$ que el secundario, y el efluente secundario tenía un mayor porcentaje de partículas de diámetro superior a $24 \mu\text{m}$ que el terciario. La diferencia en la distribución de volúmenes entre los dos efluentes pudo venir influenciada por el filtro del tratamiento terciario o el efecto provocado por los rayos ultravioletas (ver características del tratamiento terciario en el apartado 4.4). La radiación ultravioleta podría haber provocado la muerte de algunos microorganismos del efluente y, junto con el paso del agua por el filtro de anillas podría provocar la disgregación de algunos de los agregados de microorganismos.

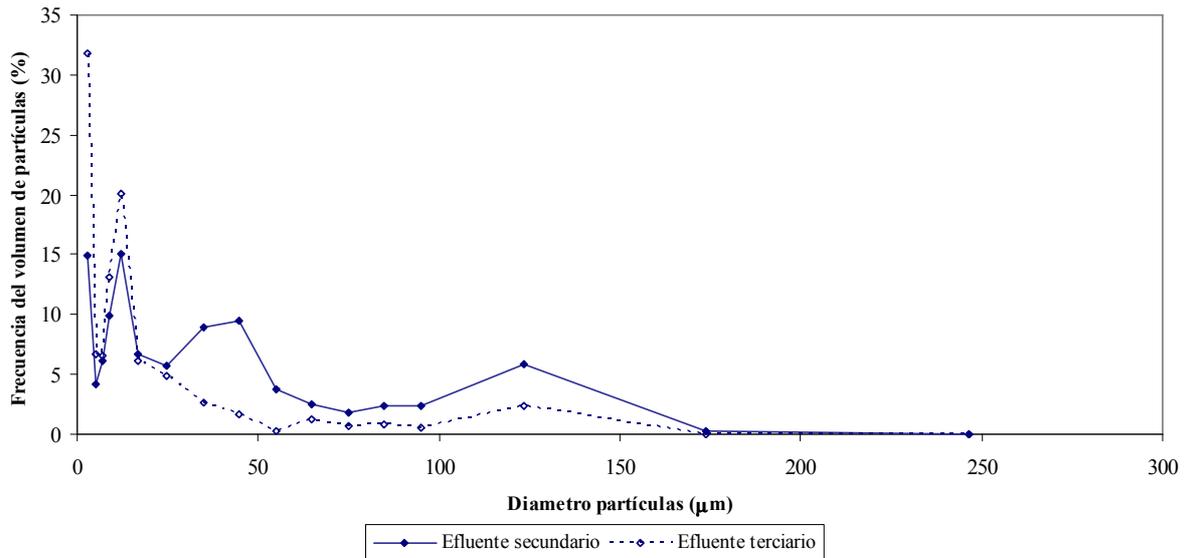


Figura 5.11. Distribución media del volumen de partículas de los efluentes ensayados.

5.1.6. Caracterización microbiológica de los efluentes de entrada a los sistemas de filtración

En la Tabla 5.9 se presentan los valores de los análisis microbiológicos realizados al efluente de la EDAR de Celrà.

Tabla 5.9. Calidad microbiológica de los efluentes de la EDAR de Celrà.

Muestreo	Parámetro		
	<i>Coliformes fecales</i> ufc/100 ml	<i>Aerobios mesófilos</i> ufc/ml (30 °C)	<i>Huevos de nemátodo</i> n° huevos/l
<i>Secundario 2007</i>	12000	130000	20
<i>Terciario 2007</i>	6500	15000	40
<i>Terciario 2006</i>	320	25500	<5

Se encontró una mayor concentración de coliformes fecales y aerobios mesófilos en el efluente secundario que en el efluente terciario, hecho que provocó que el efluente secundario presentara un mayor potencial de obturación biológica. Los huevos de nemátodos se hallaron tanto en el efluente secundario como en el terciario, incluso en una medición en el efluente terciario el recuento superó al realizado en el efluente secundario. De estos valores se extrae que el tratamiento terciario de la depuradora no fue muy eficiente, ya que no garantizaba una reducción de microorganismos a unos niveles suficientemente bajos. Paraskeva y Graham (2005) encontraron en un estudio comparativo de los tratamientos por ozono, rayos ultravioletas y microfiltración en la reducción de microorganismos y su efecto en la calidad sobre efluentes secundarios, que el tratamiento con rayos UV, además de tener una eficiencia proporcional a la dosis de rayos aplicada, no podía garantizar niveles aptos para las legislaciones más exigentes como, por ejemplo, la del Estado de California en los EE.UU. Con los valores de calidad presentados en la Tabla 5.9 este efluente no era apto para los usos urbanos, agrícolas, aunque sí para algunos de los usos industriales, recreativos y ambientales.

5.2. Comportamiento de los sistemas de filtración

5.2.1. Efecto de los sistemas de filtración en la calidad de los efluentes

A partir del muestreo y análisis de los efluentes (apartados 4.8.2 y 4.8.3) se pudieron conocer las variaciones producidas por cada sistema de filtración en los parámetros físico-químicos y en las partículas.

5.2.1.1. Efecto producido en los parámetros físico-químicos

En la Tabla 5.10 se presentan los porcentajes de reducción, calculados con la ecuación 4-II, que efectuaron los distintos filtros utilizados en los parámetros físico-químicos del efluente secundario y terciario.

Tabla 5.10. Reducción de los parámetros físico-químicos del efluente secundario y terciario debido al efecto de los distintos sistemas de filtración. Resultados medios y desviaciones típicas, expresados en porcentaje de reducción del valor de entrada al sistema de filtración. Valores negativos indican aumentos del parámetro. Dentro de cada parámetro y para cada efluente, letras distintas indican diferencias significativas ($P < 0.05$).

Efluente	Sistema de filtración	Parámetro				
		<i>pH</i>	<i>CE</i>	<i>OD</i>	<i>Turbidez</i>	<i>SS</i>
Secundario	Arena	0.25 ±	-0.29 ±	0.49 ±	57.57 ±	47.30 ±
		0.57	0.30	4.59	21.97 a	39.59 a
	Combinado	0.32 ±	-0.28 ±	-0.12 ±	1.69 ±	-0.46 ±
		0.53	0.23	4.45	11.16 b	27.89 b
	Anillas	0.18 ±	-0.37 ±	-1.17 ±	-10.46 ±	-0.40 ±
		0.31	0.47	7.24	13.95 b	17.38 b
	Malla	0.57 ±	-0.16 ±	-2.69 ±	-1.64 ±	-0.19 ±
		1.95	1.03	8.61	15.72 b	22.51 b
Terciario	Arena	-0.08 ±	0.17 ±	-2.24 ±	66.38 ±	66.63 ±
		0.94	1.13	13.59 b	20.23 a	14.22 a
	Combinado	0.43 ±	-0.06 ±	5.07 ±	12.42 ±	8.47 ±
		0.78	0.96	10.00 a	23.53 b	18.36 b
	Anillas	-0.26 ±	-0.32 ±	-2.32 ±	3.86 ±	3.32 ±
		0.59	0.52	8.65 b	24.58 b	31.29 b
	Malla	-0.22 ±	-0.41 ±	0.23 ±	7.14 ±	-2.73 ±
		0.72	0.74	7.83 ab	26.01 b	23.43 b

La reducción de la turbidez y de los sólidos en suspensión con los dos efluentes y del oxígeno disuelto con el efluente terciario, fueron los únicos en los que se observó un comportamiento distinto, estadísticamente significativo ($P < 0.05$), según el sistema de filtración utilizado.

Con el sistema de filtración de arena se redujo un 57.57 % la turbidez del efluente secundario y un 66.38 % la del efluente terciario. Este mismo sistema, también redujo el valor de entrada de los sólidos en suspensión del efluente secundario (47.30 %) y del efluente terciario (66.63 %). Con estas reducciones se obtuvieron unos efluentes con una concentración de sólidos en suspensión inferiores a 10 mg/l, tal y como recomiendan Hamoda *et al.* (2004) después de una filtración con filtro de arena y con un diseño y manejo apropiado. Este comportamiento del filtro de arena, por lo que se refiere a la importante reducción de la turbidez y de los sólidos en suspensión con los dos efluentes, fue significativamente diferente ($P < 0.05$) del comportamiento de los otros sistemas de filtración, los cuales mantuvieron o incluso hicieron aumentar estos parámetros. Tajrishy *et al.* (1994) encontraron reducciones de 2 a 8 mg/l de sólidos en suspensión de un efluente con una concentración inferior a 10 mg/l con un medio

granular que filtraba 600-700 l/m². Adin (1987) encontró reducciones de los sólidos en suspensión del 20 % y del 10 % con filtros de arena que filtraban el agua a 2.2 y 4.4 l/m²/s, respectivamente. En este ensayo la velocidad de filtración del filtro de arena (Tabla 4.2) fue de 6.06 y 5.93 l/m²·s para el efluente terciario y secundario, respectivamente y, no corroboró lo indicado por Adin (1987) que, a menor velocidad de filtración, mayor reducción de sólidos en suspensión. Por otro lado, Haman *et al.*, (1994) publicaron que los medios granulares con diámetros efectivos más pequeños, a igual caudal de filtración, presentaban mayores eficiencias de filtración. En este caso, como se observa en la Figura 4.12, la arena del sistema de filtración antes de ser utilizada, en el ensayo terciario contenía más partículas pequeñas que en el ensayo con efluente secundario, pero después de 1000 h de operación fue la arena del ensayo con efluente terciario la que tenía las partículas más grandes (Tabla 5.18).

El sistema de filtración combinado redujo el oxígeno disuelto en el efluente terciario de entrada un 5 %, diferenciándose estadísticamente (P<0.05) del aumento provocado por los filtros de anillas y de arena. El filtro de malla prácticamente no afectó a este parámetro y no se diferenció estadísticamente del efecto de los otros filtros.

Puig-Bargués *et al.* (2005c) encontraron diferencias de comportamiento entre los filtros de arena y los de anillas y malla utilizando agua residual de muy baja calidad de una industria cárnica. Cuando trabajaron con agua residual urbana procedente del tratamiento secundario, los filtros de anillas, malla y arena no se diferenciaron en la reducción de los sólidos en suspensión y la turbidez. Estas bajas reducciones de sólidos en suspensión obtenidas en los filtros de anillas y malla, coincidieron con las hallaron Nakayama *et al.* (1978), Adin (1987), Adin y Elimelech (1989), Taylor *et al.*(1995) y Ravina *et al.* (1997).

En la Tabla 5.11 se presenta la reducción de los parámetros físico-químicos del efluente secundario de entrada en función del estado de obturación del sistema de filtración combinado y de malla.

Tabla 5.11. Reducción de los parámetros físico-químicos del efluente secundario debido al efecto de los sistemas de filtración obturados y no obturados. Resultados medios y desviaciones típicas, expresados en porcentaje de reducción del valor de la entrada al sistema de filtración. Valores negativos indican aumentos del parámetro. Dentro de cada parámetro y para cada sistema de filtración y estado, letras distintas indican diferencias significativas (P<0.05).

Sistema de filtración	Estado filtro	Parámetro				
		pH	CE	OD	Turbidez	SS
Combinado	No obturado	0.32 ±	-0.28 ±	-0.12 ±	1.69 ±	-0.46 ±
		0.53	0.23	4.45	11.16	27.89
	Obturado	0.23 ±	-0.24 ±	4.63 ±	-11.90 ±	-4.97 ±
		0.61	0.39	10.89	22.22	8.33
Malla	No obturado	0.57 ±	-0.16 ±	-2.69 ±	-1.64 ±	-0.19 ±
		1.95	1.03	8.61	15.72	22.51 a
	Obturado	0.08 ±	-0.20 ±	0.03 ±	-7.31 ±	-13.83 ±
		0.93	0.42	2.12	16.61	9.22 b

Se puede observar que tanto la reducción de la turbidez como la de los sólidos en suspensión fue más negativa con el filtro embozado que sin estarlo, aunque sólo fueron significativas (P<0.05) las diferencias de reducción de los sólidos en suspensión con el sistema de filtración de malla. Esta diferencia en la reducción de los sólidos en suspensión, es indicativa que en el filtro de malla en estado obturado, se liberaron más sólidos en suspensión. La explicación podría estar en la liberación de sólidos en suspensión de la torta de filtración que se generó en

el filtro. El desprendimiento de material retenido por los filtros, ya fue constatado por Adin y Alon (1986) y Puig-Bargués *et al.* (2005a).

5.2.1.2. Efecto producido en las partículas del efluente

Dada su importancia para la reducción de la obturación de los emisores se estudió también el efecto de los distintos sistemas de filtración en la distribución de las partículas de los efluentes.

5.2.1.2.1. Reducción del número total de partículas

En la Tabla 5.12 se presenta el porcentaje de reducción del número de partículas del efluente de entrada calculado con la ecuación 4-II producido en los distintos sistemas de filtración y con las dos aguas ensayadas.

Tabla 5.12. Reducción del número de partículas del efluente secundario y terciario debido al efecto de los distintos sistemas de filtración. Resultados medios y desviaciones típicas, expresados en porcentaje de reducción del valor de entrada al sistema de filtración. Valores negativos indican aumentos del parámetro. Dentro de cada parámetro y para cada efluente, letras distintas indican diferencias significativas ($P < 0.05$).

Efluente	Sistema de filtración	Número de partículas/ml
Secundario	Arena	17.13 ± 52.58
	Combinado	-68.98 ± 158.45
	Anillas	-81.68 ± 204.35
	Malla	-39.17 ± 65.76
Terciario	Arena	6.12 ± 51.63
	Combinado	-23.98 ± 100.91
	Anillas	-38.81 ± 72.59
	Malla	-17.79 ± 95.37

Sólo se redujo el número de partículas del efluente de entrada con el sistema de filtración de arena con ambos efluentes, al igual que lo observado con los sólidos en suspensión (Tabla 5.10), pero sin diferenciarse estadísticamente de los otros sistemas de filtración, los cuales aumentaron, en promedio, el número de partículas. El aumento del número de partículas con el filtro de malla también fue observado por Adin y Alon (1986).

En la Tabla 5.13 se presenta la reducción del número de partículas producida en el efluente secundario por los sistemas de filtración de malla y combinado en estado obturado y régimen limpio.

Tabla 5.13. Reducción del número de partículas del efluente secundario debido al efecto de los sistemas de filtración obturados y no obturados. Resultados medios y desviaciones típicas, expresados en porcentaje de reducción del valor de la entrada al sistema de filtración. Valores negativos indican aumentos del parámetro. Dentro de cada parámetro y para cada sistema de filtración y estado, letras distintas indican diferencias significativas ($P < 0.05$).

Sistema de filtración	Estado filtro	Número de partículas/ml
Combinado	No obturado	-68.98 ± 158.45 b
	Obturado	-15.48 ± 81.83 a
Malla	No obturado	-39.17 ± 65.76
	Obturado	-4.54 ± 65.03

Se observaron menores liberaciones de partículas cuando los filtros de malla y combinado estuvieron en estado obturado, aunque sólo se encontraron diferencias significativas ($P < 0.05$) en el sistema de filtración combinado.

En estado no obturado, estos filtros liberaron mayor cantidad de partículas. Probablemente, cuando los filtros se obturaron, por la formación de la torta de filtración, se pudieron retener partículas de menor tamaño, que son las más numerosas. De todas formas, hubo liberación de sólidos y de otras partículas puesto que esta torta, de naturaleza orgánica y por lo tanto compresible, no debía ser muy estable en las condiciones de presión más elevadas que se producen en el proceso de obturación.

5.2.1.2.2. Distribución del número de partículas

En la Figura 5.12 se presentan los valores de la media de distribución del número de partículas antes y después de filtrar en el efluente secundario y terciario. Solamente el filtro de arena con el efluente secundario provocó una reducción significativa ($P < 0.05$) de este parámetro.

Con el efluente terciario también se observó que el sistema de filtración con arena era el que reducía en un mayor grado la media de la distribución del número de partículas, mientras que los otros sistemas de filtración obtuvieron un valor similar al del efluente de entrada. En este caso, sin embargo, las diferencias entre los valores de salida de los filtros fueron menores y estadísticamente no significativas ($P > 0.05$).

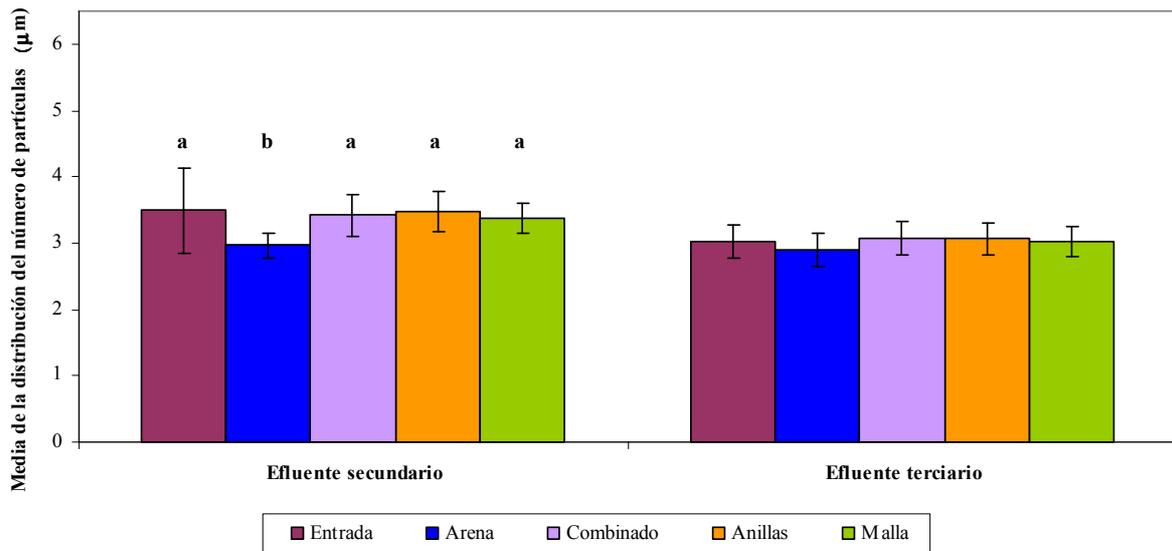


Figura 5.12. Efecto de los diferentes sistemas de filtración en la media de la distribución del número de partículas de los dos efluentes ensayados. Para cada efluente, columnas con letra distinta indican que existen diferencias significativas ($P < 0.05$).

En la Figura 5.13 se presentan los valores de la media del número de partículas del efluente secundario antes y después de filtrarlo con los sistemas de malla y combinado en estado normal y obturado. No se observó ninguna diferencia estadística de comportamiento entre los sistemas obturados y no obturados.

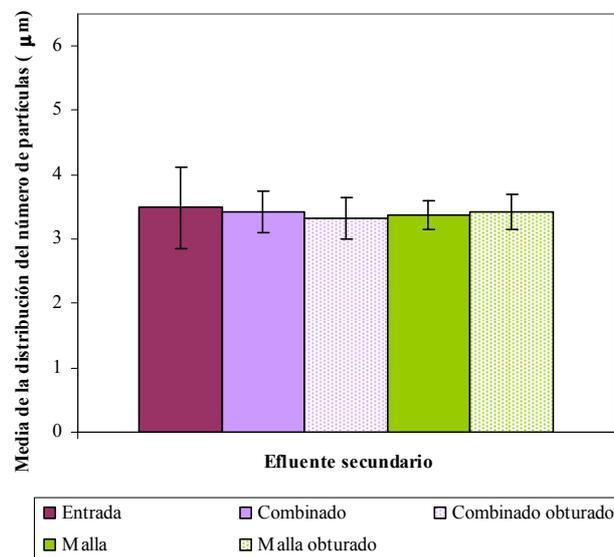


Figura 5.13. Efecto de los sistemas de filtración combinado y malla, en estado obturado y no obturado, en el valor de la media de la distribución del número de partículas del efluente secundario. Para cada efluente, columnas con letra distinta indican que existen diferencias significativas ($P < 0.05$).

En la Figura 5.14 se muestra la distribución del número de partículas según el diámetro del efluente secundario antes y después de ser filtrado. El efluente procedente del filtro de arena fue el que mayor porcentaje de partículas pequeñas ($3 \mu\text{m}$) presentó, incluso más que el efluente de entrada. También fue el que presentó menor porcentaje de partículas de diámetro

superior a 3 μm , incluso inferior que el efluente de entrada. Todos los sistemas de filtración provocaron un aumento del porcentaje relativo de partículas de 3 μm y una disminución de las partículas de 5, 7 y 9 μm . Las partículas a partir de 11 μm , solamente fueron reducidas en porcentaje por el filtro de arena.

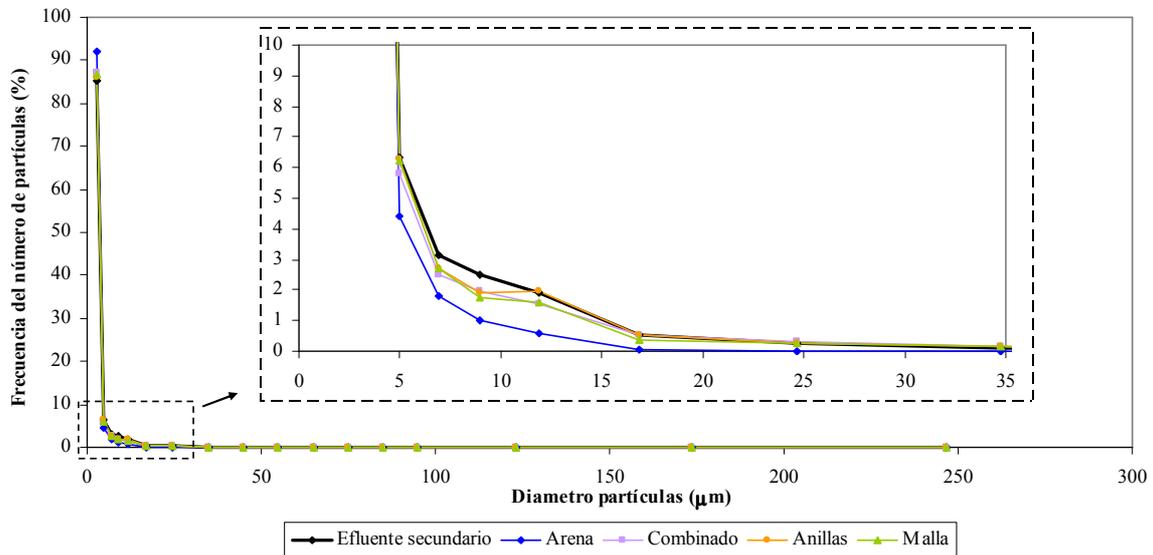


Figura 5.14. Distribución del número de partículas del efluente secundario antes y después de ser filtrado.

En la Figura 5.15 se presentan los valores del número de partículas en función de su diámetro, para el efluente secundario antes y después de filtrarlo con los sistemas de filtración de malla y combinado en régimen limpio y en estado obturado. Los sistemas de filtración hicieron aumentar el porcentaje de partículas de tamaño inferior a 3 μm y no se observó que la distribución de partículas del efluente filtrado fuese distinta en función de si el sistema de filtración estaba en régimen obturado o no.

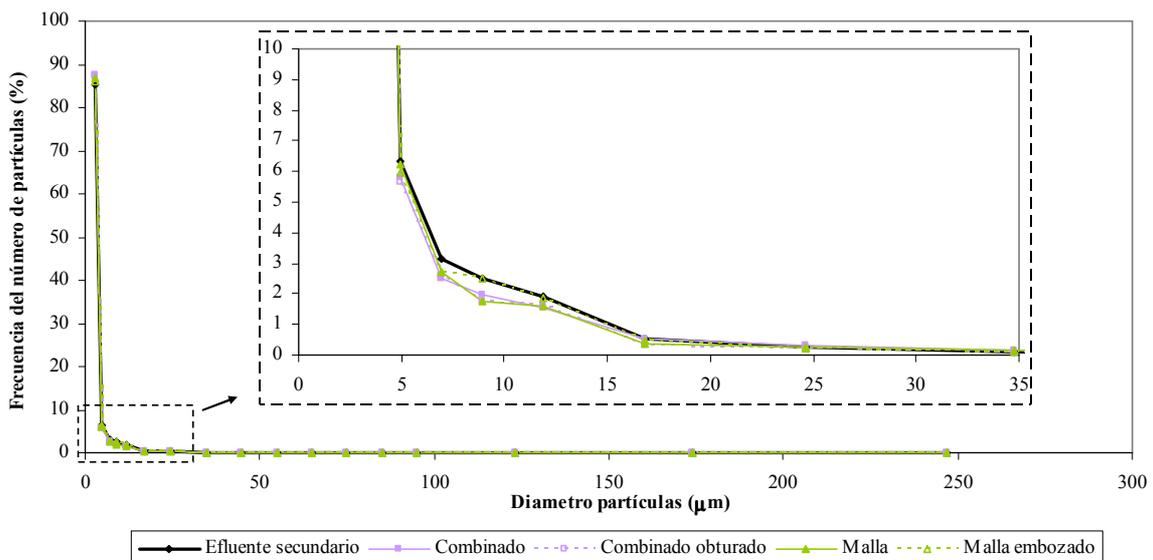


Figura 5.15. Distribución del número de partículas del efluente secundario antes y después de ser filtrado por los sistemas de filtración combinado y malla en estado obturado y no obturado.

En la Figura 5.16 se presenta la distribución del número de partículas en función de su diámetro para el efluente terciario antes y después de ser filtrado. El filtro de arena con el efluente terciario se comportó igual que con el secundario: el agua filtrada presentó mayor porcentaje de partículas pequeñas ($3 \mu\text{m}$) que la de entrada y la filtrada por los otros sistemas de filtración y, presentó un menor porcentaje de partículas de tamaño superior a $3 \mu\text{m}$ que el efluente de entrada y que el agua filtrada por los demás sistemas de filtración.

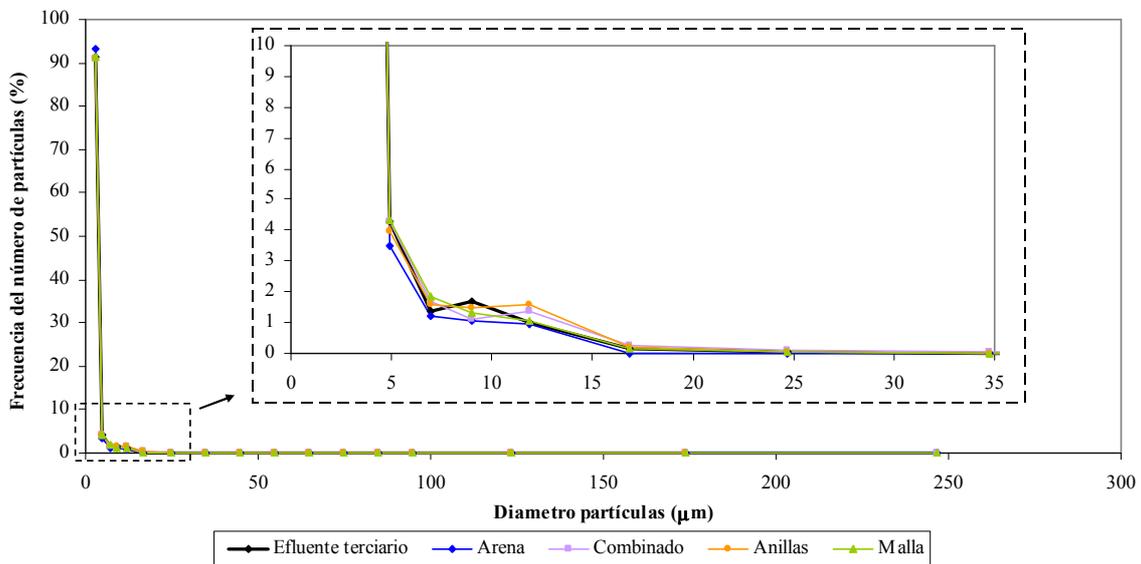


Figura 5.16. Distribución del número de partículas del efluente terciario antes y después de ser filtrado.

5.2.1.2.3. Reducción del número de partículas según su tamaño

Las reducciones del número de partículas obtenidas por los sistemas de filtración con efluente secundario (Figura 5.17 y Figura 5.18) y terciario (Figura 5.19) indican que el filtro de arena fue el único que claramente redujo el número de partículas, pues eliminó el 96 % de las partículas mayores de $25 \mu\text{m}$ del efluente secundario y el 99 % de las partículas mayores de $25 \mu\text{m}$ del efluente terciario. El filtro de arena retuvo el menor porcentaje de partículas en el rango de tamaño entre 2 y $4 \mu\text{m}$ (25 %) del efluente secundario. A partir de este tamaño, cuando mayor era el diámetro de partícula, mayor fue el porcentaje de partículas retenidas. Este sistema de filtración no fue tan regular en la reducción de partículas de menor tamaño del efluente terciario, ya que las partículas de $12 \mu\text{m}$ sólo fueron reducidas en un 20 %. La menor reducción conseguida por los filtros de arena de las partículas de menor diámetro (de 1 a $2 \mu\text{m}$) ya fue observada por Adin y Elimelech (1989), mientras que Puig-Bargués *et al.* (2005a), encontraron reducciones positivas por encima de $25 \mu\text{m}$ con efluentes secundarios.

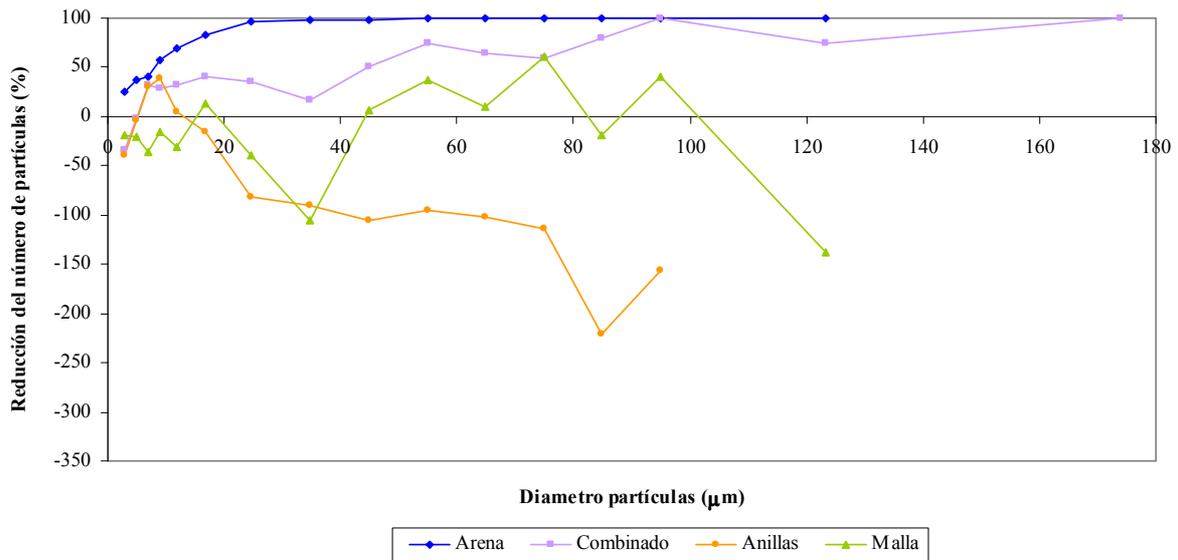


Figura 5.17. Reducción del número de partículas del efluente secundario en cada sistema de filtración en función del diámetro de la partícula.

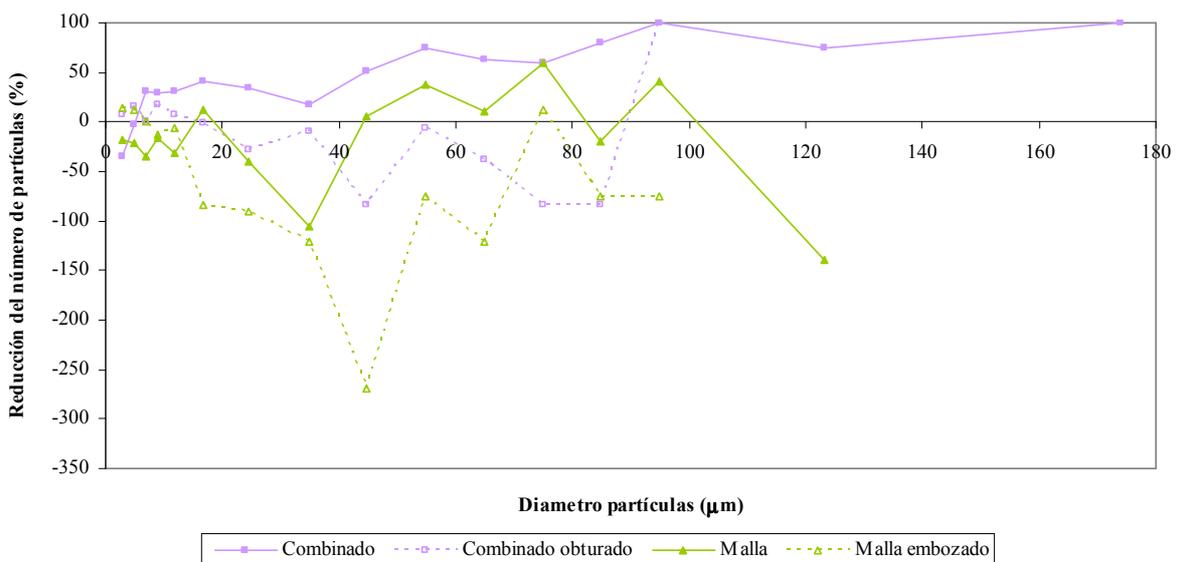


Figura 5.18. Comparación de la reducción del número de partículas del efluente secundario en los sistemas de filtración combinado y malla en estado obturado y no obturado.

El sistema de filtración que combinó los filtros de malla y anillas fue el segundo más eficiente en cuanto a la reducción de partículas del efluente secundario. Aunque con un comportamiento más irregular que el del filtro de arena, el sistema de filtración combinado retuvo y, por tanto, hizo disminuir el número de partículas en todos los rangos de diámetro de partícula medidos con el efluente secundario, excepto en el intervalo de 2 a 5 µm. En cambio, la filtración combinada con efluente terciario solamente redujo las partículas de diámetro comprendido entre 2 y 9 µm.

Por lo que se refiere a los filtros de malla y anillas con los dos efluentes, se obtuvieron reducciones negativas del número de partículas, aunque fueron más negativas con el efluente terciario. Con efluente secundario, el filtro de malla retuvo un mayor porcentaje de partículas

de tamaño superior a 40 μm , mientras que las partículas de tamaño inferior a 20 μm fueron reducidas en mayor proporción por el filtro de anillas. Con el efluente terciario y el filtro de anillas, no se obtuvo ninguna reducción del número de partículas. En cambio, con el filtro de malla se redujeron un 17 % las partículas de 9 μm , un 6 % las de 11 μm y un 8 % las de 3 μm . Estas diferencias de comportamiento entre los sistemas de filtración y las reducciones de número de partículas negativas ya fueron observadas por Puig-Bargués (2003).

Con los sistemas de filtración obturados y efluente secundario (Figura 5.18), se presentaron reducciones de partículas más negativas que con los sistemas sin estar embozados, cuando el tamaño de la partícula era superior a 12 y 5 μm con el filtro de malla y combinado, respectivamente. Esto puede explicarse porque el filtro embozado tenía una torta de filtración más gruesa, debido a que transcurrió más tiempo desde el último lavado eficiente que en los filtros limpios, que solamente llevaban 15 minutos de filtración. Al tener más grosor de torta de filtración se producía una mayor pérdida de carga, aumentando la presión aguas arriba, lo que podía provocar la deformación de las partículas orgánicas, facilitando su paso a través del medio filtrante (Puig-Bargués *et al.*, 2005a).

Los resultados presentados en la Figura 5.18, en que hubo mejores reducciones con los sistemas sin estar obturados en la mayor parte del rango del tamaño de partícula, aparentemente contradijeron lo encontrado en las reducciones con el número de partículas, en que los filtros obturados obtuvieron mejores reducciones (Tabla 5.13). La explicación está en que los sistemas de filtración reducen más cantidad de partículas de tamaño pequeño (menor de 12 y de 5 μm en el filtro de malla y el sistema combinado, respectivamente) cuando están obturados que cuando no lo están, siendo precisamente este rango el que contiene el mayor número de partículas (Figura 5.14).

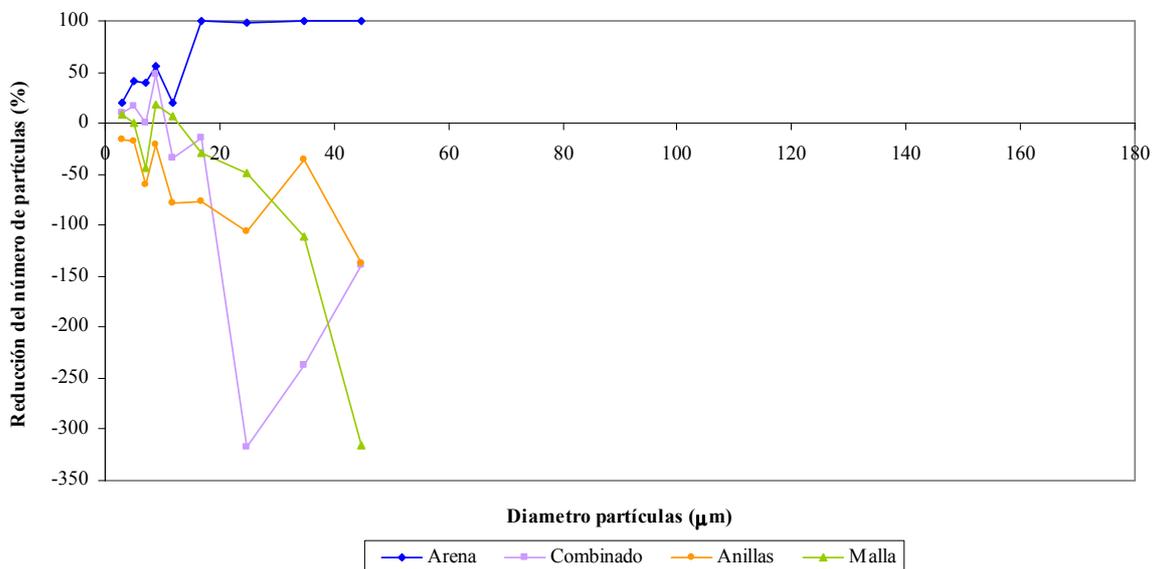


Figura 5.19. Reducción del número de partículas del efluente terciario en cada sistema de filtración en función del diámetro de la partícula.

Coincidió que las dos unidades de filtración más eficientes, en cuanto a la reducción del número de partículas, eran aquellas con mayor área de filtrado. La unidad con filtros de arena tenía una superficie de 3926 cm^2 (1963 cm^2 por cada filtro) y la unidad combinada de 1100 cm^2 del filtro de malla y 1880 cm^2 (940 cm^2 por cada filtro) del filtro de anillas. Las unidades de malla (1100 cm^2) y anillas (1880 cm^2) eran las que presentaron unas eficiencias más

irregulares. También debieron influir en la eficiencia, los distintos mecanismos de filtración que se encuentran en cada tipo de filtración. Mientras que los filtros de arena y malla son filtros con mecanismos de filtración en profundidad y superficie, respectivamente, los de anillas son filtros que combinan los dos mecanismos.

5.2.1.2.4. Distribución del volumen de las partículas

En la Figura 5.20 se presenta la mediana de la distribución de volúmenes de partículas del efluente secundario y terciario sin filtrar y después de ser filtrado por los distintos sistemas. Solamente con el efluente secundario el agua filtrada con el filtro de arena tenía una mediana significativamente ($P < 0.05$) inferior al efluente de entrada y al efluente de salida de los otros sistemas de filtración. Esto representó que la filtración con arena redujo el diámetro de las partículas que acumulaban el 50 % del volumen de las partículas.

Con el efluente terciario el sistema de filtración con arena también presentó la misma tendencia a reducir la mediana de la distribución del volumen de partículas. Los filtros de anillas y malla, al igual que con el efluente secundario, no modificaron el valor de la media. El agua filtrada con el sistema de filtración combinado, presentó una mediana muy superior al valor del efluente de entrada, aunque no se diferenció estadísticamente ($P < 0.05$) del resto.

Puig-Bargués (2003) también encontró que el filtro de arena era el único que reducía la mediana de la distribución de partículas de un efluente secundario de una estación depuradora de aguas residuales y los filtros de malla y anillas de distintos diámetros de paso tampoco modificaron esta mediana.

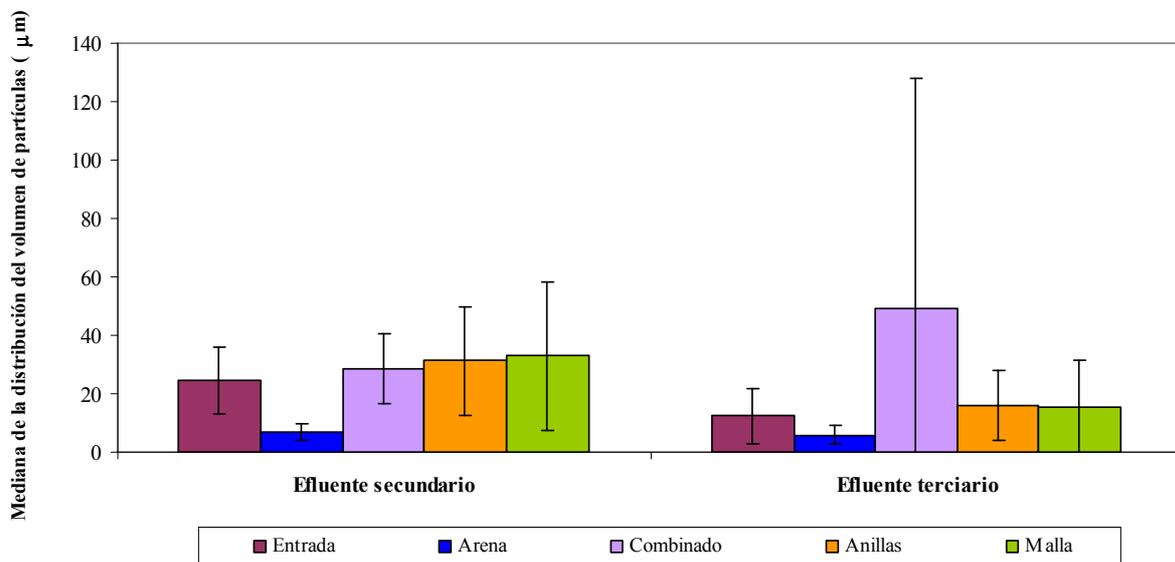


Figura 5.20. Efecto de los diferentes sistemas de filtración en la mediana de la distribución del volumen de partículas en los dos efluentes ensayados. Para cada efluente, columnas con letra distinta indican que existen diferencias significativas ($P < 0.05$).

En la Figura 5.21 se presenta la mediana de la distribución de volumen de partículas del efluente secundario antes y después de ser filtrado por los sistemas de filtración de malla y combinado sin obturación y con obturación. Como se observa, al igual que en régimen limpio, los sistemas de filtración obturados no provocaron ningún cambio estadísticamente significativo

($P > 0.05$) en la mediana de distribución de partículas, aunque sí que se observó una tendencia a presentar una mediana más baja con el sistema de filtración obturado.

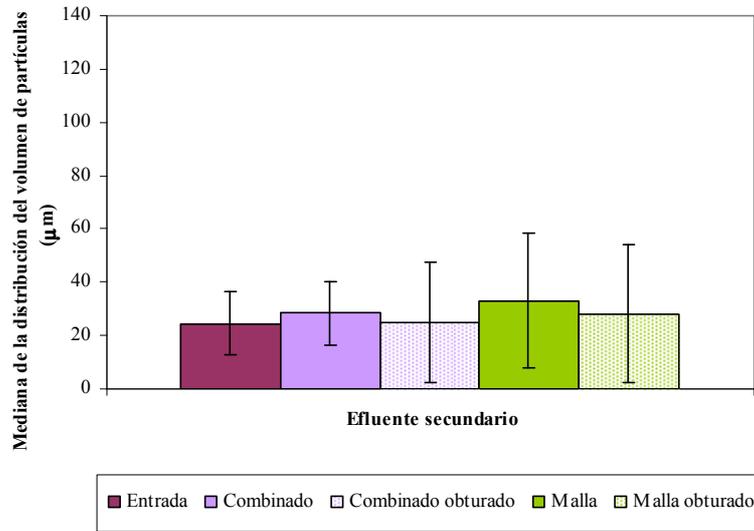


Figura 5.21. Efecto de los sistemas de filtración combinado y malla, en estado obturado y no obturado, en el valor de la mediana de la distribución del volumen de partículas del efluente secundario. Para cada efluente, columnas con letra distinta indican que existen diferencias significativas ($P < 0.05$).

En la Figura 5.22 y Figura 5.23 se presentan las distribuciones del volumen de partículas del efluente antes y después de pasar por los distintos sistemas de filtración del ensayo con efluente secundario y efluente terciario, respectivamente. En la Figura 5.24 se presentan las distribuciones del volumen de partículas del ensayo con efluente secundario y los filtros de malla y combinados en estado obturado y no obturado.

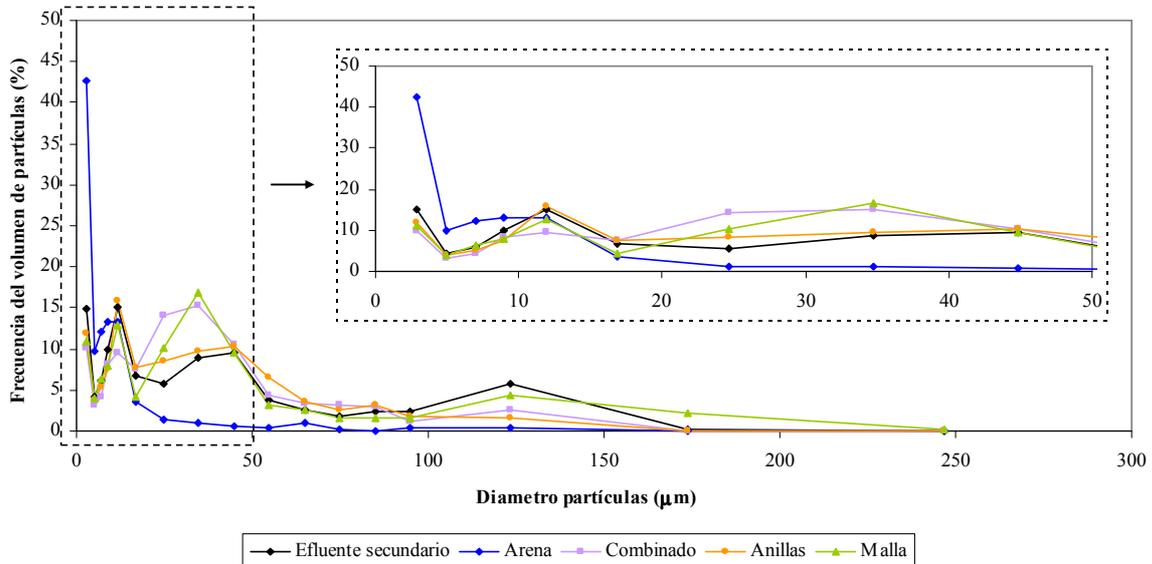


Figura 5.22. Distribución del volumen de partículas del efluente secundario antes y después de ser filtrado.

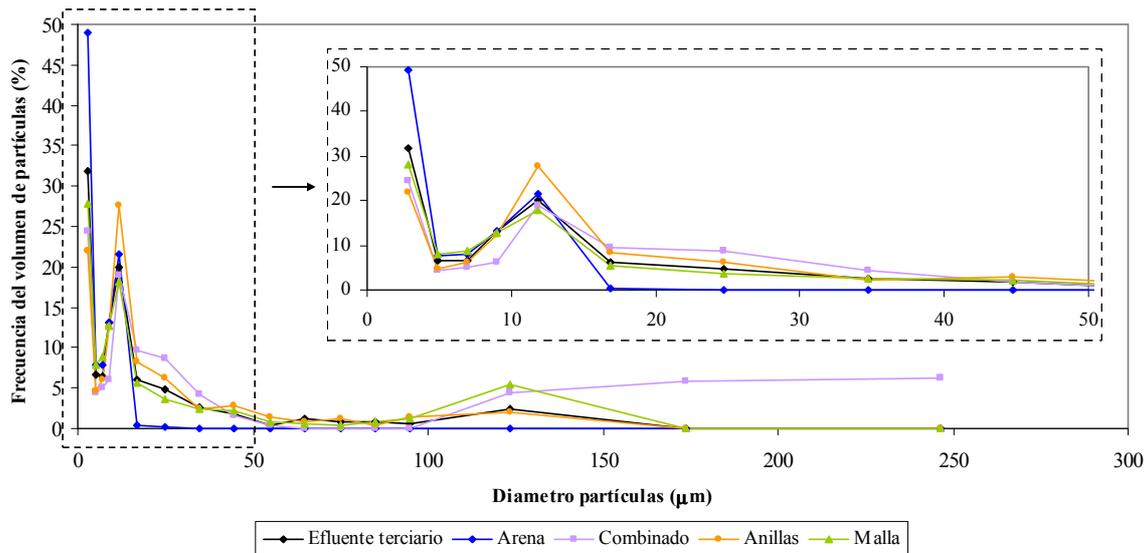


Figura 5.23. Distribución del volumen de partículas del efluente terciario antes y después de ser filtrado.

Es destacable el comportamiento del filtro de arena puesto que después del filtrado redujo hasta el 99 % en el ensayo con efluente terciario y 91 % con efluente secundario, el porcentaje de partículas superiores a 15 μm y aumentó el porcentaje relativo de partículas de hasta 15 μm . Concretamente en el efluente secundario después de la filtración con arena, el 98 % del volumen de las partículas estaba formado por partículas de diámetro inferior a 45 μm . Tajrishy *et al.* (1994) encontraron este punto de inflexión en el tamaño de 40 μm utilizando un medio granular de 0.45 mm de diámetro efectivo. Puig-Bargués *et al.* (2005a) también encontraron que el filtro de arena redujo totalmente los volúmenes debidos a tamaños de partículas con un diámetro superior a 45 μm y 95 μm con efluente de una industria cárnica y del secundario de una estación depuradora, respectivamente y una arena con un diámetro efectivo de 0.65 mm. En el presente trabajo (apartado 4.9) el diámetro efectivo del medio granular fue de 0.40 y 0.27 para la arena del ensayo con efluente secundario y terciario, respectivamente. Los resultados indican que a menor diámetro efectivo del medio filtrante, menor es el valor del volumen de las partículas a partir del cual se reducen casi totalmente.

En la Figura 5.24 se observa que los efluentes de salida de los sistemas de filtración obturados presentaron unos mayores porcentajes de volúmenes de partículas de tamaño inferior a 20 μm que los sistemas de filtración sin estar obturados. Las partículas comprendidas entre 20 y 50 μm del efluente de salida de los sistemas de filtración constituyeron un mayor porcentaje del volumen de partículas cuando se utilizaban los filtros en régimen limpio que en estado obturado.

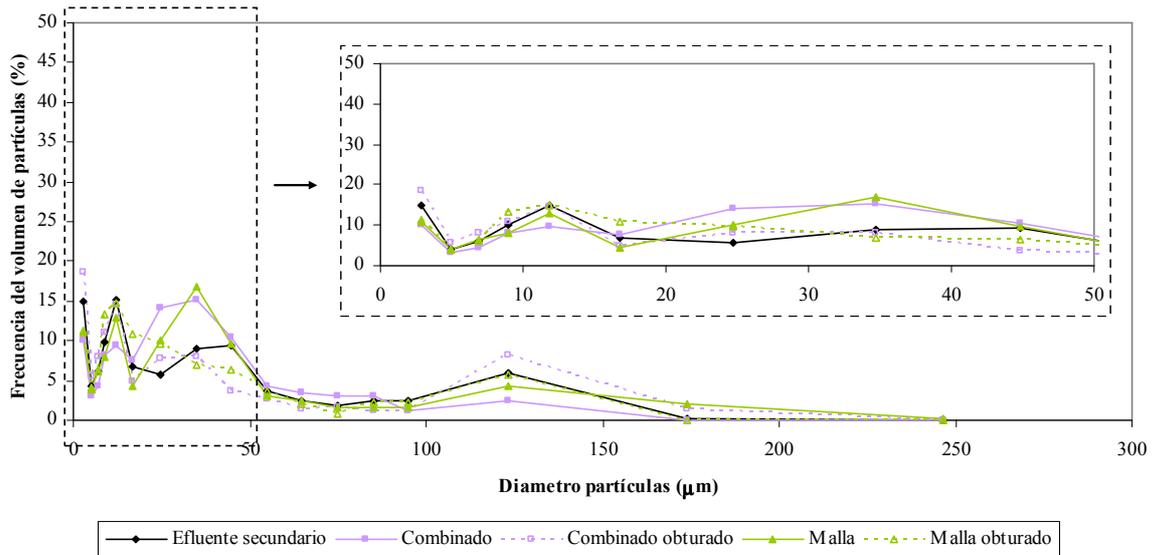


Figura 5.24. Comparación de la distribución del volumen de partículas del efluente secundario antes y después de ser filtrado con los sistemas de filtración combinado y de malla en estado obturado y no obturado.

También se realizó el análisis de la reducción porcentual del volumen de partículas por diámetro de partícula para cada sistema de filtración y efluente, no aportando más información de la presentada hasta el momento.

5.2.2. Análisis de los lavados de los filtros

Los lavados de los filtros fueron distintos en función del filtro y de las condiciones en las que se realizó el lavado, por lo que clasificaron según se detalla en el apartado 4.11. En la Tabla 5.14 y en la Tabla 5.15 se clasifican y describen todos los lavados de los filtros utilizados en el ensayo con efluente secundario y terciario, respectivamente. Para la obtención de los valores presentados en estas tablas, se utilizaron las expresiones y metodologías presentadas en el apartado 4.12.

Tabla 5.14. Clasificación y principales parámetros descriptivos de los lavados de los filtros de las distintas unidades de filtración del ensayo con efluente secundario.

Filtro	Automático eficiente		Automático no eficiente		Automático no eficiente (Sin motivo)				Provocado				No detectado				Manual							
	Doble		Doble		Doble		Doble		Ind		Conj		Doble		Ind		Conj		Doble		Ind		Conj	
	Ind	Conj	Ind	Conj	Ind	Conj	Ind	Conj	Ind	Conj	Ind	Conj	Ind	Conj	Ind	Conj	Ind	Conj	Ind	Conj	Ind	Conj	Ind	Conj
<i>Arena</i>	Nº	151	12	163	-	-	34	-	34	17	5	22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	V _f	43369	38521	43012	-	-	21838	-	21838	21703	19722	21253	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	V _u	470	601	480	-	-	196	-	196	406	564	442	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	C _{lav}	1.07	1.54	1.10	-	-	0.89	-	0.89	1.84	2.78	2.04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Anillas</i>	Nº	10	-	10	29	-	29	-	-	15	4	19	29	9	38	16	-	-	-	-	-	-	-	16
	V _f	92950	-	92950	58389	-	58389	-	-	60687	3933	48723	113152	51038	98441	26784	-	-	-	-	-	-	-	26784
	V _u	95	-	95	92	-	92	-	-	132	163	138	88	163	106	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	C _{lav}	0.10	-	0.10	0.16	-	0.16	-	-	0.22	3.97	0.28	0.08	0.32	0.11	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Combinada</i>	Nº	66	18	84	2000	-	2000	586	-	586	3	19	-	-	-	58	-	-	-	-	-	-	-	58
	V _f	29193	29614	29284	2198	-	2198	543	-	543	25673	14720	23944	-	-	2992	-	-	-	-	-	-	-	2992
	V _u	66	78	69	60	-	60	61	-	61	53	93	59	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	C _{lav}	0.23	0.26	0.24	2.64	-	2.64	10.14	-	10.14	0.20	0.63	0.25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Anillas</i>	Nº	156	12	168	518	-	518	1	10	10	11	11	8	3	11	28	2	30	-	-	-	-	-	30
	V _f	29795	22903	39302	3823	-	3823	9224	3790	4284	7850	7155	79215	47837	70657	9707	1875	9185	-	-	-	-	-	9185
	V _u	201	243	204	150	-	150	80	159	152	160	213	132	165	141	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	C _{lav}	0.67	1.05	0.69	3.78	-	3.78	0.86	4.03	3.42	2.70	2.89	0.17	0.34	0.20	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Malla</i>	Nº	88	13	101	2377	-	2377	766	6	772	1	7	-	-	-	59	-	59	-	-	-	-	-	59
	V _f	35099	38812	35577	1262	-	1262	890	897	890	3923	3469	-	-	-	7870	-	7870	-	-	-	-	-	7870
	V _u	59	72	61	65	-	65	61	70	61	50	56	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	C _{lav}	0.17	0.19	0.17	4.91	-	4.91	6.38	7.24	6.38	1.26	1.58	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Leyenda: Doble: Funcionamiento de dos sistemas de filtración o unidades de riego con un grupo de bombeo, Ind: Funcionamiento de un sistema de filtración o unidad de riego con un grupo de bombeo, Conj: promedio del funcionamiento doble e individual.

Nº: Número de ciclos de filtración V_f: Volumen filtrado durante un ciclo (l) V_u: Agua utilizada para lavar el filtro (l)

C_{lav}: Porcentaje de agua utilizada para lavar el filtro (%).

Tabla 5.15. Clasificación y principales parámetros descriptivos de los lavados de los filtros de las distintas unidades de filtración del ensayo con efluente terciario.

FILTRO	Automático eficiente	Automático no eficiente	Automático no eficiente (Sin motivo)	Provocado	No detectado	Manual
<i>Arena</i>	Nº	13	8	23	-	-
	V _f	13221	22518	8791	-	-
	V _u	701	225	675	-	-
	C _{lav}	5.04	0.99	11.41	7.13	-
<i>Anillas</i>	Nº	31	-	20	9	1
	V _f	145792	-	145360	139456	620
	V _u	149	-	171	158	-
	C _{lav}	0.10	-	0.12	0.11	-
<i>Combinada</i>	Nº	124	44	21	-	2
	V _f	48551	12328	105697	-	1845
	V _u	80	84	77	-	-
	C _{lav}	0.16	0.68	0.07	-	-
<i>Anillas</i>	Nº	128	2	19	4	1
	V _f	52395	144975	48121	92893	900
	V _u	171	40	173	171	-
	C _{lav}	0.32	0.03	0.36	0.18	-
<i>Malla</i>	Nº	111	1	19	1	2
	V _f	56356	34720	99716	71740	21260
	V _u	78	50	75	76	-
	C _{lav}	0.14	0.14	0.07	0.11	-

Leyenda: Nº: Número de ciclos de filtración V_f: Volumen filtrado durante un ciclo (l) V_u: Agua utilizada para lavar el filtro (l)

C_{lav}: Porcentaje de agua utilizada para lavar el filtro (%).

La asignación de los lavados a las seis categorías establecidas fue determinada por las características del efluente ensayado y la presión en la entrada de los distintos sistemas de filtración. La arena utilizada en los dos ensayos en el sistema de filtración con arena también influyó sobre las características de los lavados. De las distintas categorías, los lavados automáticos eficientes eran los más interesantes porque implicaban un funcionamiento autónomo y regular del sistema de filtración.

Como ya se ha comentado en el apartado 4.8.6, el ensayo con efluente secundario se realizó con dos presiones de entrada distintas a lo largo de las 1000 h de ensayo. El funcionamiento doble de dos unidades de filtración se produjo hasta las 930 h, operando el sistema con una presión de entrada de 300 kPa. En el funcionamiento individual de cada unidad de filtración, que transcurrió durante las últimas 70 h, se incrementó la presión a 465 kPa con la instalación de una nueva bomba. El ensayo con efluente terciario se ejecutó de forma individual y con una presión a la entrada de 500 kPa.

Debido al aumento de presión en la entrada de los sistemas de filtración en el ensayo con efluente terciario, se registraron un mayor número de lavados automáticos eficientes con respecto al ensayo con efluente secundario, excepto con el sistema de filtración de anillas. El volumen total de efluente filtrado con ciclos automáticos eficientes (producto del número de lavados por el volumen filtrado en cada ciclo) fue mayor para todos los cinco filtros con el efluente terciario. Los filtros de malla fueron los que más se diferenciaron en función del efluente debido al incremento de presión. Por lo que se refiere al sistema de filtración de anillas, aunque el volumen total filtrado por ciclos automáticos eficientes no aumentó considerablemente al pasar a mayores presiones, sí que se evidenció una reducción muy importante del número de lavados automáticos no eficientes y de los manuales.

Los requerimientos de presión de funcionamiento vinieron determinados porque se tenía que garantizar la presión mínima de lavado durante los lavados (Tabla 4.7) sin cerrar el riego a la parcela de goteros. Esto creaba una gran demanda de presión con el agravante que si no se alcanzaba el mínimo de presión en los filtros, sobretodo en los de anillas y malla, éstos podían lavarse no correctamente.

El sistema de filtración de arena, que no varió la distribución de los ciclos de filtración al aumentar la presión y cambiar de efluente, era el que necesitaba menor de presión durante el lavado. Con una bomba de 4 kW compartida con otro sistema de filtración, los filtros de arena funcionaron y realizaron los lavados de forma eficiente, mientras que los otros sistemas de filtración funcionaron mejor con el uso exclusivo de una bomba para cubrir las necesidades de presión del sistema de riego y del lavado en el momento en que se realizaban los lavados.

A pesar del aumento de presión con el que se desarrollaron los ensayos con el efluente terciario, se continuaron produciendo lavados automáticos no eficientes debidos a problemas puntuales como la falta de agua durante algunos procesos de lavado o la avería del presostato diferencial del filtro de malla de la unidad combinada. El número de lavados provocados fue superior en el ensayo con efluente terciario porque con este efluente se regó sólo por la tarde y la noche (apartado 4.8.1) mientras que con el efluente secundario el funcionamiento fue ininterrumpido durante todo el día. Esta distribución horaria del ensayo con efluente secundario permitió que se pudiera muestrear el efluente sin necesidad de modificación del régimen horario, mientras que con el efluente terciario se tenían que variar los regímenes horarios y provocar los lavados para poder muestrear de día los efluentes a la entrada y a la salida de las distintas unidades. Cabe recordar que los muestreos se realizaban instantes después del lavado del sistema de filtración (apartado 4.8.2).

También se redujo el número de lavados manuales en el ensayo con efluente terciario respecto a los realizados en el ensayo con efluente secundario. Al aumentar la presión de trabajo de los sistemas de filtración mejoró la eficiencia de los lavados y, por tanto, disminuyeron los requerimientos de lavados manuales. Según Adin (2002) los filtros de malla que se lavaban automáticamente originaban problemas debido a que no realizaban las limpiezas correctamente, lo que solamente se podía corregir con el lavado manual del filtro. En la misma línea, Nakayama *et al.* (2007) observaron que cuando se utilizaban aguas de origen orgánico, la limpieza de los sistemas de filtración de malla con lavado automático era dificultoso porque las algas se colocaban entre la malla y no se podían separar fácilmente.

Los ciclos de filtración del filtro de arena fueron más cortos con el efluente terciario que con el secundario, mientras que, con los otros filtros, los ciclos fueron más largos con el efluente terciario (Tabla 5.14, Tabla 5.15 y Figura 5.25). También se observó que en el funcionamiento individual con efluente secundario, el filtro de arena obtuvo unos ciclos un 11 % más cortos que con el funcionamiento doble. Según Haman *et al.* (1994) las necesidades de lavado de un filtro de medio granular aumentaban si disminuía la velocidad de filtración o se reducía el tamaño de partícula del lecho granular, factores que influyen sobre la eficiencia de filtración (Adin, 1987). La velocidad de filtración (Tabla 4.2), aunque fue significativamente ($P < 0.05$) diferente, era muy parecida en los dos ensayos, (5.93 y 6.06 l/m²·s para el efluente secundario y terciario, respectivamente). Como se indica en la Figura 4.12, el medio granular del ensayo con efluente terciario tenía un mayor porcentaje de partículas pequeñas y presentó una reducción de sólidos en suspensión más grande (Tabla 5.10). La presión de entrada al sistema de filtración era superior en el ensayo con efluente terciario, pero no se han encontrado referencias bibliográficas que relaten que con mayor presión de entrada al sistema de filtración de arena se acorten los ciclos entre lavados. El filtro de anillas con funcionamiento individual en el ensayo con el efluente secundario, al igual que el de arena, obtuvo unos ciclos de filtración un 25 % más cortos que en el funcionamiento doble, mientras que con el filtro de malla, al pasar al funcionamiento individual, los ciclos, de media, se mantuvieron en la unidad combinada y aumentaron un 10 % en el sistema de filtración de malla. Este aumento, en el sistema de filtración con un solo filtro de malla, puede ser producido por una mayor eficiencia en el lavado que permitía la realización de ciclos más largos.

Los volúmenes de agua filtrada en los ciclos automáticos eficientes en los dos ensayos realizados fueron variables y con un efecto estadísticamente significativo ($P < 0.05$) en función de las horas de operación y del filtro utilizado. Los sistemas de filtración de arena y anillas con los dos efluentes presentaron la evolución más regular. En ambos casos el volumen filtrado a lo largo de los ensayos fue decreciente, obteniéndose un volumen filtrado medio entre las 800 y 1000 h significativamente ($P < 0.05$) inferior al obtenido en las primeras 200 h. La explicación al decrecimiento de los volúmenes de los ciclos en el filtro de arena puede ser la obturación del medio filtrante. A medida que avanzaban las horas de utilización del medio, con más partículas retenidas, el medio perdía capacidad de filtración hasta que al final de su vida útil, próxima a las 1000 h según comunicación del fabricante, se recomienda su sustitución. El decrecimiento del volumen filtrado en el sistema de filtración de anillas fue mucho mayor en el ensayo con efluente terciario que con el efluente secundario. En el ensayo con efluente terciario, sólo se realizó un lavado manual, mientras que en el ensayo con efluente secundario se realizaron 30. Estos lavados manuales debieron permitir mantener las condiciones del filtro del inicio del ensayo y, por este motivo, en el ensayo con efluente terciario la reducción del volumen filtrado fue mayor.

De la evolución presentada en la Figura 5.25, también destaca que los cuatro filtros presentaron una disminución, estadísticamente significativa ($P < 0.05$), del volumen filtrado en el ensayo con efluente terciario a las 600 h. La causa puede ser que poco antes de las 600 h se realizó un vaciado de un reactor de la estación depuradora (primeros días de agosto según la Figura 4.9). Aunque se paró el sistema de riego durante el vaciado y hasta que el personal de la estación depuradora comunicó que se recuperaron las condiciones de trabajo del otro reactor, la composición del agua pudo variar de manera que hiciera cambiar el comportamiento de los sistemas más sensibles.

También se ha detectado que con todos los filtros y los dos efluentes ensayados, excepto el de arena, entre la media del volumen de los ciclos obtenida entre 0 y 200 h de ensayo y la obtenida entre 200 y 400 h se presentó una reducción importante que las diferenció significativamente ($P < 0.05$). Esta reducción pudo ser provocada por el hecho que los filtros al inicio de los ensayos estaban completamente limpios y podían realizar ciclos más largos. En cambio, al transcurrir las horas, aunque se realizaran lavados manuales no se alcanzaban los niveles de limpieza del principio del ensayo (apartado 4.8.6).

En el ensayo con efluente terciario, el filtro de malla tanto de la unidad combinada como de la unidad en que estaba solo, presentó una evolución de la media del volumen de filtración más irregular, con un pico en la media de los ciclos realizados entre 400 y 600 h.

En la Tabla 5.16 se presentan las diferencias estadísticas entre los volúmenes filtrados por cada sistema de filtración y efluente, para los distintos momentos del ensayo. Los mayores volúmenes observados al inicio del ensayo y entre las 400 y 600 h con los sistemas de filtración de malla, anillas y malla del sistema combinado en los ensayos con efluente terciario, fueron significativamente superiores a los obtenidos con los demás sistemas de filtración. También destaca que los menores volúmenes registrados al final del ensayo con efluente terciario y filtración de arena, fueron significativamente diferentes a todos los demás.

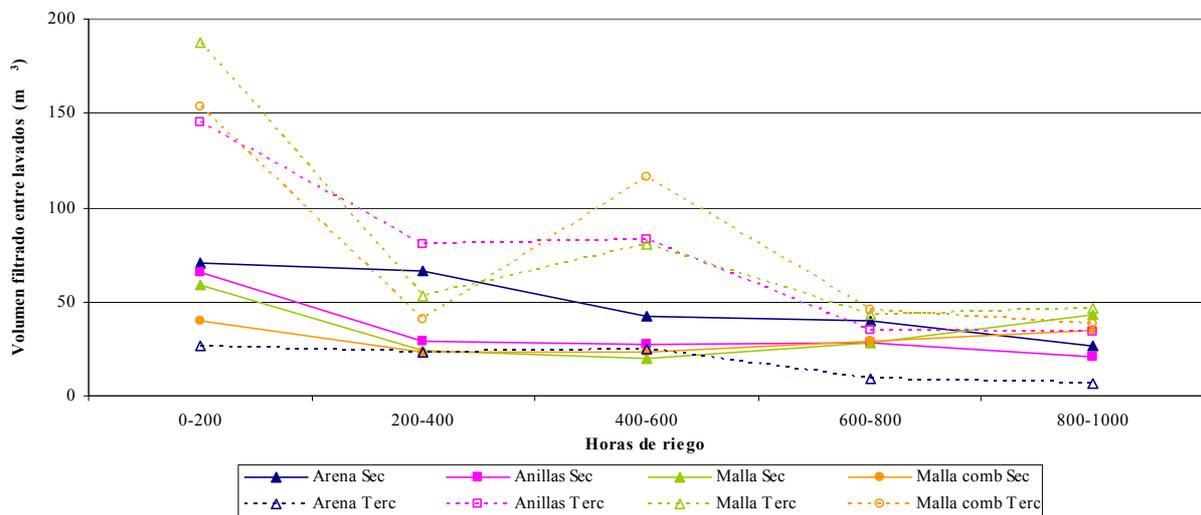


Figura 5.25. Evolución de la duración de los ciclos de filtración a lo largo de los ensayos con efluente secundario y terciario.

Tabla 5.16. Diferenciación estadística entre los volúmenes de los ciclos de filtración. Para cada intervalo de funcionamiento, sistemas de filtración con letras distintas indican diferencias significativas ($P < 0.05$).

Efluente	Sistema de filtración	Horas de riego				
		0-200	200-400	400-600	600-800	800-1000
Secundario	Arena	b	ab	b	a	a
	Anillas	b	cd	b	ab	a
	Malla	b	d	b	ab	a
	Malla en combinado	bc	d	b	ab	a
Terciario	Arena	c	d	b	b	b
	Anillas	a	a	a	a	a
	Malla	a	abc	a	a	a
	Malla en combinado	a	bcd	a	a	a

En régimen de lavados eficientes el filtro de anillas en la unidad de filtración combinada fue el que utilizó una menor cantidad de agua para el lavado del filtro, un 0.10 % del agua utilizada con los dos efluentes (Tabla 5.14 y Tabla 5.15). De hecho, este sistema de filtración filtraba agua procedente del filtro de malla de la misma unidad, si bien este filtro no redujo significativamente los parámetros físico-químicos de los efluentes (Tabla 5.10). El filtro de malla, tanto el que funcionó solo como el que lo hizo aguas arriba del filtro de anillas utilizaron para los lavados entre un 0.14 % y un 0.24 % del agua total. Los filtros de anillas utilizaron para los lavados un 0.69 % y un 0.32 % del agua en el ensayo con efluente secundario y terciario, respectivamente. Los sistemas de filtración de arena fueron los que mayores porcentajes de agua utilizaron para los lavados, 1.10 % y 5.04 % del agua utilizada en el ensayo con efluente secundario y terciario, respectivamente. El motivo por el cual el sistema de filtración de arena consumió un mayor porcentaje de agua para su lavado en el ensayo con efluente terciario fue debido, además del acortamiento de los ciclos de filtración anteriormente comentado, a que el aumento de presión de trabajo del sistema de filtración provocaba un mayor consumo de agua para el lavado. Este valor pasó de los 470 l por ciclo en el funcionamiento doble del ensayo con efluente secundario a los 700 l en el ensayo con efluente terciario en funcionamiento individual. Al cambiar del funcionamiento doble al individual en el ensayo con efluente secundario el consumo del agua utilizada para el lavado del filtro de arena aumentó de los 470 l a los 601 l. Igualmente, con los otros sistemas de filtración el volumen de agua utilizada para lavar los filtros se incrementó al cambiar del funcionamiento doble al individual. Ravina *et al.* (1997) hallaron consumos de agua para los lavados de los filtros de malla de 0.5 %, para los filtros de arena, entre 0.5 % y 1.5 %, e inferiores al 0.5 % en los filtros de anillas. Puig-Bargués *et al.* (2005c) no cuantificaron los consumos pero observaron que con efluente secundario de una depuradora, el sistema de filtración de arena requería más lavados que los de anillas y malla.

En la Tabla 5.17 se presentan los valores medios de todas las categorías de lavados, excepto los manuales, para los distintos filtros y los dos efluentes utilizados.

Tabla 5.17. Descripción del global de los lavados de los filtros de los dos ensayos.

Filtro	Todos excepto los manuales				
	Efluente secundario			Efluente terciario	
	Doble	Individual	Conjunto		
<i>Arena</i>	N ^o	202	17	219	645
	V _f	37921	32992	37539	13150
	V _u	419	590	432	690
	C _{lav}	1.09	1.76	1.14	4.99
<i>Anillas combinado</i>	N ^o	83	13	96	60
	V _f	82099	36544	75930	144697
	V _u	98	163	107	158
	C _{lav}	0.12	0.44	0.14	0.11
<i>Malla combinado</i>	N ^o	2668	21	2689	189
	V _f	2643	27487	2837	46467
	V _u	60	80	60	80
	C _{lav}	2.22	0.29	2.08	0.17
<i>Anillas</i>	N ^o	693	26	719	190
	V _f	10606	17556	10857	45432
	V _u	162	198	164	169
	C _{lav}	1.51	1.12	1.48	0.37
<i>Malla</i>	N ^o	3237	20	3257	184
	V _f	2099	25534	2243	48152
	V _u	64	73	64	76
	C _{lav}	2.95	0.28	2.77	0.16

Leyenda: N^o: Número de ciclos de filtración V_f: Volumen filtrado durante un ciclo (l) V_u: Agua utilizada para lavar el filtro (l) C_{lav}: Porcentaje de agua utilizada para lavar el filtro (%).

Los volúmenes de agua utilizada para lavar los filtros, teniendo en cuenta todas las categorías de lavados, excepto los manuales, fueron distintos según el efluente utilizado. Los sistemas de filtración que en el ensayo con efluente secundario realizaron mayor número de lavados automáticos no eficientes (malla y anillas) presentaron los mayores porcentajes de agua utilizada para el lavado de los filtros. En cambio, en el ensayo con efluente terciario, los consumos de agua para realizar lavados fueron muy similares a los obtenidos para los lavados eficientes porque la mayoría de los lavados estuvieron dentro de esta categoría.

5.2.3. Evolución de la granulometría de la arena del filtro

En la Figura 5.26 y en la Tabla 5.18 se presentan, respectivamente, las curvas granulométricas y valores descriptivos de la granulometría de la arena de los filtros antes y después del ensayo con efluente secundario y terciario. Los dos sistemas de filtración funcionaron durante 1000 h y filtraron un volumen total de 8281 m³ y 8485 m³ en los ensayos con efluente secundario y terciario, respectivamente (Tabla 5.28).

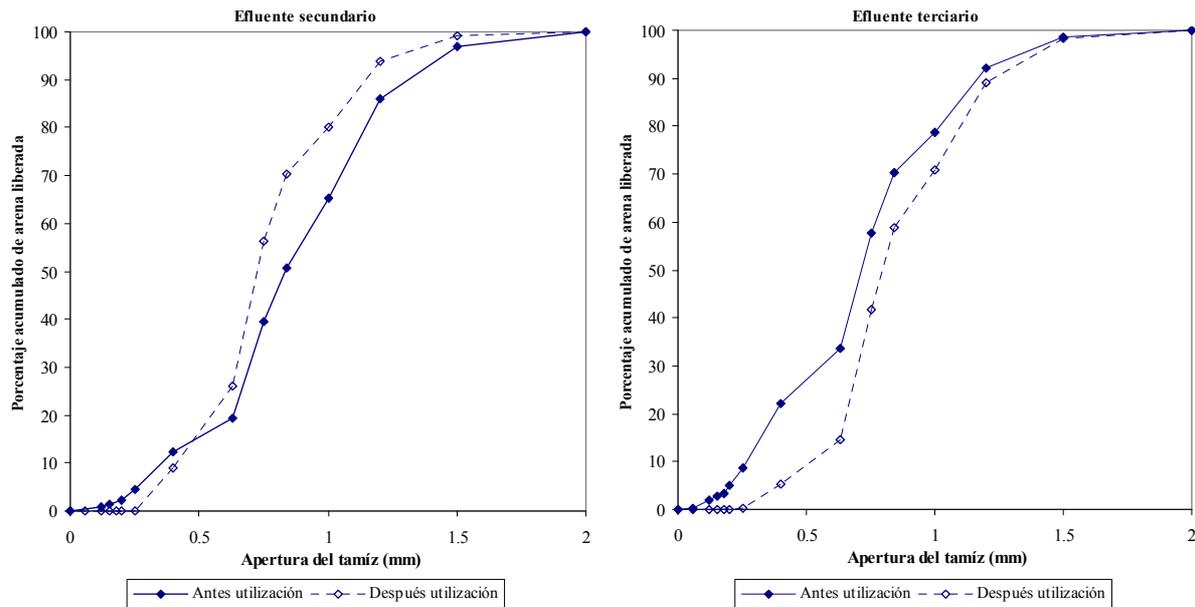


Figura 5.26. Curvas granulométricas de la arena antes y después de su utilización con efluente secundario y terciario.

Tabla 5.18. Valores descriptivos de la granulometría de la arena antes y después de su utilización durante 1000 h con efluente secundario y terciario. Para cada tipo de efluente y característica granulométrica, letras distintas indican diferencias significativas ($P < 0.05$).

Característica granulométrica	Efluente secundario		Efluente terciario	
	Antes	Después	Antes	Después
Diámetro efectivo (mm)	0.40	0.41	0.27 b	0.52 a
Coefficiente uniformidad	2.41	1.88	2.89 a	1.65 b

El diámetro efectivo de la arena de los sistemas de filtración antes de ser utilizada fue, en los dos ensayos (Tabla 5.18), inferior a los diámetros efectivos presentados por otros autores (Tabla 2.3), aunque por escasa diferencia en algunos casos, ya que autores como Hills y Brenes (2001) utilizaron arena con un diámetro efectivo de 0.46 mm o Nakayama *et al.* (1978) arena con un diámetro efectivo de 0.45 mm. También fueron mayores los coeficientes de uniformidad de la arena utilizada en los presentes ensayos que los presentados por otros autores (Tabla 2.3), hecho que indica que la arena utilizada tenía una mayor gradación de partículas (Burt y Styles, 2000). Haman *et al.* (1994) y Burt y Styles (2000) aconsejan que el coeficiente de uniformidad de la arena del filtro, esté alrededor de 1.5 y, tal y como se observa en la Tabla 5.18, tanto en el ensayo con efluente secundario como con el terciario, el coeficiente de uniformidad fue superior a 2.

El diámetro efectivo medido antes de los ensayos fue menor en la arena del ensayo con efluente terciario que en el ensayo con efluente secundario. Según Haman *et al.* (1994) un menor diámetro efectivo a igual caudal de filtración permite una filtración más eficiente. En el ensayo con efluente terciario, con arena de menor diámetro efectivo que en el ensayo con efluente secundario, se redujeron en mayor proporción los sólidos en suspensión del efluente de entrada (apartado 5.2.1).

Como se observa en la Tabla 5.18 el valor del diámetro efectivo después de la utilización de la arena en un filtro durante 1000 h aumentó con el efluente secundario y con el efluente terciario aunque, con mayor proporción y diferenciándose significativamente ($P < 0.05$) en este

último caso. Los coeficientes de uniformidad disminuyeron al finalizar los dos ensayos, como ya observó Puig-Bargués (2003). La variación en los dos parámetros fue debida a una menor presencia de partículas de menor diámetro (Figura 5.26) después de la utilización, debido a las pérdidas de finos durante los lavados y sobre todo, durante los primeros lavados que se realizaron en la puesta en funcionamiento con el objetivo de liberar partículas de menor diámetro. El hecho que la variación de las características granulométricas fuera mayor con el efluente terciario pudo ser debido a que con este efluente se trabajó con mayor presión a la entrada, lo que pudo haber provocado una mayor pérdida de partículas pequeñas durante los lavados y, consecuentemente, el aumento del valor del diámetro efectivo y la disminución del coeficiente de uniformidad.

5.2.4. Análisis de la filtración en los filtros de arena mediante la ecuación de Darcy

La ecuación de Darcy para determinar la conductividad hidráulica saturada (K_s) del medio granular (ecuación 4-III) se aplicó en cada instante del funcionamiento del filtro de arena. En la Figura 5.27 se presenta, para los ensayos con efluente secundario y terciario la evolución de la conductividad hidráulica saturada de la arena del filtro durante 50 h. Aunque el valor final de la K_s de cada ciclo era igual en los dos ensayos, unos 5 m/h, tanto el valor inicial del ciclo como la evolución fueron distintos. Mientras que en el ensayo con efluente secundario la K_s conductividad hidráulica saturada era de unos 16 m/h al inicio de los ciclos, este parámetro tomó valores de entre 9 y 10 m/h con efluente terciario. La evolución del valor máximo al mínimo fue más rápida en los ciclos del ensayo terciario que del secundario. Como ya se ha presentado en el apartado 5.2.2, los ciclos entre lavados fueron más cortos en el ensayo con efluente terciario que en el ensayo con efluente secundario.

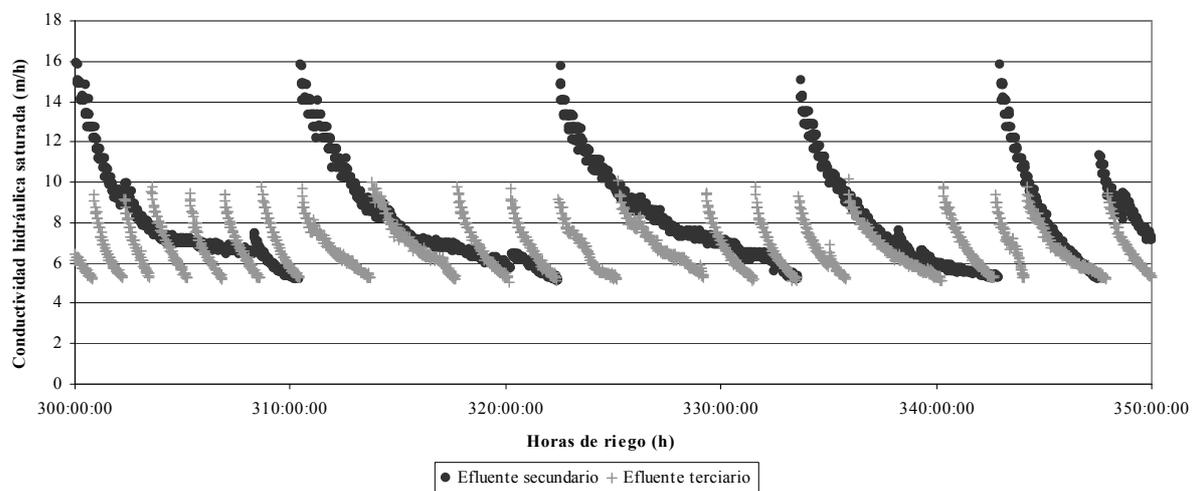


Figura 5.27. Evolución de la conductividad hidráulica saturada del medio filtrante del filtro de arena durante la realización de los ensayos con el efluente secundario y terciario.

En cada ciclo de filtración, la K_s decrecía exponencialmente a medida que aumentaban la pérdida de presión, el tiempo desde el último lavado y la cantidad de material retenido en el filtro (Figura 5.28). Aunque esta evolución fue más rápida a medida que transcurrieron las horas de ensayo, probablemente debido a una obturación biológica de la arena, con los dos efluentes el rango de valores que tomó K_s no varió a lo largo de los ensayos (Figura 5.29). El valor de la conductividad hidráulica saturada con el efluente terciario fue, de media, 1,5 m/h inferior a la medida en el ensayo con efluente secundario. En el ensayo con efluente terciario

los valores de la conductividad hidráulica saturada también fueron más regulares que en el ensayo con efluente secundario.

Rodgers *et al.* (2004) estudiaron la conductividad hidráulica saturada en distintas profundidades del medio granular de un filtro estratificado y de filtración intermitente. Observaron que la arena de la capa superficial, con un diámetro efectivo de 0.45 mm y un coeficiente de uniformidad de 3, redujo su conductividad hidráulica con el tiempo de ensayo en función de la profundidad del lecho de arena. A mayor profundidad, menor reducción de la conductividad hasta que a 16 cm se mantuvo igual que al inicio del ensayo. Esta obturación en la zona superficial del medio granular también fue observada por Viviani e Iovino (2004) en las pruebas de conductividad hidráulica que realizaron en un suelo franco regado con agua procedente de depuradora. Además, también obtuvieron que la conductividad hidráulica del suelo disminuía al aumentar la cantidad de sólidos en el agua. En el presente trabajo se estudió la conductividad hidráulica saturada de todo el medio granular y, como ya se ha comentado, se observó que la conductividad decreció a medida que transcurrió el tiempo de funcionamiento dentro de cada ciclo. No se comprobó si esta conductividad variaba con la profundidad del medio, pero se observó que la arena del filtro presentaba una mayor presencia de suciedad en la superficie que en el fondo del filtro.

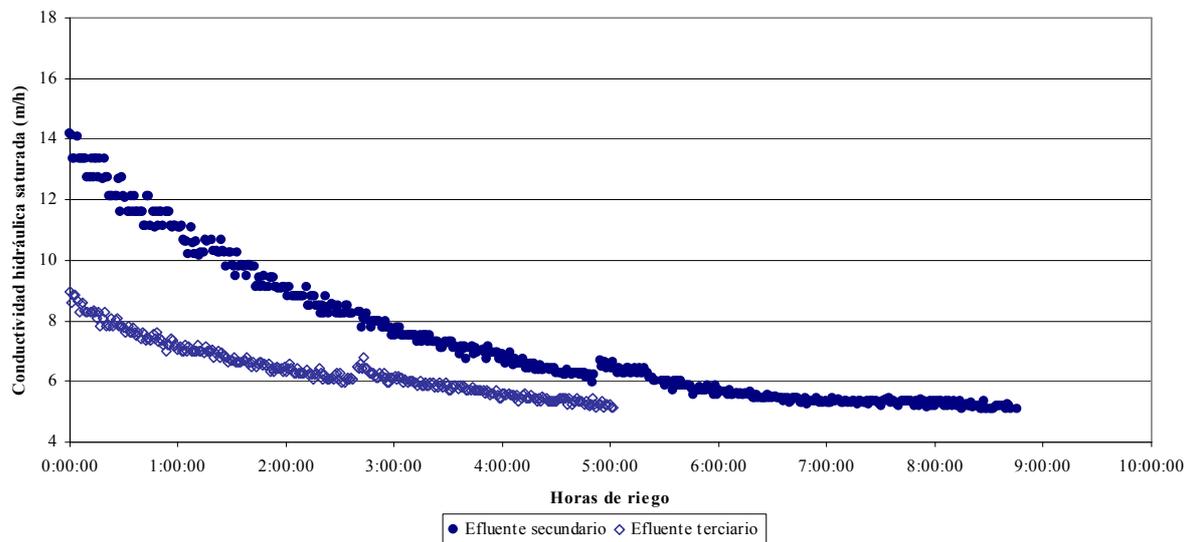


Figura 5.28. Evolución de la conductividad hidráulica saturada del medio filtrante del filtro de arena durante un ciclo de filtrado.

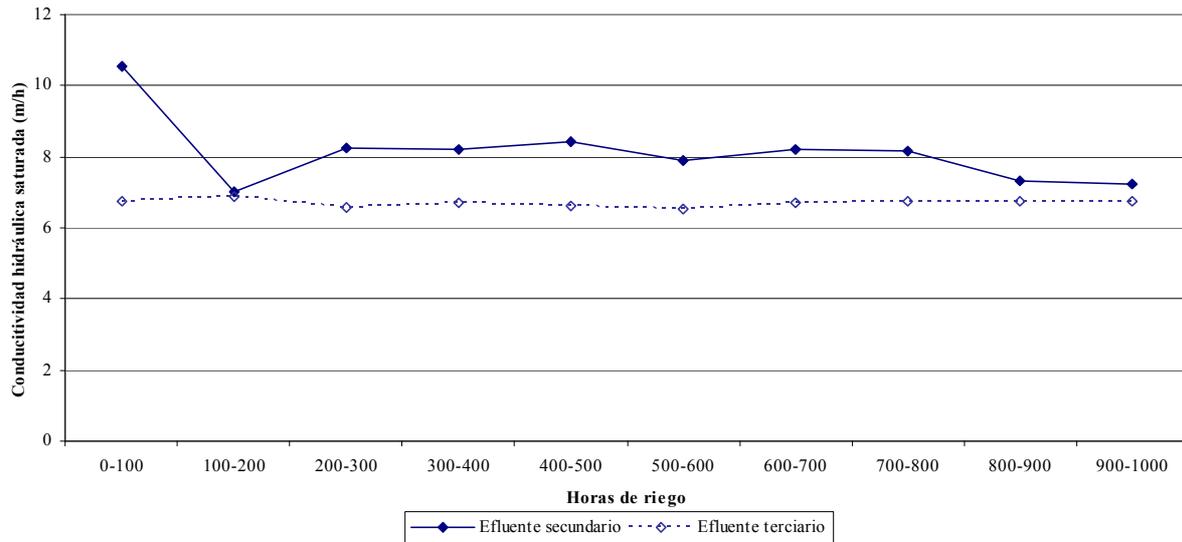


Figura 5.29. Evolución de la conductividad hidráulica saturada de la arena del filtro durante la realización de los ensayos con efluente secundario y terciario.

Se calculó el diámetro de poro del medio filtrante según la ecuación de Poiseuille (ecuación 4-V). En la Figura 5.30 se presenta la evolución de este valor en un ciclo de filtrado y en la Figura 5.31 se presenta su variación a lo largo de los dos ensayos. En el ensayo con efluente terciario el medio granular tenía un diámetro de poro inferior al obtenido en el ensayo con efluente secundario, lo que podría explicar que en este ensayo se obtuvieran mayores reducciones de los sólidos en suspensión del efluente según se indica en la Tabla 5.10. El diámetro del poro calculado fue, al inicio de los ensayos, 20 μm mayor en el ensayo con efluente secundario que en el ensayo con el efluente terciario, mientras que al final de los ensayos esta diferencia se redujo a 3 μm . Este hecho, coincidió con que el medio granular utilizado en el ensayo con efluente terciario tenía, al principio del ensayo, una mayor proporción de partículas finas (diámetro efectivo de 0.27 mm) que el medio utilizado en el ensayo con efluente secundario (diámetro efectivo de 0.40 mm) y, que al final de los ensayos, los dos medios presentaron unos porcentajes de partículas finas similares (0.41 y 0.52 mm de diámetro efectivo en el ensayo con efluente secundario y terciario, respectivamente), tal y como se ha presentado en el apartado 5.2.3.

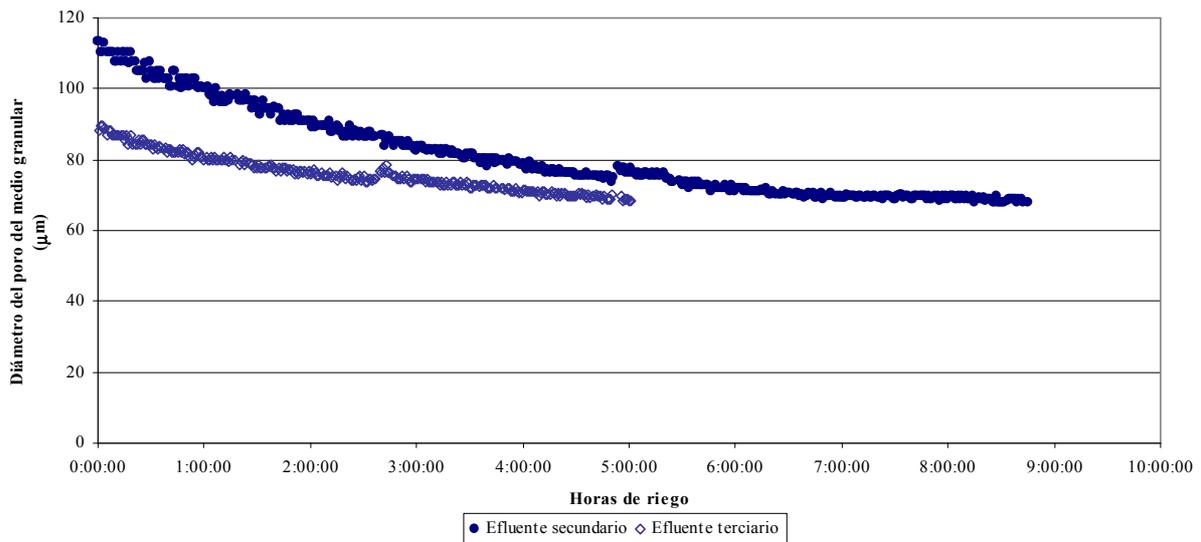


Figura 5.30. Evolución del tamaño del poro de filtración del medio filtrante de un filtro de arena durante un ciclo de filtrado con efluente secundario y efluente terciario.

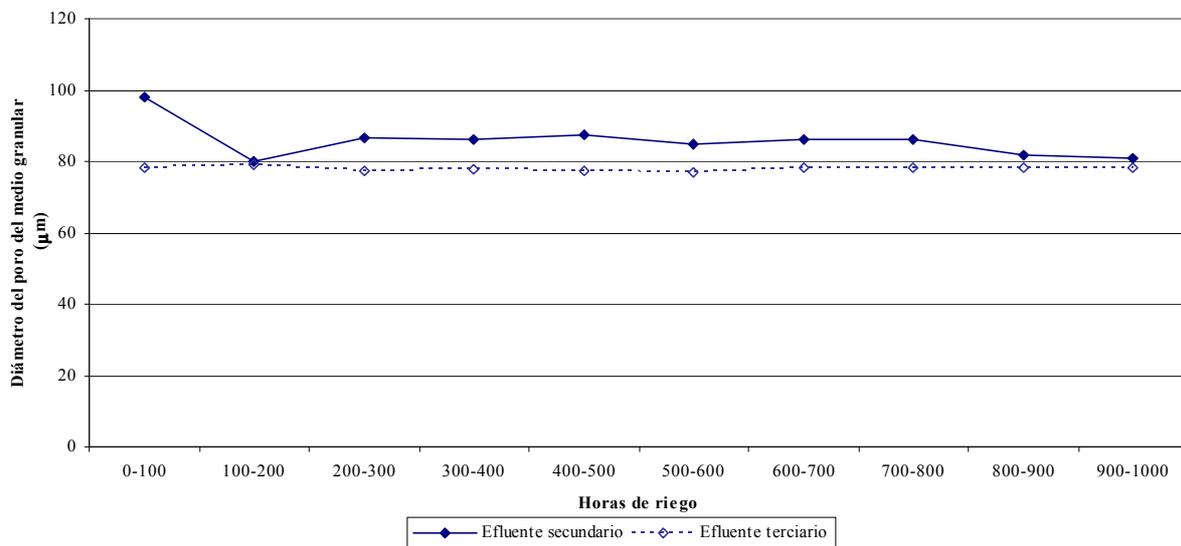


Figura 5.31. Evolución del diámetro del poro del medio granular durante la realización del ensayo con efluente secundario y terciario.

5.2.5. Evolución de la pérdida de carga en función del volumen de agua filtrada

La caída de presión producida en los filtros en función del volumen filtrado se determinó a partir de los registros en continuo de estos parámetros a la entrada y salida de los distintos sistemas de filtración. En la Figura 5.32, Figura 5.33 y Figura 5.34 se presenta su evolución en los sistemas de filtración de arena, anillas y malla, respectivamente. No se muestran los datos del sistema combinado porque la caída de presión registrada por los transductores (Figura 4.5) fue la del conjunto del filtro de malla y anillas, sin que se pudiera discriminar la provocada individualmente. En todos los casos la pérdida de carga aumentó al incrementarse el volumen de agua filtrada hasta que llegó a un máximo a partir del cual se realizó un lavado del filtro.

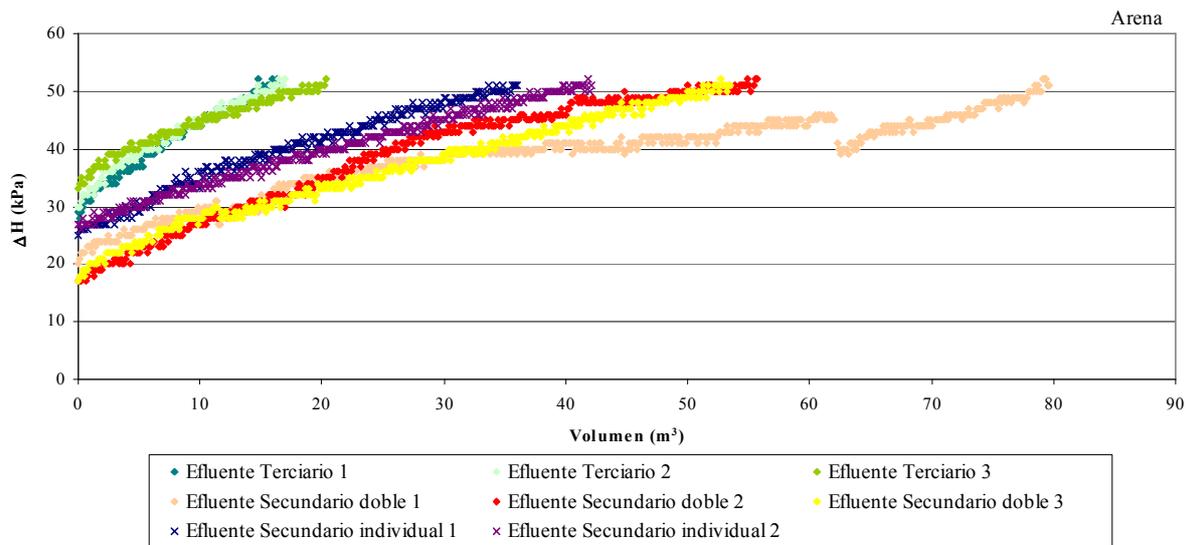


Figura 5.32. Evolución de la caída de presión en el filtro de arena en algunos ciclos de filtración del ensayo con efluente secundario y terciario.

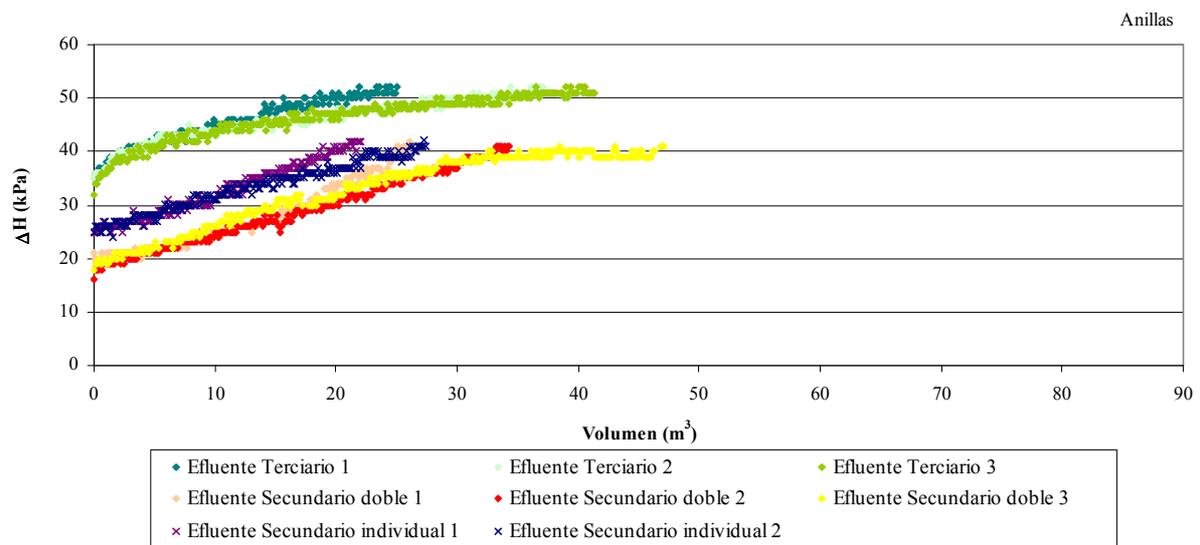


Figura 5.33. Evolución de la caída de presión en el filtro de anillas en algunos ciclos de filtración del ensayo con efluente secundario y terciario.

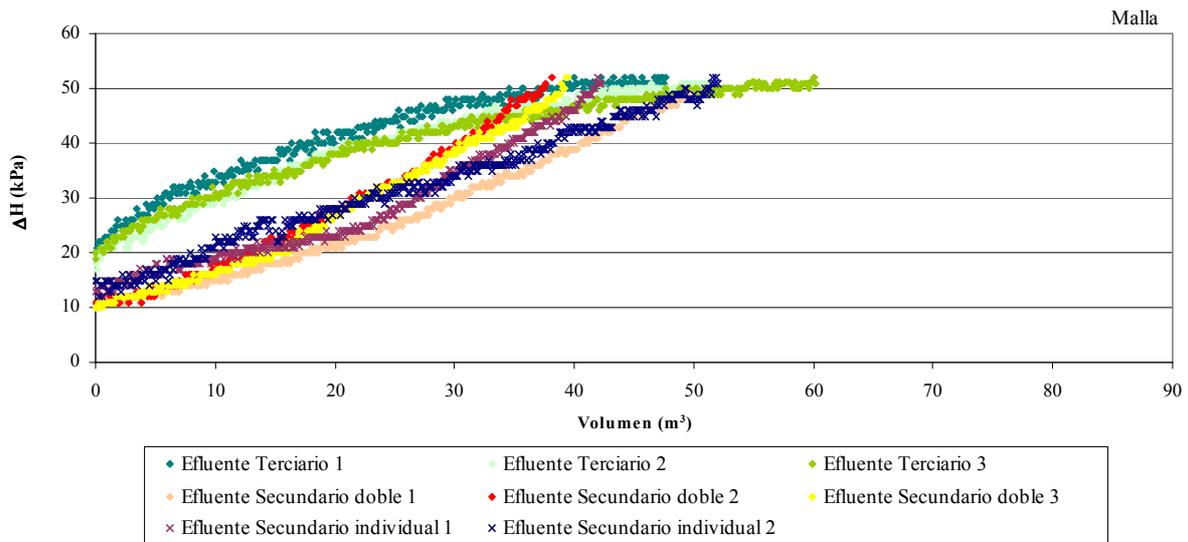


Figura 5.34. Evolución de la caída de presión en el filtro de mallas en algunos ciclos de filtración del ensayo con efluente secundario y terciario.

De estas figuras se extrae que, aunque la media del tamaño de partículas de los efluentes secundario y terciario era de 3.51 y 3.03 μm (Tabla 5.7), menor que el tamaño del poro de los filtros de anillas y malla (130 y 120 μm , respectivamente) y el diámetro efectivo de la arena (entre 270 y 400 μm) y que sólo el sistema de filtración de arena redujo significativamente el valor de entrada de los sólidos en suspensión (apartado 5.2.1), los tres filtros utilizados se obturaron, como ya observaron Puig-Bargués *et al.* (2005b).

La caída de presión inicial producida por la filtración del efluente terciario en el filtro de arena fue superior a la observada con el efluente secundario (Figura 5.32). Además, con el efluente terciario, los ciclos fueron más cortos (apartado 5.2.2) y con una mayor pendiente. En el ensayo con efluente secundario, la pérdida de carga inicial en el funcionamiento individual fue mayor que en el funcionamiento doble. Por tanto, se verificó que a mayor presión de funcionamiento, mayor pérdida de presión al inicio del ciclo.

En la evolución del ciclo de filtración del ensayo con filtro de arena, efluente secundario y funcionamiento doble número 1 presentado en la Figura 5.32 se pueden observar los escalones provocados por los cambios de sesión de riego. El hecho de mantener el riego cerrado durante unas horas hasta la siguiente sesión de riego, provocaba que al reiniciarlo, la caída de presión no era exactamente la misma que la presentada antes de la parada. Este fenómeno se presentó en todos los sistemas de filtración.

Los ciclos del sistema de filtración con anillas (Figura 5.33) del ensayo con efluente secundario se terminaron a 40 kPa de caída de presión mientras que en el ensayo con efluente terciario los ciclos alcanzaron los 50 kPa. Se fijó el valor límite de caída de presión de 40 kPa con el efluente secundario para facilitar el lavado ya que el sistema trabajó a menor presión. Al igual que con el sistema de filtración de arena, la caída de presión al comenzar los ciclos del ensayo con efluente terciario fue mayor que la de los ciclos con efluente secundario y, dentro de éstos, con el funcionamiento individual mayor que con el doble.

Siguiendo la misma tendencia observada con los sistemas de filtración de arena y anillas, en el sistema de filtración de malla (Figura 5.34) a mayor presión de funcionamiento, mayor

pérdida de carga al inicio de los ciclos. Sin embargo, en este caso, la diferencia entre el funcionamiento doble e individual del ensayo con efluente secundario no fue tan grande.

De las evoluciones de la pérdida de presión en función del volumen presentadas para cada sistema de filtración y efluente, destaca que con el sistema de filtración de arena todos los ciclos tuvieron una tendencia convexa. Para los sistemas de filtración de anillas y malla con efluente terciario, las evoluciones presentaron una tendencia a la convexidad, mientras que con efluente secundario se tendió más a la concavidad. Varios autores realizaron ensayos de filtración con distintos filtros (apartado 2.2), pero no comentaron nada acerca la tendencia cóncava o convexa que seguía la curva de pérdida de presión en función del volumen. En experimentos con filtros de arena (Adin y Elimelech, 1989), filtros de arena a baja velocidad (Adin, 2003) y filtros de malla (Adin y Alon, 1986), la pérdida de presión era exponencial. Otros autores sólo destacan que se produjo un crecimiento continuo de la pérdida de presión en filtros de arena, malla (Ravina *et al.*, 1995) y anillas (Ravina *et al.*, 1995; Ribeiro *et al.*, 2004). Por su lado, Arviza *et al.* (2007), monitorizando en continuo los cabezales de filtración mediante anillas en redes colectivas de demanda variable, observaron que la pérdida de carga se incrementaba de forma gradual hasta que, en los últimos minutos, aumentaba de forma no lineal. Cuando la presión a la entrada y a la salida del sistema de filtración se incrementó, aumentó también la pérdida de carga en el filtro, lo que coincide con lo registrado en los presentes ensayos.

5.2.6. Índices de filtrabilidad

El índice de filtrabilidad de los ciclos de filtración se calculó con la ecuación 4-X. Este índice es indicativo de la resistencia de los filtros a obturarse. Si bien fue desarrollado para filtros de malla, se puede aplicar en filtros de arena si la velocidad de filtración es baja, como indica Adin (2003). Este autor aplicó este índice en sus ensayos, en los cuales la velocidad de filtración era de 0.15 m/h, pero no indicó qué rango de velocidades era considerado como bajo. En el presente ensayo, la velocidad de filtración del filtro de arena (unos 6 l/m²·s o 22 m/h) fue más baja que la de los sistemas de filtración de anillas y malla (entre 12 y 23 l/m²·s o 43 y 83 m/h) (Tabla 4.2). Puig-Bargués (2003) en sus ensayos con el sistema de filtración de arena y distintos efluentes y unas velocidades de filtración superficial bajas (entre 11 y 15 m/h) también utilizó este índice obteniendo unos buenos ajustes.

En la Figura 5.35 se presenta la evolución de los índices de filtrabilidad para cada sistema de filtración a lo largo de los ensayos con los dos efluentes. El filtro de malla, sobre todo con el efluente secundario, fue el que presentó una evolución más irregular. Con los sistemas de filtración de arena y anillas con el efluente terciario, se observó que el índice de filtrabilidad aumentó, especialmente en el filtro de arena, a partir de las 600 h de riego. Esto coincidió con que los ciclos de filtración de estos sistemas con este efluente se acortaban (apartado 5.2.2). Esta relación se explica porque, cuando mayor era el índice de filtrabilidad, menor era el volumen filtrado hasta que el filtro se obturaba. En el ensayo con efluente secundario, los sistemas de filtración de arena y anillas presentaron una evolución más regular y sin un aumento destacable del índice de filtrabilidad a lo largo del experimento.

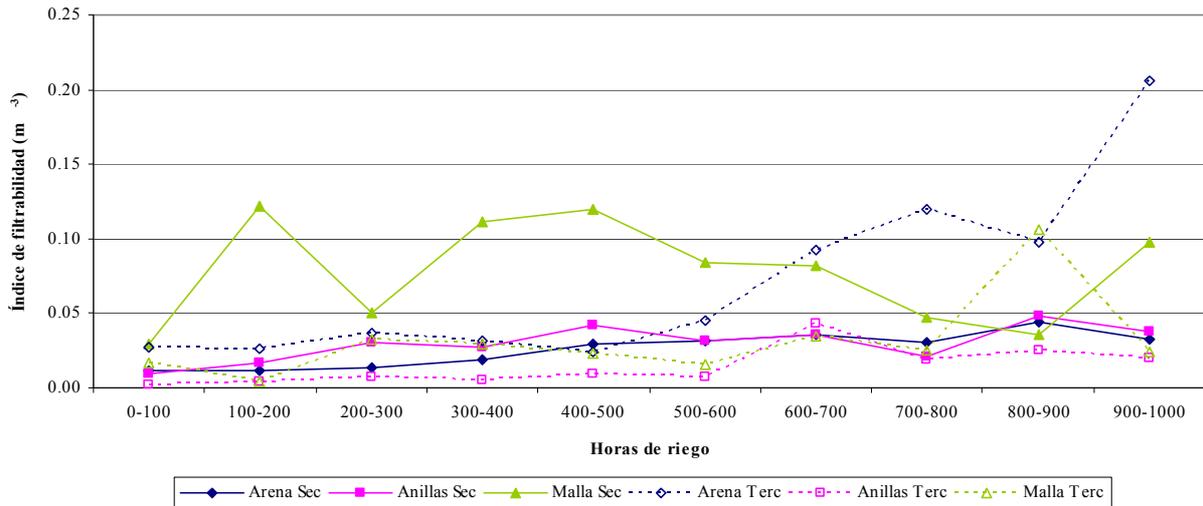


Figura 5.35. Evolución de los índices de filtrabilidad de los distintos filtros utilizados durante la realización del ensayo con efluente secundario y terciario.

En la Tabla 5.19 se muestran las medias de los coeficientes de regresión obtenidos en los ajustes para la obtención de los índices de filtrabilidad de los distintos filtros utilizados en los dos ensayos realizados. Todas las regresiones fueron estadísticamente significativas ($P < 0.05$) y con coeficientes de regresión medios superiores a 0.92 en todos los casos lo que indica que la relación de Boucher se puede aplicar a las velocidades ensayadas.

Tabla 5.19. Media del coeficiente de regresión obtenido en el ajuste para la determinación de los índices de filtrabilidad por cada sistema de filtración y efluente ensayado. Todas las regresiones fueron estadísticamente significativas ($P < 0.05$).

Sistema de filtración	Efluente secundario	Efluente terciario
Arena	0.97	0.98
Anillas	0.95	0.93
Malla	0.97	0.95

En la Figura 5.36 se presenta la media de mínimos cuadrados de los índices de filtrabilidad para cada tipo de filtración y para los dos efluentes ensayados. Se utilizó la media de mínimos cuadrados en lugar de la media directa por la gran diferencia de número de ciclos entre efluentes y sistemas de filtración. Con el sistema de filtración de malla y anillas se obtuvieron unos índices de filtrabilidad superiores en el ensayo con el efluente secundario aunque solamente se diferenciaron significativamente ($P < 0.05$) con el sistema de filtración de malla. En cambio, con el sistema de filtración de arena, el índice de filtrabilidad fue mayor en el ensayo con efluente terciario y significativamente diferente ($P < 0.05$) al obtenido con el efluente secundario.

En principio, el motivo por el cual se obtuvo un índice de filtrabilidad mayor con el sistema de filtración de arena en el ensayo con efluente terciario parecía que se podía atribuir a la mayor reducción de sólidos en suspensión realizada por este filtro en el ensayo con efluente terciario. Pero aunque esta reducción era superior en el ensayo con efluente terciario (66.63 %) que en la obtenida con el efluente secundario (47.30 %) (Tabla 5.10), el valor medio de sólidos en suspensión en el ensayo con efluente secundario (10.03 mg/l) fue mayor que en el ensayo con efluente terciario (6.49 mg/l) (Tabla 5.1) y, por tanto, la reducción en valores absolutos de sólidos en suspensión en el filtro, era de media 4.73 mg/l con el efluente

secundario y 4.30 mg/l con el efluente terciario. Estos valores tan parecidos no tenían porque provocar diferencias en los ciclos. Otro factor diferencial entre los ensayos con los dos efluentes fue el medio filtrante. En el apartado 4.9 se ha evidenciado que los dos medios fueron sensiblemente diferentes; el medio granular utilizado en el ensayo con efluente secundario presentó una mayor proporción de partículas finas, lo que aumenta las necesidades de lavado de un filtro de arena (Haman *et al.*, 1994). También cabe recordar que entre los dos ensayos hubo una diferencia de presión de trabajo (apartado 4.8.6) que provocó un aumento de la pérdida de carga al inicio de cada ciclo de filtración.

El hecho que con los sistemas de filtración de malla y anillas se obtuvieron unos menores índices de filtrabilidad en el ensayo con efluente terciario pudo ser debido a que el efluente secundario tenía una mayor concentración de sólidos en suspensión que el efluente terciario (Tabla 5.1), aunque ambos efluentes no se diferenciaron significativamente, y con ninguno de estos dos sistemas de filtración se obtuvieron reducciones de estos parámetros. El efluente secundario presentó un número menor de partículas (Tabla 5.5), pero con una mediana de la distribución del volumen (Tabla 5.8) significativamente ($P < 0.05$) mayor. Otro factor que pudo provocar la variación del índice de filtrabilidad entre el ensayo con efluente secundario y terciario, fue la diferencia entre las presiones de trabajo del sistema (apartado 4.8.6). La mayor presión de los ensayos con efluente terciario pudo provocar una menor obturación de los filtros de malla y anillas gracias a la mayor circulación de partículas a través del elemento filtrante. El origen orgánico de las partículas de los efluentes ensayados, pudo provocar su deformación, de forma que pudiesen atravesar los filtros. Otro posible efecto de la mayor presión de trabajo pudo ser que los sistemas de malla y anillas ejecutaran unos lavados más eficientes. En esta línea, en el ensayo con efluente secundario se observó un aumento de la eficiencia de los lavados (Tabla 5.14) al pasar del funcionamiento doble, con menor presión, a individual, con mayor presión.

Los índices de filtrabilidad del sistema de filtración de malla fueron mayores a los obtenidos con el sistema de filtración de anillas con los dos efluentes ensayados, aunque sólo se diferenciaron significativamente ($P < 0.05$) en el ensayo con efluente secundario. Puig-Bargués (2003) también observó que los filtros de malla se obturaban más que los de anillas en ensayos con distintos efluentes secundarios procedentes de distintas estaciones depuradoras, lo que atribuyó a la mayor rapidez con que se formaba una torta de filtración de mayor grosor en este tipo de filtro.

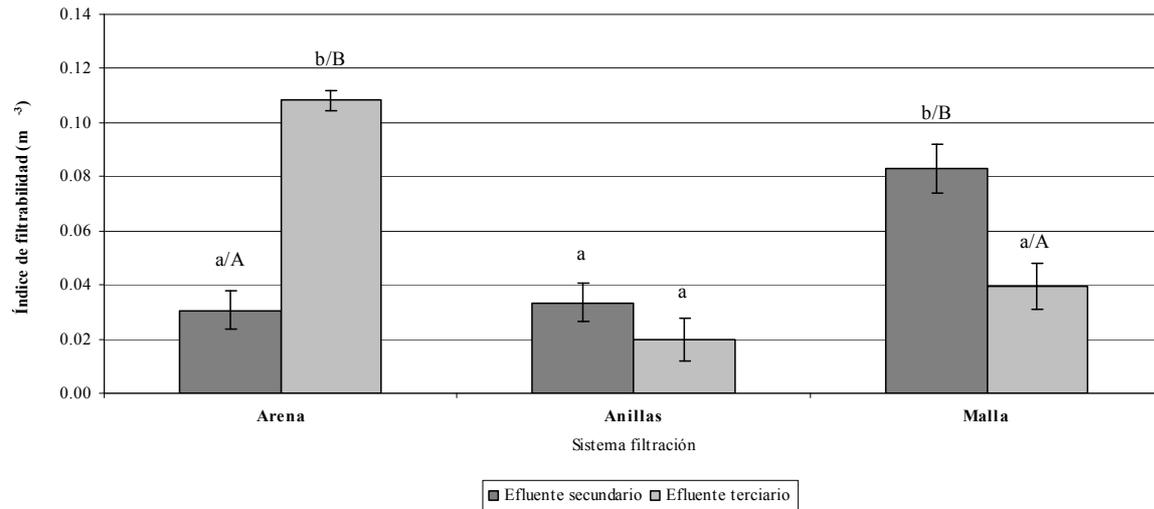


Figura 5.36. Media de mínimos cuadrados y error estándar del índice de filtrabilidad obtenido por los distintos sistemas de filtración al final del ensayo con efluente secundario y terciario. Para cada sistema de filtración, letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas ($P < 0.05$) entre los índices de filtrabilidad obtenidos en los ensayos con los dos efluentes. Para cada tipo de efluente ensayado, letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas ($P < 0.05$) entre los índices de filtrabilidad obtenidos con los distintos sistemas de filtración.

5.2.7. Análisis dimensional de la filtración

Puig-Bargués (2003) definió la ecuación 4-XII obtenida mediante análisis dimensional (apartado 4.15.1), como la que mejor relacionaba las variables medidas en sus experimentos. Ajustando la ecuación con los datos experimentales halló tres ecuaciones (4-XIII, 4-XIV y 4-XV), para el filtro de arena, anillas y malla, respectivamente, con las que explicaba el fenómeno de la filtración. Aunque también encontró una única ecuación válida para los tres filtros, ésta no se estimó por considerar que los tres tipos de filtros tenían un comportamiento suficientemente distinto, siendo preferible utilizar una ecuación particularizada para cada uno de ellos (Puig-Bargués *et al.*, 2005d).

Se decidió volver a ajustar la ecuación 4-XII encontrada por Puig-Bargués (2003) con los datos de cada filtro utilizado en el presente ensayo porque las condiciones experimentales eran distintas. En concreto, en los ensayos de este trabajo, las velocidades de filtración (Tabla 4.2) para los filtros de arena, anillas y malla estuvieron respectivamente, entre 2 y 3 $l/m^2 \cdot s$, 1 y 11 $l/m^2 \cdot s$ y 4 y 19 $l/m^2 \cdot s$ superiores a las registradas por Puig-Bargués (2003). Por otra parte, se desarrollaron otras ecuaciones con nuevos números adimensionales.

En la Tabla 5.20 se presentan los coeficientes de regresión ajustados y de variación de los ajustes con la ecuación 4-XII obtenida por Puig-Bargués (2003) (apartado 4.15.1) y las nuevas relaciones 4-XVII, 4-XIX, 4-XX y 4-XXI presentadas en el apartado 4.15.2.

Tabla 5.20. Coeficientes de regresión ajustados (R^2) y coeficientes de variación (CV) de las diferentes relaciones dimensionales ensayadas para los distintos filtros utilizados ($P < 0.001$).

Filtro	Ecuación									
	4-XII		4-XVII		4-XIX		4-XX		4-XXI	
	R^2	CV	R^2	CV	R^2	CV	R^2	CV	R^2	CV
Arena	0.998	-0.439	0.245	1.486	0.592	1.093	0.592	1.093	0.999	-0.076
Anillas	0.988	-1.255	0.193	1.830	0.418	1.554	0.418	1.554	0.993	-0.210
Malla	0.979	-1.461	0.056	3.631	0.336	3.015	0.336	3.045	0.994	-0.250

Las ecuaciones que presentaron unos mejores coeficientes de regresión y unos menores coeficientes de variación fueron la ecuación 4-XII obtenida por Puig-Bargués (2003) y la ecuación 4-XXI desarrollada en esta tesis doctoral. Además, las dos ecuaciones no presentaron estructura en el gráfico de residuos de la predicción. Las otras relaciones presentadas en las ecuaciones 4-XVII, 4-XIX y 4-XX presentaron unos ajustes muy inferiores e incluso, en algún caso, estructura en el gráfico de residuos. En estas ecuaciones está explícito el número de Reynolds y el de Euler. En cambio, en las ecuaciones 4-XII y 4-XXI no aparecen explícitos estos dos números adimensionales. Aunque en la Tabla 5.20 no se presentan, también se ajustaron a los datos experimentales todas las distintas combinaciones de los números adimensionales de cada ecuación obteniéndose peores resultados.

A diferencia de lo presentado por Puig-Bargués (2003), dónde no había ningún número adimensional elevado a cero o cercano a cero, en el presente trabajo, el número adimensional que introducía el diámetro de paso del agua a través del filtro de anillas y malla (ϕ_f) sí lo

estaba, lo que implicaba que el número adimensional $\left(\frac{\Delta H^{\frac{1}{4}} \cdot \phi_f}{C^{\frac{1}{4}} \cdot Q^{\frac{1}{2}}} \right)$ tenía un efecto lineal. Esto

se debe a que, en los presentes ensayos, los filtros de anillas y malla se utilizaron con un único nivel de filtración, mientras que Puig-Bargués (2003) utilizó 4 diámetros de paso para el filtro de malla y 3 para el de anillas. Este mismo exponente para la ecuación del filtro de arena 5-III tomó un valor distinto a cero porque con el diámetro efectivo de la arena (apartado 4.15.1) fue diferente en función del efluente ensayado (apartado 4.9).

Otro número adimensional que se presentó elevado a un número muy cercano a cero en las

tres ecuaciones ajustadas fue el $\left(\frac{\Delta H^{\frac{3}{4}} \cdot V}{C^{\frac{3}{4}} \cdot Q^{\frac{3}{2}}} \right)$. Este número introducía el volumen filtrado (V) y

puede que su variabilidad ya estuviera introducida por la variable caudal filtrado (Q).

El número adimensional $\left(\frac{\Delta H^{\frac{1}{4}} \cdot d_p}{C^{\frac{1}{4}} \cdot Q^{\frac{1}{2}}} \right)$, que incorporaba el diámetro de partícula del efluente

(d_p), también estuvo elevado a un exponente cercano a cero. Esto podría ser debido a la baja variabilidad de la media del tamaño de partícula medida. En la Tabla 5.7 se puede observar que este valor osciló entre los 3.0 y 3.5 μm . Por su parte, Puig-Bargués (2003) utilizó distintos efluentes con diámetros medios de partícula que variaron de los 3.5 a los 10.1 μm , con un mayor rango de tamaño medio de partícula.

Así, la ecuación 4-XII ajustada a los datos del presente ensayo para el filtro de arena fue:

$$\frac{\mu}{\Delta H^{\frac{1}{4}} \cdot Q^{\frac{1}{2}} \cdot C^{\frac{3}{4}}} = 3.595 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{\Delta H^{\frac{3}{4}} \cdot V}{C^{\frac{3}{4}} \cdot Q^{\frac{3}{2}}} \right)^{-0.005} \cdot \left(\frac{\Delta H^{\frac{1}{2}} \cdot A}{C^{\frac{1}{2}} \cdot Q} \right)^{-0.460} \cdot \left(\frac{\Delta H^{\frac{1}{4}} \cdot \phi_f}{C^{\frac{1}{4}} \cdot Q^{\frac{1}{2}}} \right)^{0.078} \cdot \left(\frac{\Delta H^{\frac{1}{4}} \cdot d_p}{C^{\frac{1}{4}} \cdot Q^{\frac{1}{2}}} \right)^{0.022} \cdot \left(\frac{\rho}{C} \right)^{0.959}$$

5-III

Para el filtro de anillas fue:

$$\frac{\mu}{\Delta H^{\frac{1}{4}} \cdot Q^{\frac{1}{2}} \cdot C^{\frac{3}{4}}} = 1.999 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{\Delta H^{\frac{3}{4}} \cdot V}{C^{\frac{3}{4}} \cdot Q^{\frac{3}{2}}} \right)^{-0.005} \cdot \left(\frac{\Delta H^{\frac{1}{2}} \cdot A}{C^{\frac{1}{2}} \cdot Q} \right)^{-0.439} \cdot \left(\frac{\Delta H^{\frac{1}{4}} \cdot d_p}{C^{\frac{1}{4}} \cdot Q^{\frac{1}{2}}} \right)^{0.005} \cdot \left(\frac{\rho}{C} \right)^{0.94}$$

5-IV

Y para el filtro de malla:

$$\frac{\mu}{\Delta H^{\frac{1}{4}} \cdot Q^{\frac{1}{2}} \cdot C^{\frac{3}{4}}} = 4.351 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{\Delta H^{\frac{3}{4}} \cdot V}{C^{\frac{3}{4}} \cdot Q^{\frac{3}{2}}} \right)^{0.001} \cdot \left(\frac{\Delta H^{\frac{1}{2}} \cdot A}{C^{\frac{1}{2}} \cdot Q} \right)^{-0.480} \cdot \left(\frac{\Delta H^{\frac{1}{4}} \cdot d_p}{C^{\frac{1}{4}} \cdot Q^{\frac{1}{2}}} \right)^{0.033} \cdot \left(\frac{\rho}{C} \right)^{0.902}$$

5-V

La relación 4-XXI obtuvo unos coeficientes de regresión elevados y los menores coeficientes de variación (Tabla 5.20). Al igual que lo sucedido en los ajustes de la ecuación 4-XII el número adimensional $\left(\frac{\phi_f}{d_t} \right)$, que introducía el diámetro de paso del efluente a través del filtro (ϕ_f), presentó un exponente igual a cero con el filtro de malla y anillas, pero no con el de arena, con el que el diámetro efectivo varió. El número adimensional $\left(\frac{A}{d_t^2} \right)$, que incorporaba el área de filtración (A), constante a lo largo de todos los ensayos para cada filtro, también presentó un exponente igual a cero. También se encontró que el número $\left(\frac{V}{d_t^3} \right)$, que introducía el volumen filtrado (V) estaba elevado a un valor cercano a cero, probablemente por estar relacionado con la velocidad de filtración (v), y la sección de paso del agua (A). Por lo que se refiere al diámetro de las partículas (d_p) introducido en los tres tipos de filtro con el número adimensional $\left(\frac{d_p}{d_t} \right)$, también presentó unos exponentes cercanos a cero, debido a la baja variabilidad del d_p .

Las relaciones que se obtuvieron son:

Para el filtro de arena:

$$\frac{v \cdot C^{\frac{1}{2}}}{\Delta H^{\frac{1}{2}}} = 355.754 \cdot \left(\frac{\rho}{C}\right)^{-1.031} \cdot \left(\frac{\mu}{\Delta H^{\frac{1}{2}} \cdot C^{\frac{1}{2}} \cdot d_t}\right)^{1.064} \cdot \left(\frac{\phi_f}{d_t}\right)^{-0.074} \cdot \left(\frac{V}{d_t^3}\right)^{0.004} \cdot \left(\frac{d_p}{d_t}\right)^{-0.024} \quad 5\text{-VI}$$

Para el filtro de anillas:

$$\frac{v \cdot C^{\frac{1}{2}}}{\Delta H^{\frac{1}{2}}} = 204.212 \cdot \left(\frac{\rho}{C}\right)^{-0.931} \cdot \left(\frac{\mu}{\Delta H^{\frac{1}{2}} \cdot C^{\frac{1}{2}} \cdot d_t}\right)^{0.916} \cdot \left(\frac{V}{d_t^3}\right)^{0.002} \cdot \left(\frac{d_p}{d_t}\right)^{0.022} \quad 5\text{-VII}$$

Y para el filtro de malla:

$$\frac{v \cdot C^{\frac{1}{2}}}{\Delta H^{\frac{1}{2}}} = 292.355 \cdot \left(\frac{\rho}{C}\right)^{-0.910} \cdot \left(\frac{\mu}{\Delta H^{\frac{1}{2}} \cdot C^{\frac{1}{2}} \cdot d_t}\right)^{0.980} \cdot \left(\frac{V}{d_t^3}\right)^{0.005} \cdot \left(\frac{d_p}{d_t}\right)^{-0.020} \quad 5\text{-VIII}$$

En la Figura 5.37 se presenta la evolución de la pérdida de presión de un ciclo de filtración del filtro de arena del ensayo con efluente secundario y su estimación según las ecuaciones 5-III y 5-VI.

Para realizar esta estimación se fijaron las siguientes variables:

$$\begin{aligned} \phi_f &: 0.0004 \text{ m} \\ d_p &: 0.00000325 \text{ m} \\ A &: 0.3926 \text{ m}^2 \\ d_t &: 0.0508 \text{ m} \\ Q &: 0.00236 \text{ m}^3/\text{s} \\ v &: 0.00601 \text{ m/s} \\ C &: 0.0087 \text{ kg/m}^3 \\ \mu &: 0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s} \\ \rho &: 998 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

Con estas condiciones, la pérdida de presión del sistema de filtración de arena calculada con la ecuación 5-III y 5-VI presentó una diferencia de 5 kPa pero un comportamiento muy parecido a lo largo del ciclo. Además, se observó que la evolución de la pérdida de presión registrada en un ciclo de filtración tenía un comportamiento muy similar a la estimada por las ecuaciones. En el ciclo registrado, las variables fueron las mismas excepto el diámetro medio de las partículas que era de 3.09 μm .

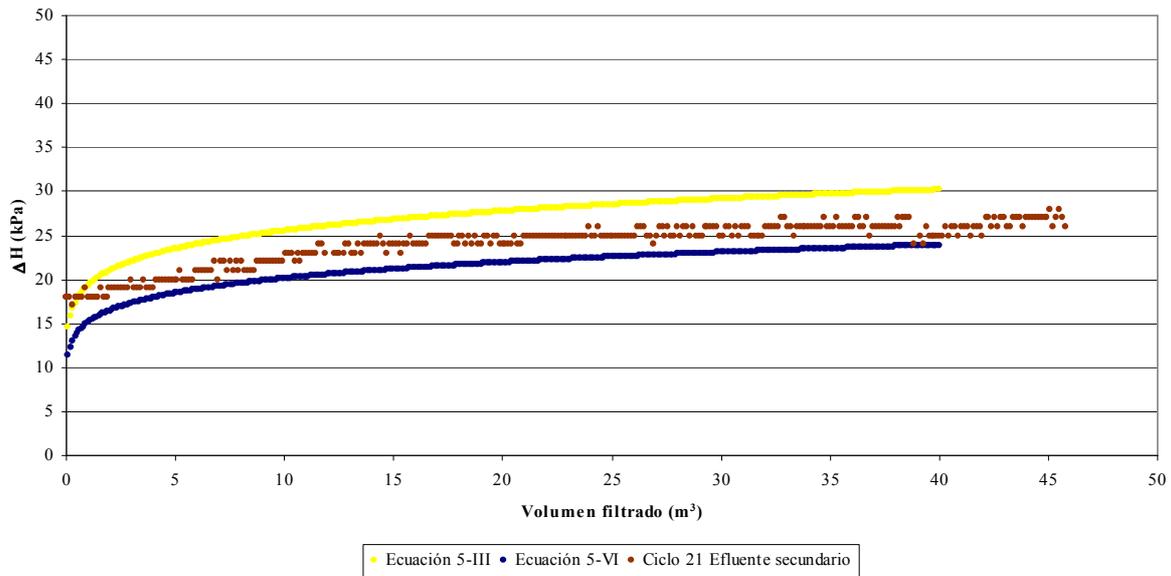


Figura 5.37. Evolución de la pérdida de presión en un ciclo del filtro de arena y estimación de esta evolución utilizando las ecuaciones 5-III y 5-VI.

En la Figura 5.38 se presenta la evolución de la pérdida de presión de un ciclo de filtración del filtro de malla del ensayo con efluente secundario y su estimación según las ecuaciones 5-V y 5-VIII.

Para realizar la estimación de la pérdida de presión en función del volumen para el filtro de malla, las variables que se fijaron fueron las mismas que para el filtro de arena excepto ϕ_f , A y v que se tomaron 0.00012 m, 0.11 m² y 0.02146 m/s, respectivamente.

Con el filtro de malla, la curva de la estimación de la pérdida de presión realizada con la ecuación 5-VIII presentó una pendiente mayor que la calculada con la ecuación 5-V. Este hecho representó que la ecuación 5-VIII indicaba una obturación más rápida del filtro. También se registró con el filtro de malla un ciclo con un comportamiento parecido al obtenido de la estimación. Este ciclo tenía las mismas variables, excepto el diámetro medio de partículas que era de 3.42 μm en lugar de 3.25 μm .

Las ecuaciones desarrolladas se han ajustado con los resultados experimentales, los cuales han estado sometidos a la gran variabilidad de los efluentes, como se ha comentado anteriormente. Para que la variabilidad no enmascare algunos de los fenómenos que se producen, sería interesante poder ensayar la obturación de los filtros en condiciones controladas de laboratorio, representativas de la operación con efluentes. Estas experiencias, sin embargo, están fuera del alcance de esta tesis doctoral.

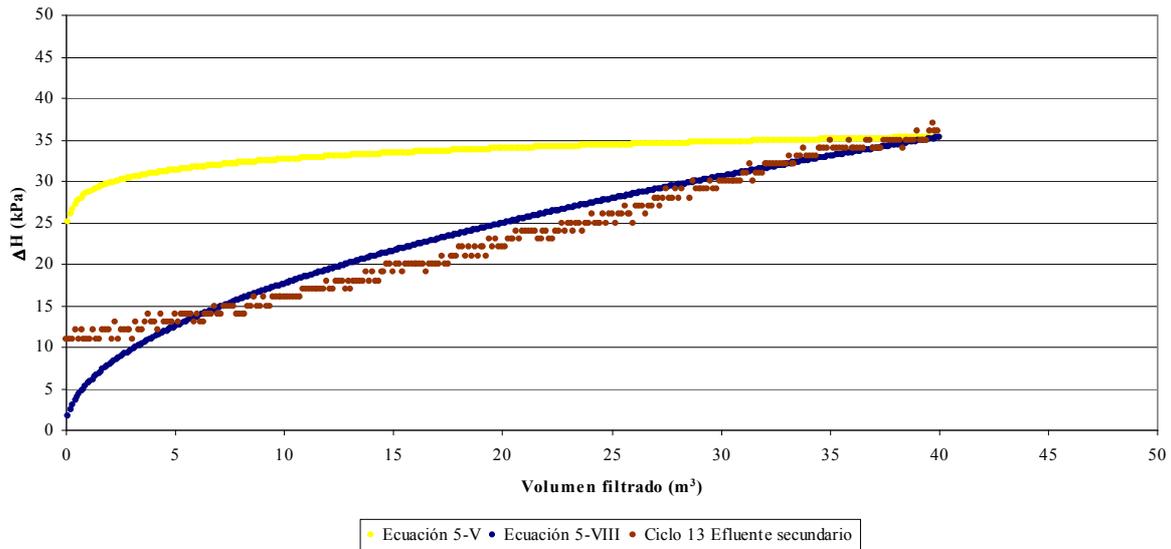


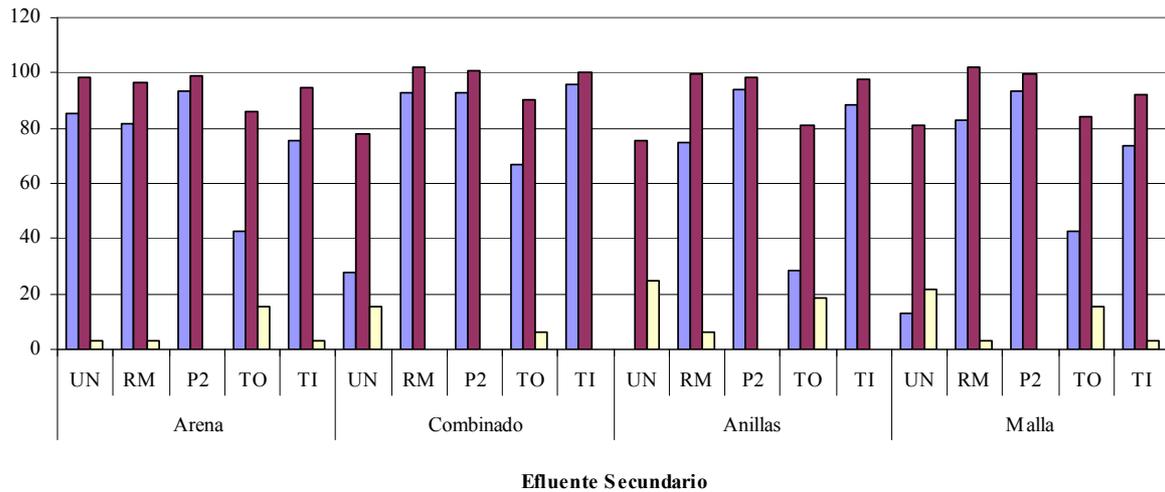
Figura 5.38. Evolución de la pérdida de presión en un ciclo del filtro de malla y predicción de esta evolución utilizando las ecuaciones 5-V y 5-VIII.

5.3. Comportamiento de los emisores

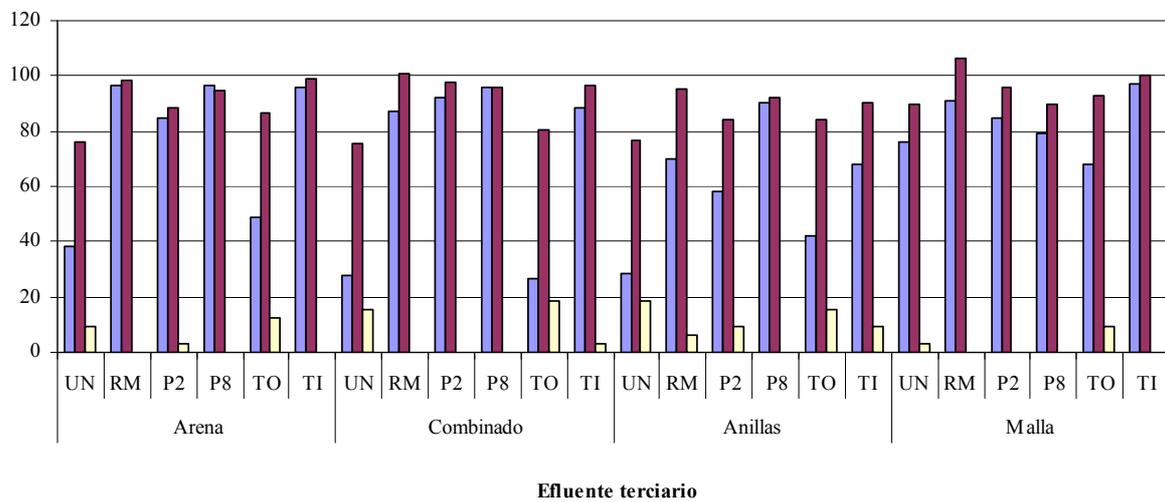
5.3.1. Indicadores de la obturación de las unidades de riego

Para analizar la obturación de las unidades de riego es importante establecer un parámetro de medida. Los indicadores utilizados son diferentes en los distintos estudios publicados (Tabla 2.6). En el presente trabajo se optó por determinar la uniformidad de emisión de caudales, el porcentaje de caudal inicial emitido y el porcentaje de emisores completamente obturados determinados como se indica en el apartado 4.16.2.

En la Figura 5.39 se comparan los resultados de los tres indicadores utilizados en función del sistema de filtración, del emisor ensayado y del efluente.



■ Uniformidad de emisión de caudales ■ Porcentaje caudal inicial □ Porcentaje de emisores completamente obturados



■ Uniformidad de emisión de caudales ■ Porcentaje caudal inicial □ Porcentaje de emisores completamente obturados

Figura 5.39. Uniformidad de emisión de caudales (UE), porcentaje de caudal inicial (q_{po}) y porcentaje de emisores completamente obturados (n_{tc}) a las 1000 h de ensayo para cada emisor, sistema de filtración y efluente utilizado.

La diferencia entre el valor de la UE de caudales y el porcentaje de caudal inicial fue mayor cuando se encontraron emisores completamente obturados porque, al aparecer éstos, el valor de la UE de caudales decrecía más que el porcentaje de caudal inicial. La explicación está en la ecuación 4-XXIII utilizada para el cálculo de la UE de caudales. En dicha ecuación se divide la media del caudal del 25 % de los emisores con un caudal más bajo entre la media de los caudales de todos los goteros. Los emisores completamente obturados provocaban una reducción del numerador de la ecuación y, en consecuencia, una disminución del valor de la UE de caudales resultante. En los casos que se detectaban más de cuatro posiciones con los dos emisores completamente obturados (25 %), la UE de caudales era del 0 %, como en el caso del emisor UN del sistema de filtración con anillas en el ensayo con efluente secundario.

Observada la relación entre los tres parámetros y detectada la gran influencia que ejercía el porcentaje de emisores completamente obturados sobre la *UE* de caudales, se decidió utilizar el porcentaje de caudal inicial como indicador de la medida de la obturación producida.

En la Figura 5.39 se han mostrado los resultados finales, si bien es importante conocer la evolución del comportamiento de los goteros a lo largo del experimento. Por ello, en la Figura 5.40 y en la Figura 5.41 se presentan para los ensayos con efluentes secundario y terciario, respectivamente, la evolución de la media del porcentaje de caudal inicial emitido por los distintos emisores muestreados en función del sistema de filtración utilizado.

El estudio de los factores que influyen en los resultados se expone con detalle en el siguiente apartado.

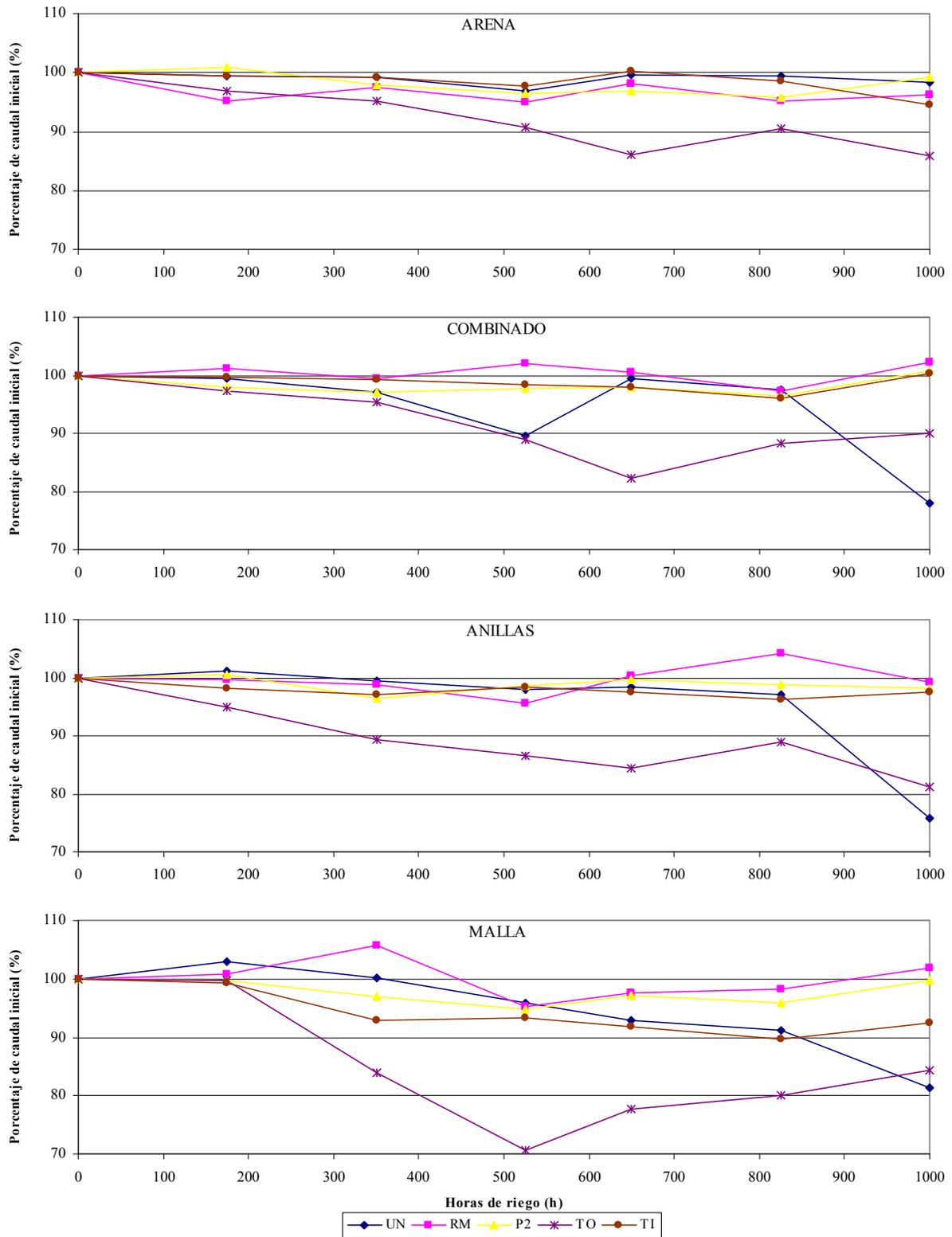


Figura 5.40. Evolución del porcentaje del caudal inicial de los distintos emisores en cada sistema de filtración utilizando efluente secundario.

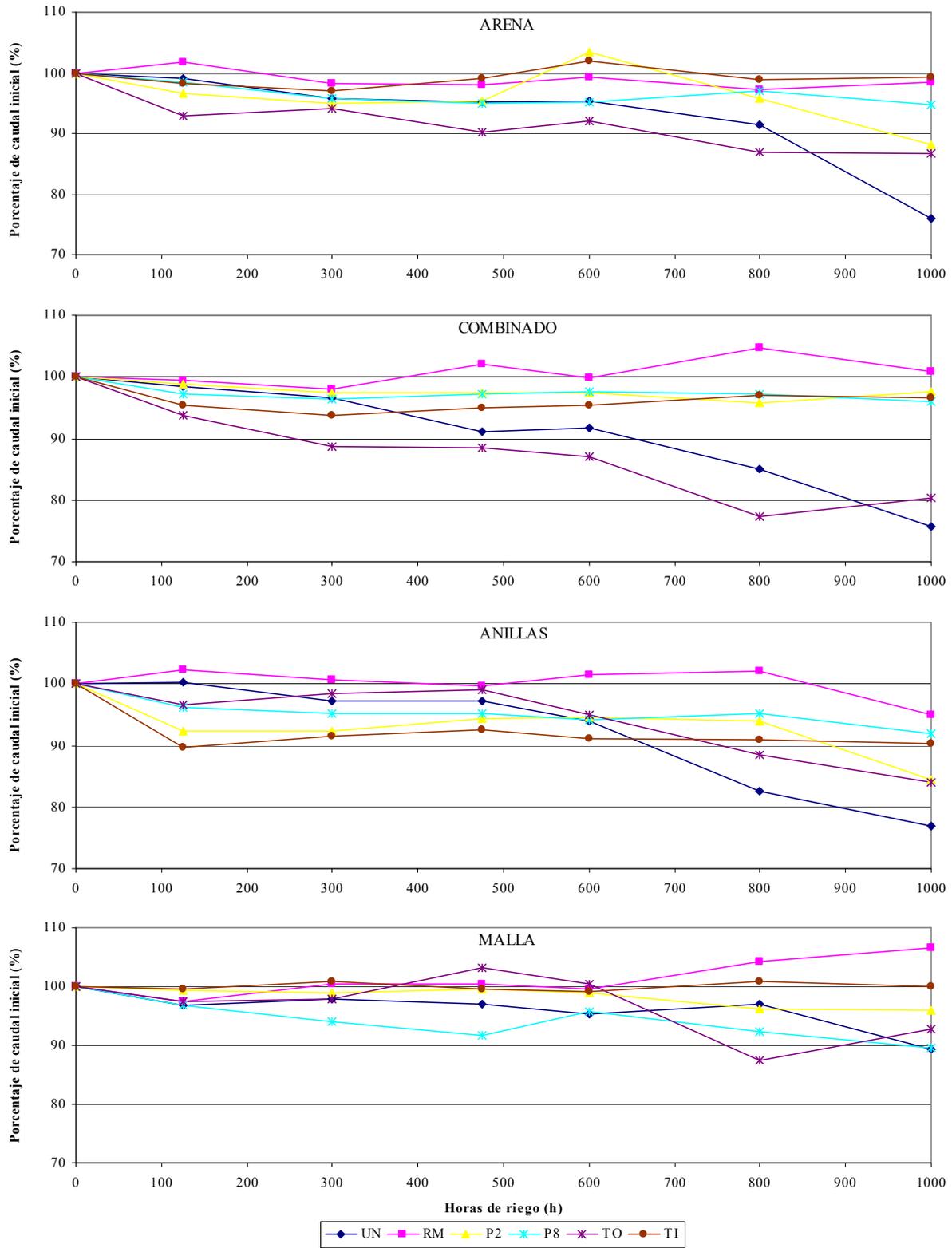


Figura 5.41. Evolución del porcentaje del caudal inicial de los distintos emisores en cada sistema de filtración utilizando efluente terciario.

5.3.2. Factores que influyen en la obturación de los emisores

Del análisis estadístico realizado para explicar la variación del porcentaje de caudal inicial en función de las variables del ensayo para cada uno de los efluentes, se extrajeron aquellos parámetros y sus interacciones que afectaron significativamente ($P < 0.05$) al valor del porcentaje de caudal inicial. Aunque la interacción triple (filtración, emisor y posición) tenía un efecto significativo al finalizar el ensayo con efluente secundario, esta interacción no se introdujo en el modelo definitivo por la dificultad que implicó su análisis y su pequeña contribución en la justificación del resultado final. Los resultados del estudio estadístico se presentan en la Tabla 5.21 y en la Tabla 5.22 para los efluentes secundario y terciario, respectivamente.

Tabla 5.21. Nivel de significación (P-valor) del modelo estadístico y de cada factor y sus interacciones para la explicación de la variabilidad del porcentaje del caudal inicial emitido en el ensayo con efluente secundario y para cada momento de muestreo.

	Horas de ensayo con efluente secundario					
	175	350	525	650	825	1000
<i>Modelo</i>	0.1428	0.0492	<0.0001	0.0039	0.0002	<0.0001
<i>Subunidad</i>	0.1803	0.7016	0.6121	0.9920	0.6232	0.5457
<i>Filtración</i>	0.4070	0.7282	0.0731	0.0879	0.0816	0.3664
<i>Emisor</i>	0.1931	0.0016	<0.0001	<0.0001	0.0006	<0.0001
<i>Posición</i>	0.5678	0.1225	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
<i>Filtración · Emisor</i>	0.7220	0.2979	0.2071	0.9854	0.8785	0.1474
<i>Filtración · Posición</i>	0.1281	0.9005	0.0897	0.1777	0.0211	0.1676
<i>Emisor · Posición</i>	0.3342	0.0002	0.0002	0.0002	0.0001	<0.0001

Tabla 5.22. Nivel de significación (P-valor) del modelo estadístico y de cada factor y sus interacciones para la explicación de la variabilidad del porcentaje del caudal inicial emitido en el ensayo con efluente terciario y para cada momento de muestreo.

	Horas de ensayo con efluente terciario					
	125	300	475	600	800	1000
<i>Modelo</i>	<0.0001	0.0156	0.0219	0.0005	<0.0001	<0.0001
<i>Subunidad</i>	0.3276	0.7375	0.5836	0.4926	0.3200	0.3116
<i>Filtración</i>	0.4999	0.0601	0.1271	0.1044	0.2108	0.0086
<i>Emisor</i>	0.0156	0.0485	0.0717	0.0216	<0.0001	<0.0001
<i>Posición</i>	<0.0001	0.0019	<0.0001	0.0031	<0.0001	<0.0001
<i>Filtración · Emisor</i>	0.0880	0.0875	0.0370	0.3077	0.2453	0.4867
<i>Filtración · Posición</i>	0.0007	0.0028	0.1999	0.0003	0.0034	<0.0001
<i>Emisor · Posición</i>	0.0006	0.0507	0.4597	0.0002	<0.0001	<0.0001

Al final de los ensayos se encontró un efecto significativo ($P < 0.05$) del emisor, de la posición y de la interacción de ambos parámetros con los dos efluentes. Además, con el efluente terciario fue significativo ($P < 0.05$) el efecto de la filtración y la interacción de ésta con la posición.

Con el efluente secundario los efectos del emisor y la interacción del emisor con la posición aparecieron a las 350 h de riego mientras que el efecto de la posición no se evidenció hasta las 525 h. Con el efluente terciario el efecto de la filtración apareció únicamente a las 1000 h de riego y el efecto del emisor, de la posición, de la interacción de la filtración con la posición y del emisor con la posición, en el primer control efectuado, a las 125 h de riego.

5.3.2.1. Efecto del emisor y la posición en el porcentaje de caudal inicial

En la Figura 5.42 se presenta el porcentaje de caudal inicial en función del tipo de emisor y su ubicación en las cuatro posiciones controladas del lateral después de 1000 h de ensayo con efluente secundario y terciario.

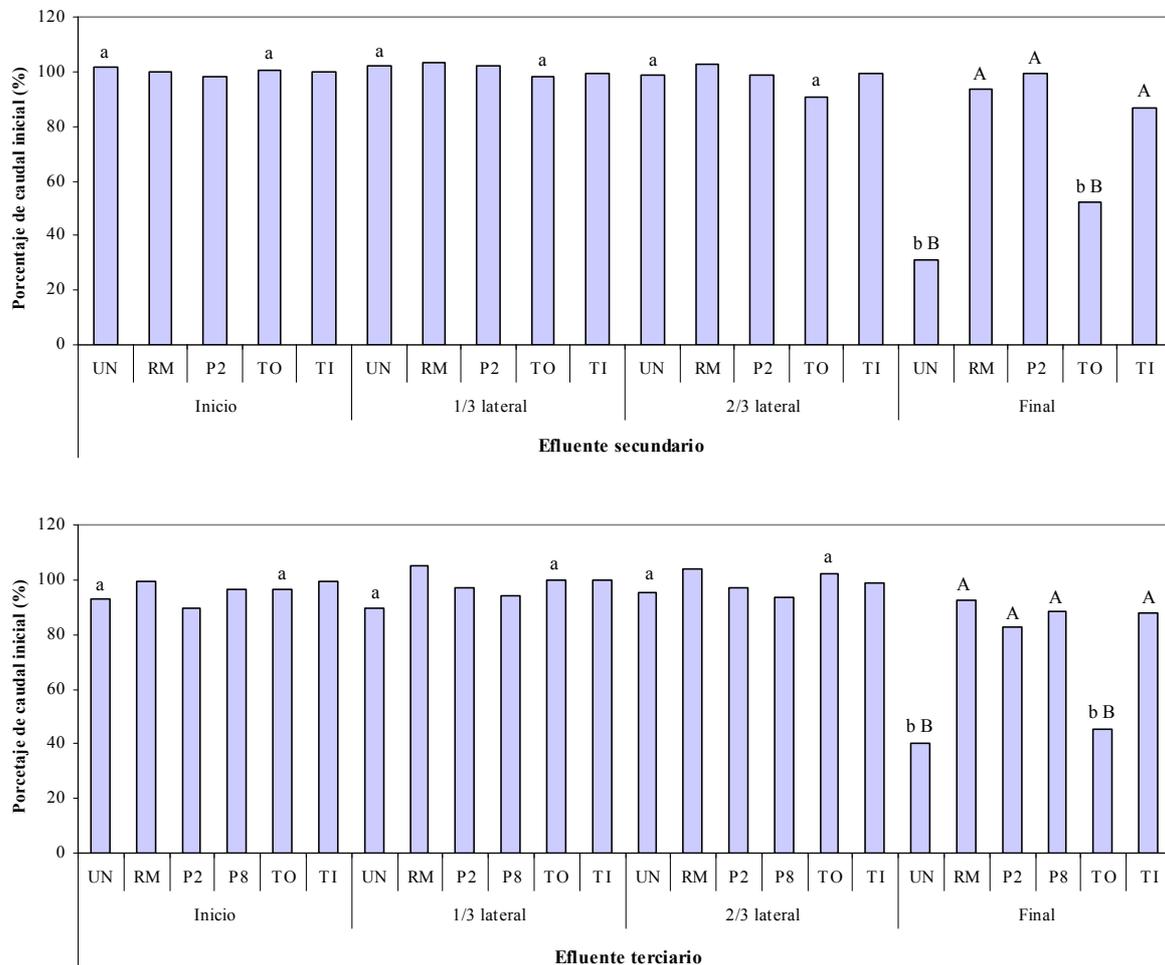


Figura 5.42. Porcentaje de caudal inicial al final del ensayo con efluente secundario y terciario en función del emisor y de su posición. Para cada efluente y emisor, letras minúsculas diferentes indican que existen diferencias significativas ($P < 0.05$) entre las posiciones de muestreo. Para efluente y posición de muestreo, letras mayúsculas diferentes indican que existen diferencias significativas ($P < 0.05$) entre emisores.

Al finalizar los ensayos únicamente se encontraron diferencias significativas ($P < 0.05$) debidas al tipo de emisor al final del lateral. En el resto de posiciones de control, los porcentajes de caudal inicial de los distintos emisores no se diferenciaron entre sí. Los emisores UN y TO fueron los dos únicos que mostraron al final del lateral un porcentaje de caudal inicial significativamente ($P < 0.05$) inferior al que obtuvieron en las otras posiciones. En concreto, los emisores TO y UN presentaron al final del lateral menos del 55 % del caudal inicial, mientras que el resto de emisores obtuvieron de media, con los cuatro sistemas de filtración, más del 83 % del caudal inicial. Son varios los estudios, que con agua de distintas procedencias, evidenciaron la mayor incidencia de los emisores obturados al final del lateral (Adin y Sacks, 1987; Ravina *et al.*, 1992, 1997; Schischa *et al.*, 1997; Trooien *et al.*, 2000) que se atribuye a la menor velocidad de circulación del efluente en las zonas finales del lateral, lo que facilita la sedimentación de partículas en el gotero (Shannon *et al.*, 1982).

Aunque al final de los ensayos los emisores TO y UN presentaron unos valores de caudal emitido parecidos, durante el ensayo mostraron un comportamiento distinto, como se puede observar en la Figura 5.40 y en la Figura 5.41. El emisor TO presentó las mayores reducciones de caudal a partir de las 350 h en todos los sistemas de filtración excepto los de malla y anillas con efluente terciario. Esta disminución del caudal emitido durante los ensayos coincidió con la progresiva aparición de emisores completamente obturados al final de los laterales, como indica la Figura 5.43 y la Figura 5.44. En el presente estudio, el emisor TO fue el que tenía una menor sección de paso del agua (Tabla 4.4), lo que se ha demostrado que provoca mayores disminuciones de caudal del lateral al operar con efluentes (Trooien *et al.*, 2000). En cambio, los emisores P2, P8, RM y TI, con mayores secciones de paso del agua, fueron los que presentaron unas menores disminuciones del caudal inicial y menor presencia de emisores completamente obturados. El emisor UN, si bien tenía una sección de paso del agua muy similar a la del gotero P2, tuvo al final de los ensayos mayores reducciones del porcentaje de caudal inicial y una evolución distinta al emisor TO. Este emisor sufrió las disminuciones de caudal a partir de las 800 h debido a un incremento del número de goteros obturados. Rowan (2004), trabajando con el gotero UN con agua residual sin tratar filtrada en un filtro de arena, no detectó la obturación de ningún gotero en las 233 h que duró su ensayo. En el presente estudio, había una mayor cantidad de goteros por lateral, tal y como se indica en la Tabla 4.3. Este hecho conllevó que por los laterales con el gotero UN circulase una mayor cantidad de agua, aunque no superior a la entrada del lateral con emisor P8, lo que implicó que entrara mayor cantidad de partículas y aumentase la posibilidad de obturación de los goteros. Además, la formación de un depósito espeso que se acumulaba al final de los laterales, y que se observó para todos los filtros y efluentes, penalizó el gotero UN, puesto que el método de Merriam y Keller (1978) modificado por Vermeiren y Jobling (1986) y detallado en el apartado 4.16.1, requiere la determinación del caudal emitido por dos goteros ubicados al final del lateral. Debido al espaciado de 0.4 m del emisor UN, no fue posible determinar el caudal emitido en posiciones al final del lateral que no estuviesen afectadas por esta acumulación de sedimentos, lo que sin duda afectó a los resultados. Precisamente, con los sistemas de filtración con los que el emisor UN registró a las 1000 h unas mayores reducciones del caudal inicial, este emisor, al final del lateral, presentó unos mayores porcentajes de emisores completamente obturados. Estos sistemas de filtración fueron el combinado, anillas y malla para el ensayo con efluente secundario y el de arena, combinado y anillas para el ensayo con efluente terciario.

El emisor P8, que tenía un caudal nominal más alto (8.5 l/h) y la mayor sección de paso, se obturó menos a las 1000 h de riego con efluente terciario que el emisor P2, que era del mismo tipo pero con un caudal inferior (2 l/h). Ravina *et al.* (1992) comparando dos emisores que se diferenciaban por el caudal emitido, hallaron que el de mayor caudal tenía una menor sensibilidad a la obturación.

Aunque el caudal emitido por los emisores RM y P2 con los cuatro sistemas de filtración en el ensayo con efluente secundario tuviera un comportamiento muy parecido, el emisor P2 no presentó ningún emisor completamente obturado, pero sí lo hizo el emisor RM. Esto permite pensar que mientras hubo obturaciones totales del emisor RM, las obturaciones del emisor P2 fueron únicamente parciales. Con el efluente terciario los emisores RM y P8 tuvieron unos porcentajes similares de emisores completamente obturados, si bien el caudal emitido con el emisor RM fue superior al P8.

Precisamente, el único emisor que tendió a sobrepasar el caudal inicial fue el gotero RM. Este emisor incrementó, en algunos muestreos, el caudal inicial con los sistemas de filtración combinado, de anillas y malla en el ensayo con efluente secundario, y con todos los sistemas

de filtración en el ensayo con efluente terciario. En ningún caso el caudal fue superior al 6 % del caudal inicial. Ravina *et al.* (1992) encontraron en un ensayo con 12 tipos de emisores, entre los cuales estaban los emisores RM y TO, que estos dos podían llegar a emitir hasta un 10 % más del caudal inicial del ensayo. En el mismo sentido, Cararo *et al.* (2006) en un ensayo con 15 modelos de emisores, encontraron que el emisor RM emitía un caudal un 5 % superior al caudal nominal y que otros modelos podían llegar a emitir hasta un 15 % más.

No se halló ninguna relación entre el comportamiento de los emisores y la capacidad de compensación de presión que tenían los emisores UN, RM, P2 y P8 en el ensayo con efluente terciario. Con el efluente secundario, los emisores no autocompensantes de presión TI y TO habrían sido los que, al final del ensayo, hubieran obtenido un inferior porcentaje de caudal inicial de no ser por la reducción de caudal presentada por el emisor UN en los sistemas de filtración combinado, anillas y malla.

Con los dos efluentes se observaron recuperaciones del caudal emitido por los goteros en los cuatro sistemas de filtración y en todos los tipos de emisores. En algunos casos se recuperaron emisores que habían estado completamente obturados. La recuperación de emisores obturados también fue hallada por Adin y Sacks (1987), Ravina *et al.* (1992) y Rowan *et al.* (2004). Ravina *et al.* (1992) observaron que después de una parada en el funcionamiento del sistema de riego, durante un periodo invernal en su caso, los emisores recuperaban la emisión de caudal debido a que la materia que obturaba el emisor se secaba durante la pausa y se lavaba al reanudar la actividad. Este podría ser el caso de las recuperaciones de después de las 300 h y las 600 h con el efluente secundario, momento en el que se realizaron paradas en el funcionamiento del sistema de riego (ver apartado 4.8.1). Rowan *et al.* (2004) justificó la recuperación de los emisores por la formación de limo bacteriano en el interior del laberinto del emisor que provocaba un estrechamiento del paso del agua, de forma que cualquier partícula podría obturarlo, pero podría también desobturarse después de unos ciclos de riego y gracias al lavado por arrastre del agua. Con el efluente terciario también se registraron recuperaciones de goteros que estaban completamente obturados a las 125 h, las 475 h y las 800 h. En algunos casos estas recuperaciones fueron totales y en otros, los emisores permanecieron con un caudal emitido inferior al 50 % del inicial.

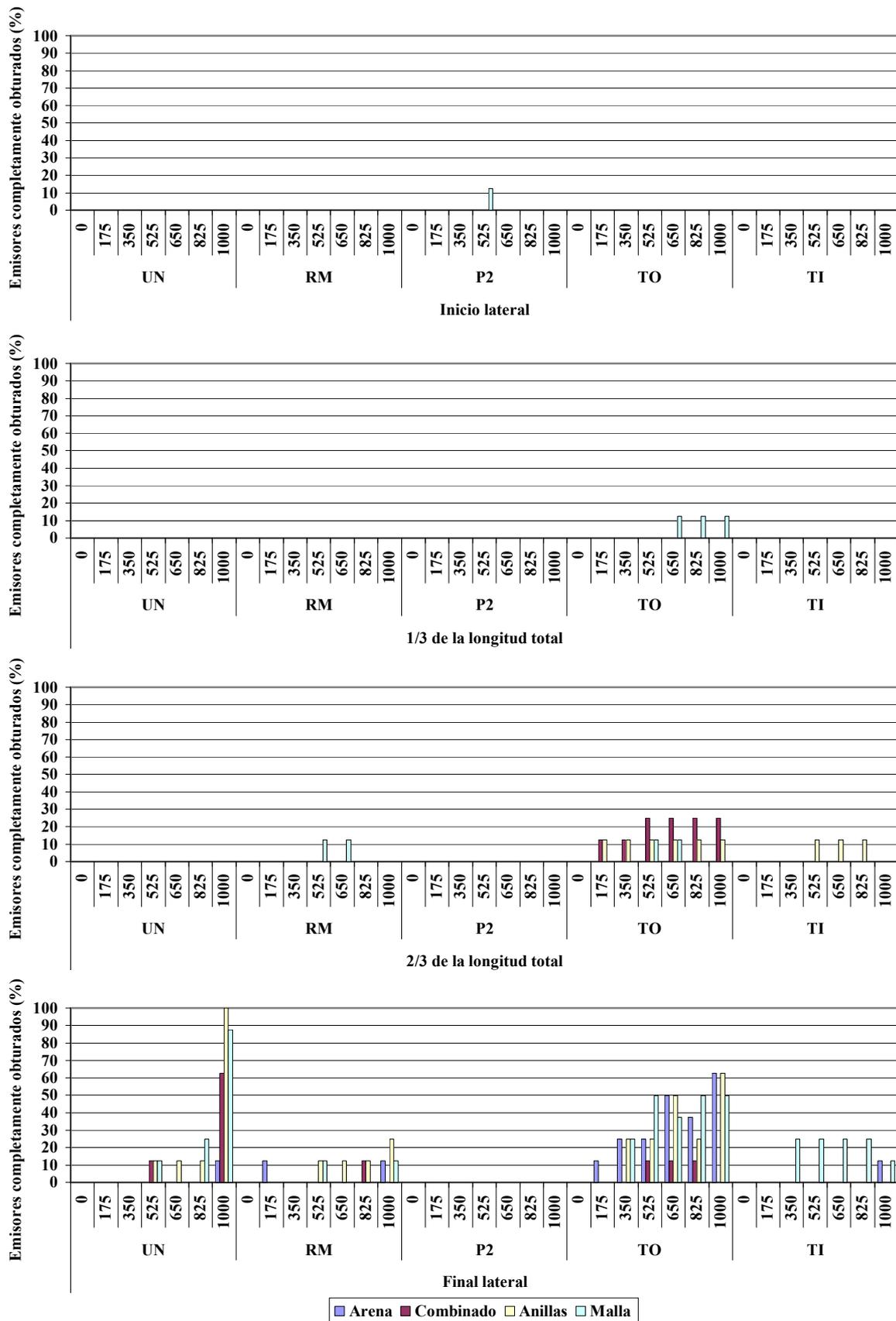


Figura 5.43. Porcentaje de emisores completamente obturados con efluente secundario en las posiciones de muestreo para la medida de la uniformidad de emisión de caudales a lo largo del ensayo (en horas) en función de la posición, tipo de emisor y sistema de filtración.

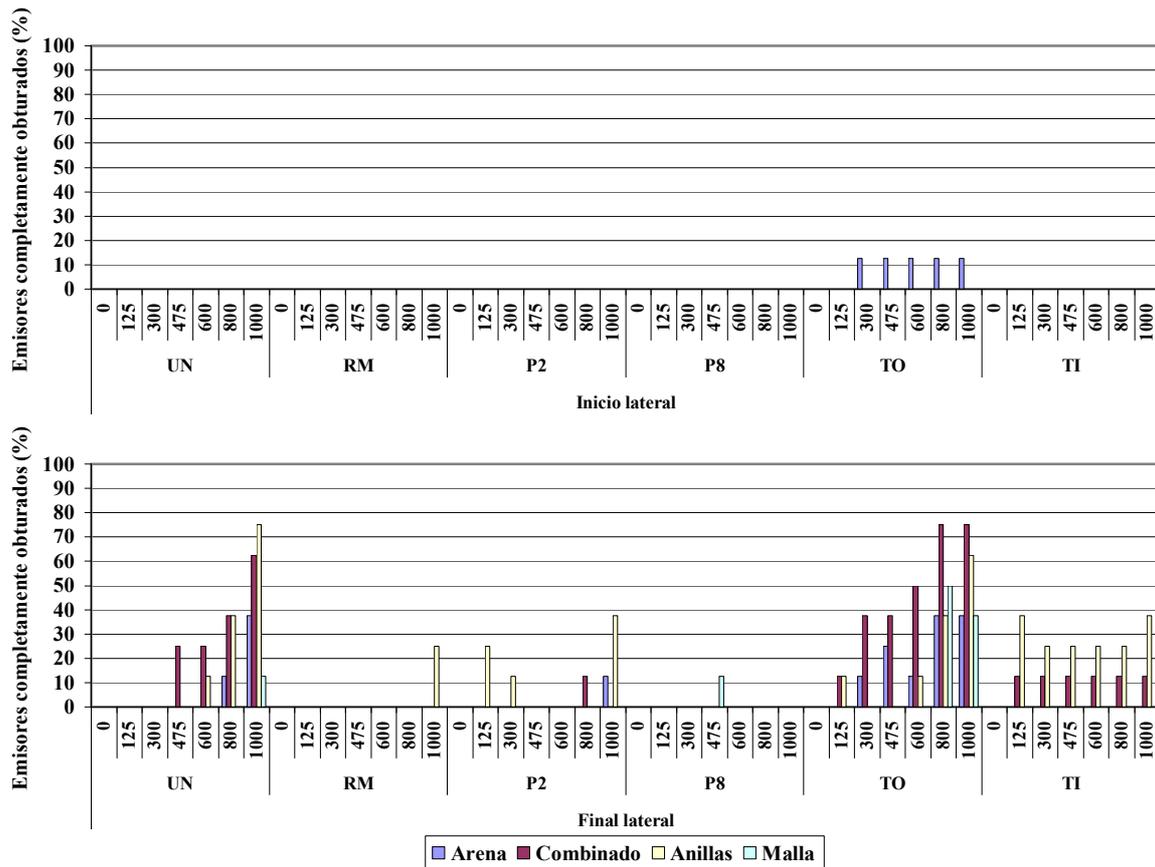


Figura 5.44. Porcentaje de emisores completamente obturados con efluente terciario en las posiciones de muestreo para la medida de la uniformidad de emisión de caudales a lo largo del ensayo (en horas) en función de la posición, tipo de emisor y sistema de filtración. Las posiciones 1/3 y 2/3 de la longitud total del lateral no se presentan porque no se encontraron emisores completamente obturados.

5.3.2.2. Efecto de la filtración y la posición en el porcentaje de caudal inicial emitido por los goteros

Al final del ensayo con efluente terciario se encontró que el porcentaje del caudal inicial emitido por los goteros dependía, además del emisor, de la posición y su interacción (apartado 5.3.2.1), del tipo de filtro y de la interacción entre el sistema de filtración y la posición de los emisores (Figura 5.45).

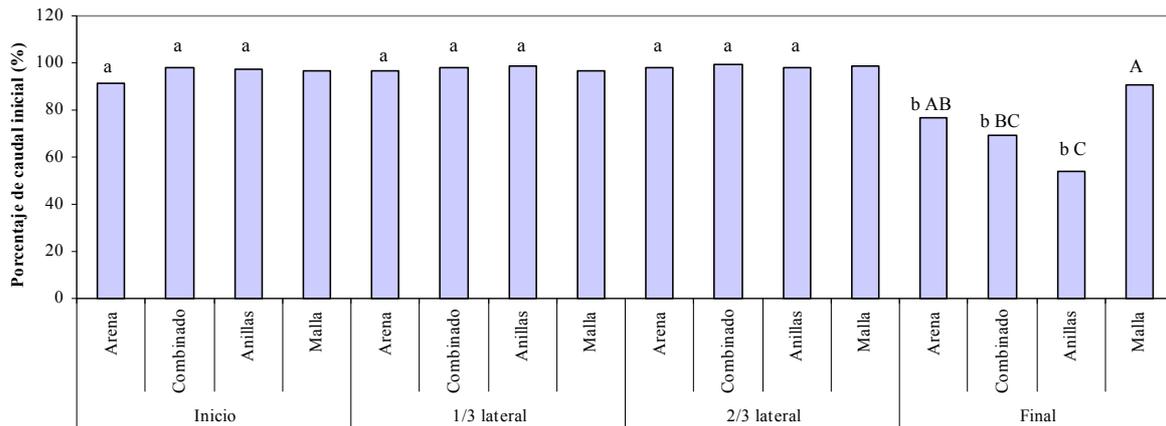


Figura 5.45. Porcentaje de caudal inicial al final del ensayo con efluente terciario en función del sistema de filtración y la posición. Para cada sistema de filtración, letras minúsculas diferentes indican que existen diferencias significativas ($P < 0.05$) entre las posiciones de muestreo. Para cada posición de muestreo, letras mayúsculas diferentes indican que existen diferencias significativas ($P < 0.05$) entre los sistemas de filtración.

Los sistemas de filtración de anillas, arena y combinado redujeron el caudal emitido al final de los laterales respecto al inicio, 1/3 y 2/3 de la longitud del lateral. Al final del lateral, el sistema de filtración de malla se mantuvo con un 90 % del caudal inicial, mientras que los de arena, combinado y anillas emitieron, respectivamente, un 76, 70 y 54 % del caudal inicial.

Al final del ensayo se hallaron unos mayores porcentajes de emisores completamente obturados con el sistema de filtración de anillas, con los dos efluentes. Con el efluente terciario, el menor porcentaje de emisores completamente obturados se consiguió con el sistema de filtración de malla aunque sin diferenciarse del de arena, mientras que con el efluente secundario se obtuvo con los sistemas de filtración de arena y combinado. Ravina *et al.* (1995) y Puig-Bargués (2003) encontraron, al igual que en este ensayo, un mayor porcentaje de emisores obturados con el sistema de filtración de anillas que con el de malla. Ravina *et al.* (1995) hallaron que el sistema de filtración de arena obtenía unos porcentajes de emisores obturados parecidos a los del sistema de filtración de anillas. Capra y Scicolone (2005) encontraron que los sistemas de filtración de arena y, en algunas ocasiones, los filtros de anillas permitían un mejor comportamiento de los emisores, mientras que los filtros de malla no eran adecuados para utilizar con agua regenerada. Puig-Bargués (2003) por su parte, a diferencia de este ensayo, no encontró ningún emisor completamente obturado cuando ensayaba con efluente terciario con una desinfección efectiva y un sistema de filtración de malla, aunque como se ha comentado, en este trabajo el sistema de filtración de malla con efluente terciario fue el que presentó un menor porcentaje de emisores completamente obturados.

5.3.3. Lavado de los laterales después del ensayo con efluente terciario

En el presente estudio, se decidió realizar una prueba de lavado de los laterales después del ensayo con efluente terciario ya que, entre otros autores, Adin y Sacks (1987) y Ravina *et al.* (1992) recomendaron realizarlos para evitar problemas de obturaciones al final de los laterales. En la bibliografía consultada no se describe ninguna rutina concreta para la realización de los lavados pero sí que se indican algunas recomendaciones. Por ejemplo, Hills y Brenes (2001) propusieron realizar lavados con una frecuencia quincenal con el mismo efluente a una velocidad superior a 0.5 m/s. Por otro lado, Trooien *et al.* (2000) y Nakayama

et al. (2007) determinaron que era necesaria una velocidad mínima de 0.3 m/s para arrastrar las partículas acumuladas en los laterales. En el caso de que éstas fuesen de mayor tamaño, Nakayama *et al.* (2007) recomendaron aumentar la velocidad a 0.6 m/s. Estos últimos autores indicaron que se podrían realizar los lavados cada 4 o 6 semanas y que, dependiendo de la cantidad de partículas que se arrastraran, se podría aumentar o disminuir la frecuencia de los lavados. En el mismo sentido, la norma ASAE EP405.1 (ASAE, 2003) recomiendan una velocidad mínima de lavado de 0.3 m/s y un grado de filtración que evite la realización de lavados con una frecuencia mayor que la semanal. La velocidad del agua de lavado con la que se trabajó en el presente estudio estuvo comprendida entre 0.45 y 0.80 m/s, siempre por encima de la mínima recomendada de 0.3 m/s, tal y como se ha presentado en la Tabla 4.10.

En la Figura 5.46 se presenta el porcentaje de caudal inicial obtenido con los distintos tipos de emisores y sistemas de filtración ubicada al final de los laterales en las muestras a las 1000 h de riego con efluente terciario antes y después del lavado de los laterales.

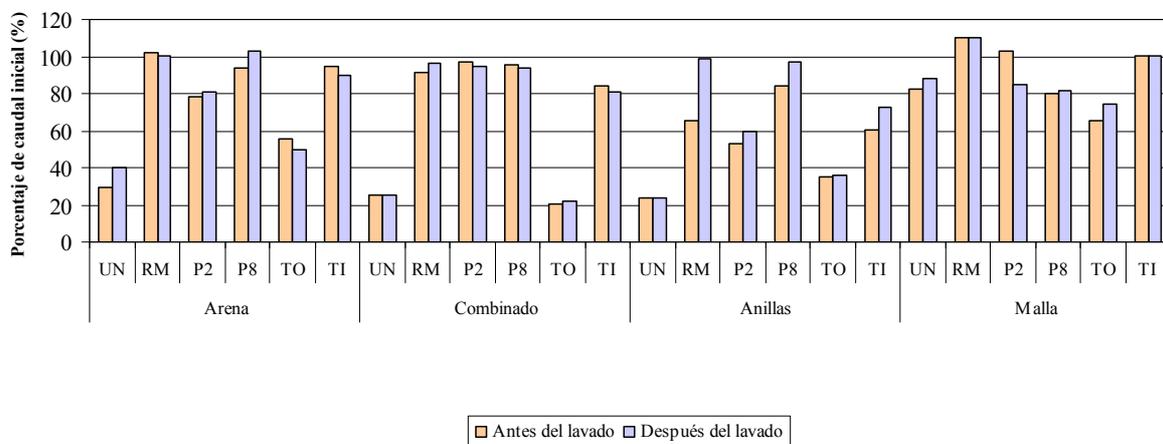


Figura 5.46. Comparación entre el porcentaje de caudal inicial de los goteros ubicados al final del lateral emitido a la 1000 h antes del lavado y después del lavado de los laterales.

El único lavado realizado al final del ensayo, sin ningún tipo de tratamiento químico, no fue suficiente para recuperar significativamente ($P < 0.05$) el caudal de los emisores, y menos cuando éstos presentaban obturaciones severas. Solamente algún emisor en algún sistema de filtración recuperó el caudal emitido al inicio del ensayo, como es el caso del emisor RM con el sistema de filtración de anillas. Probablemente esta recuperación fue debida a que el agua de lavado arrastró material depositado en el filtro de entrada de los emisores obturados.

De hecho, como se ha comentado, los autores que estudiaron el efecto de los lavados de los laterales, entendían los lavados como una actividad a realizar periódicamente durante la campaña de riego, para evitar que las partículas depositadas al final de los laterales entraran en los emisores. El lavado de los laterales realizado podría haber sido más eficiente si las obturaciones hubiesen sido en los laterales, pero en el presente ensayo, tal y como indican las altas uniformidades de presión (presentadas en el siguiente apartado), las obturaciones se localizaron en los emisores, lo que dificultaba enormemente su recuperación sin ningún tratamiento químico (Oron *et al.*, 1979; Adin y Sacks, 1991; Tajrishy *et al.*, 1994; Ravina *et al.*, 1997) o biológico (Sahin *et al.*, 2005).

5.3.4. Coeficiente de uniformidad de presiones de los emisores

Con los valores de presión en los laterales tomados durante las medidas de campo se calculó la uniformidad de presión (ecuación 4-XXVI) para descartar problemas de caída de presión excesiva en los laterales de riego que pudiesen afectar a la determinación del caudal de los goteros. La evolución de las uniformidades de presión a lo largo del ensayo se presentan en Figura 5.47 y en la Figura 5.48 para el efluente secundario y terciario, respectivamente.

La uniformidad de presión de todos los emisores fue, a lo largo de todo el ensayo, con los cuatro sistemas de filtración y los dos efluentes ensayados, superior a 91.90 %. Estos resultados concuerdan con los presentados por Puig-Bargués (2003) en los que, con un emisor no autocompensante de presión y utilización de efluentes secundario y terciario filtrados con un filtro de anillas y mallas, siempre las uniformidades de presión superaron el 93 % durante 720 h. El hecho que la uniformidad fuera superior al 90 %, indica, según Rodríguez (1990), que la distribución de presiones fue correcta y que si había problemas en la distribución de caudales, éstos eran debidos a los emisores. Además, al no ser el coeficiente de variación de fabricación de los emisores elevado, inferior del 3% según el fabricante (apartado 4.5.3), las bajas uniformidades de emisión de caudales se debían a las obstrucciones de los emisores. Por otro lado, mientras la uniformidad de presiones mínima obtenida con los emisores no autocompensantes de presión fue de 91.92 y 92.47 % para el efluente secundario y terciario, respectivamente, el valor mínimo obtenido con los emisores autocompensantes, fue de 95.85 y 96.70 % para el efluente secundario y terciario, respectivamente.

En la Tabla 5.23 se presenta la pérdida de carga a lo largo del lateral y la uniformidad de presión media de los cuatro sistemas de filtración al inicio y al final de los ensayos con los dos efluentes utilizados. Los emisores que presentaron unas mayores pérdidas de presión a lo largo del lateral, tanto al inicio como al final del ensayo, fueron los emisores P8 y UN. Los laterales con estos emisores fueron los que distribuyeron mayor caudal (Tabla 4.3) y además, como la sección del lateral era igual o inferior en el caso del lateral con emisor P8 a la del resto, presentaron mayor pérdida de carga. Por otro lado, los laterales que presentaron las menores pérdidas de presión fueron los que contenían los emisores TO y TI. Estos laterales distribuían los menores caudales y contenían emisores, que por su diseño, obstruían poco el flujo dentro del lateral (Ilustración 4.1 e Ilustración 4.2). Además, el lateral con el emisor TO, fue el que tenía mayor sección de paso del efluente. Es destacable que el emisor con menor pérdida de carga en el lateral fuera el emisor con las menores uniformidades de presión. Este hecho indica que los laterales con mayores pérdidas de presión no son los que menores uniformidades presentan, sino que la uniformidad de presiones viene muy determinada por los valores extremos medidos y no por la distribución de la pérdida de presiones a lo largo de los laterales.

Tabla 5.23. Pérdida de presión en los laterales y coeficiente de uniformidad de presión al inicio y al final de los ensayos con efluente secundario y terciario.

Emisor	Pérdida de presión en el lateral de riego (kPa)				Uniformidad de Presión (%)			
	E. secundario		E. terciario		E. secundario		E. terciario	
	0 h	1000 h	0 h	1000 h	0 h	1000 h	0 h	1000 h
UN	61	104	56	70	98.65	96.78	99.23	98.90
RM	21	30	15	32	99.67	99.57	99.82	99.52
P2	17	21	11	20	99.72	99.70	99.86	99.73
P8	-	-	96	115	-	-	98.29	97.32
TO	10	11	4	13	98.40	98.31	97.97	97.01
TI	18	26	15	26	97.42	96.84	98.26	97.10

Las oscilaciones que se observan en los gráficos de la uniformidad de presión registrada en el ensayo con efluente terciario y sistemas de filtración de arena, combinado y malla significaron una pequeña variación porcentual y fueron debidas a valores más bajos de presión obtenidos en medidas puntuales y localizadas. En todos los casos, estos menores valores de presión se recuperaron en la siguiente medida. En el ensayo con efluente secundario y sistema de filtración combinado, también se observó una mayor oscilación de la uniformidad de presiones en los emisores TO y TI (no autocompensantes de presión). Estos emisores, obtuvieron unas uniformidades más bajas alrededor de las 500 horas, pero se recuperaron antes de llegar al final del ensayo.

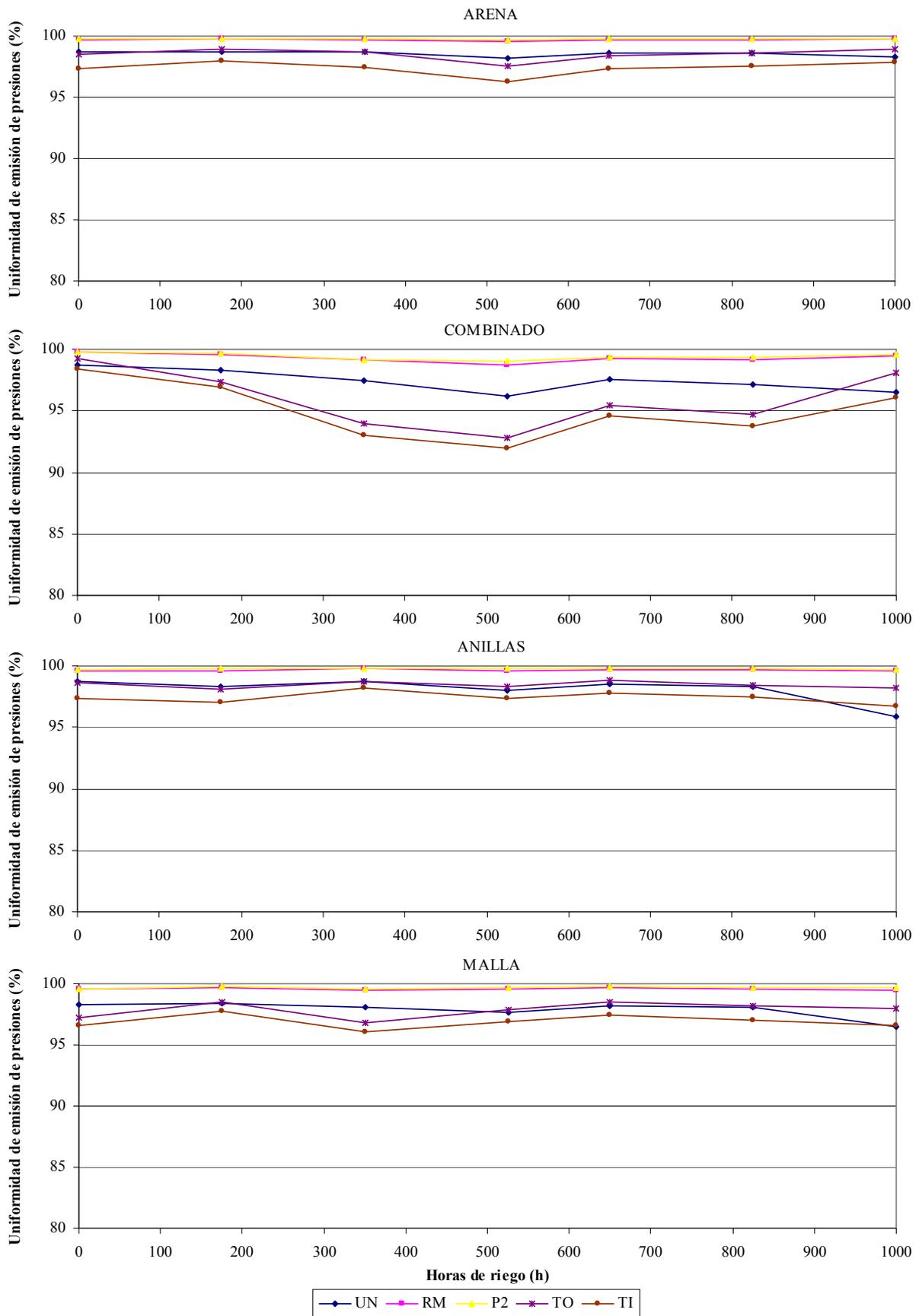


Figura 5.47. Evolución de la uniformidad de presión de los distintos emisores por cada sistema de filtración utilizando efluente secundario.

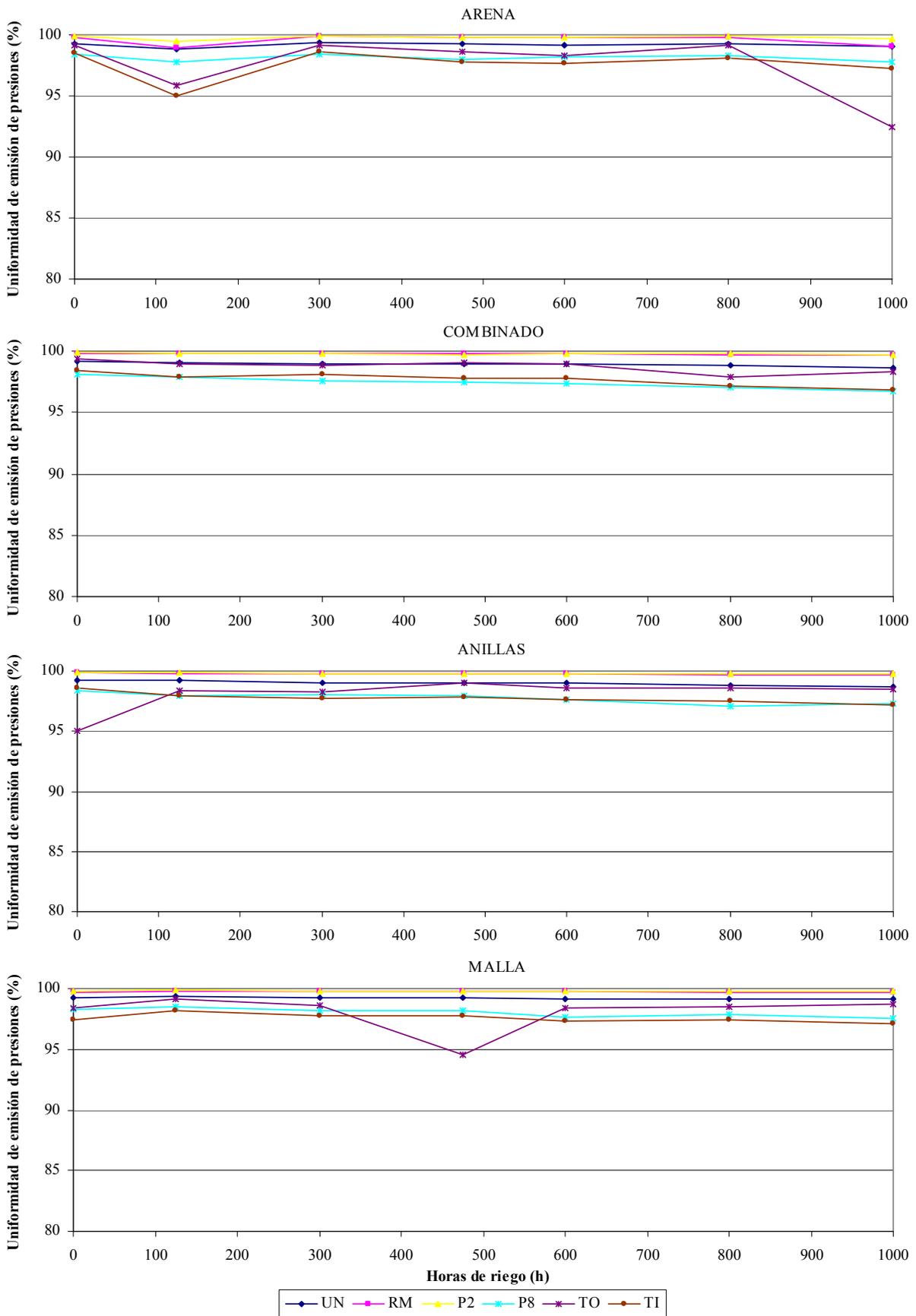


Figura 5.48. Evolución de la uniformidad de presión de los distintos emisores por cada sistema de filtración utilizando efluente terciario.

5.3.5. Caudal monitorizado

En este apartado se presenta la evolución del caudal filtrado por cada sistema de filtración, la evolución del caudal de los laterales monitorizados y su relación con el caudal calculado a partir de las medidas realizadas con probeta durante las determinaciones de uniformidad del riego.

5.3.5.1. Relación entre el caudal del lateral medido en continuo y el estimado a partir de las medidas para el cálculo de la uniformidad

El caudal de entrada a los laterales con el gotero UN monitorizados se estimó a partir de las medidas de caudales de los goteros en campo necesarias para calcular las uniformidades de emisión. De esta forma, se pudo relacionar con el caudal realmente medido por el caudalímetro del lateral (apartado 4.17) y contrastar su correcto funcionamiento.

En la Tabla 5.24 se presenta el resultado del test de separación de medias utilizado para determinar si existían diferencias entre la medida del caudal del lateral monitorizado (calculado con la ecuación XXVIII) y el caudal del lateral estimado (calculado con la ecuación XXVII).

Tabla 5.24. Caudal estimado a partir de los datos de medida de uniformidad de emisión de caudales y medido por el caudalímetro. Un P-valor<0.05 indica que existen diferencias significativas entre los dos valores.

Ubicación del caudalímetro	Media (l/h)		P-valor
	Caudal estimado	Caudal medido	
<i>Arena</i>	503.62 ± 39.59	503.21 ± 20.53	0.9689
<i>Combinado</i>	517.20 ± 41.32	521.07 ± 27.06	0.7107
<i>Anillas</i>	489.68 ± 51.75	533.79 ± 14.08	<0.0001
<i>Malla</i>	496.37 ± 55.17	519.79 ± 22.41	0.0268

Solamente se encontraron diferencias significativas ($P < 0.05$) entre el valor monitorizado y el estimado en los laterales con el sistema de filtración de anillas y de malla, siendo en ambos casos, el valor estimado inferior al medido por el caudalímetro. El motivo está en que la obturación a lo largo del lateral no se correspondió con la encontrada en los cuatro puntos de medida utilizados para determinar la uniformidad de emisión. El alto porcentaje de emisores completamente obturados encontrados al final del lateral provocó una subestimación del caudal real y, consecuentemente, la diferenciación de las dos medias. Aunque se encontraron emisores obstruidos con los cuatro sistemas de filtración, el sistema de filtración de anillas, que mostró una mayor diferencia entre el caudal estimado y el medido, fue el que presentó un mayor porcentaje medio de emisores completamente obturados (Figura 5.43 y Figura 5.44).

También se realizó otro test de separación de medias (Tabla 5.25) para buscar diferencias entre el caudal estimado del lateral y el medido con el caudalímetro en los distintos momentos de medida de la *UE* de caudales.

Tabla 5.25. Caudal estimado a partir de los datos de medida de uniformidad de emisión de caudales y el medido por el caudalímetro para los distintos momentos de determinación. Un P-valor<0.05 indica que existen diferencias significativas entre los dos valores.

Momento de la medida	Media (l/h)		P-valor
	Caudal estimado	Caudal medido	
0	527.88 ± 14.13	532.88 ± 8.64	0.7177
1	530.39 ± 9.05	531.00 ± 14.17	0.9648
2	522.66 ± 13.21	527.00 ± 15.57	0.7530
3	505.09 ± 28.91	518.88 ± 26.57	0.3194
4	503.21 ± 41.95	524.25 ± 23.14	0.1299
5	495.27 ± 49.26	516.00 ± 18.88	0.1355
6	427.53 ± 59.04	486.25 ± 23.41	<0.0001

Únicamente se hallaron diferencias significativas entre los dos valores medidos al final de los ensayos. Sin embargo, en todos los momentos, se subestimó el caudal del lateral en comparación al caudal leído por el caudalímetro. La diferencia entre estos dos valores fue de 1 a 5 l/h hasta el momento 2, de 13 y 21 l/h para los momentos 3 y 4 y 5, respectivamente y de 59 l/h al final 1000 h de ensayo. Estas diferencias reflejan que, a medida que transcurrieron las horas, fue más difícil estimar el caudal del lateral a partir de las medidas tomadas en cuatro puntos del lateral. Este resultado concuerda con la aparición de emisores completamente obturados. Cabe recordar que en las últimas posiciones del lateral UN y a las fases finales del ensayo, fue donde y cuando se encontró una mayor proporción de emisores completamente obstruidos (Figura 5.43 y Figura 5.44).

5.3.5.2. Evolución del caudal del lateral monitorizado

En la Figura 5.49 se presenta la evolución de los porcentajes de caudal inicial de los cuatro laterales monitorizados durante el ensayo con efluente secundario y terciario. En la Tabla 5.26 se presenta la diferenciación estadística de estos porcentajes entre los distintos momentos de riego y, en la Tabla 5.27, se presenta el volumen total distribuido por los laterales monitorizados después de 1000 h de riego con efluente secundario y 1000 h con efluente terciario.

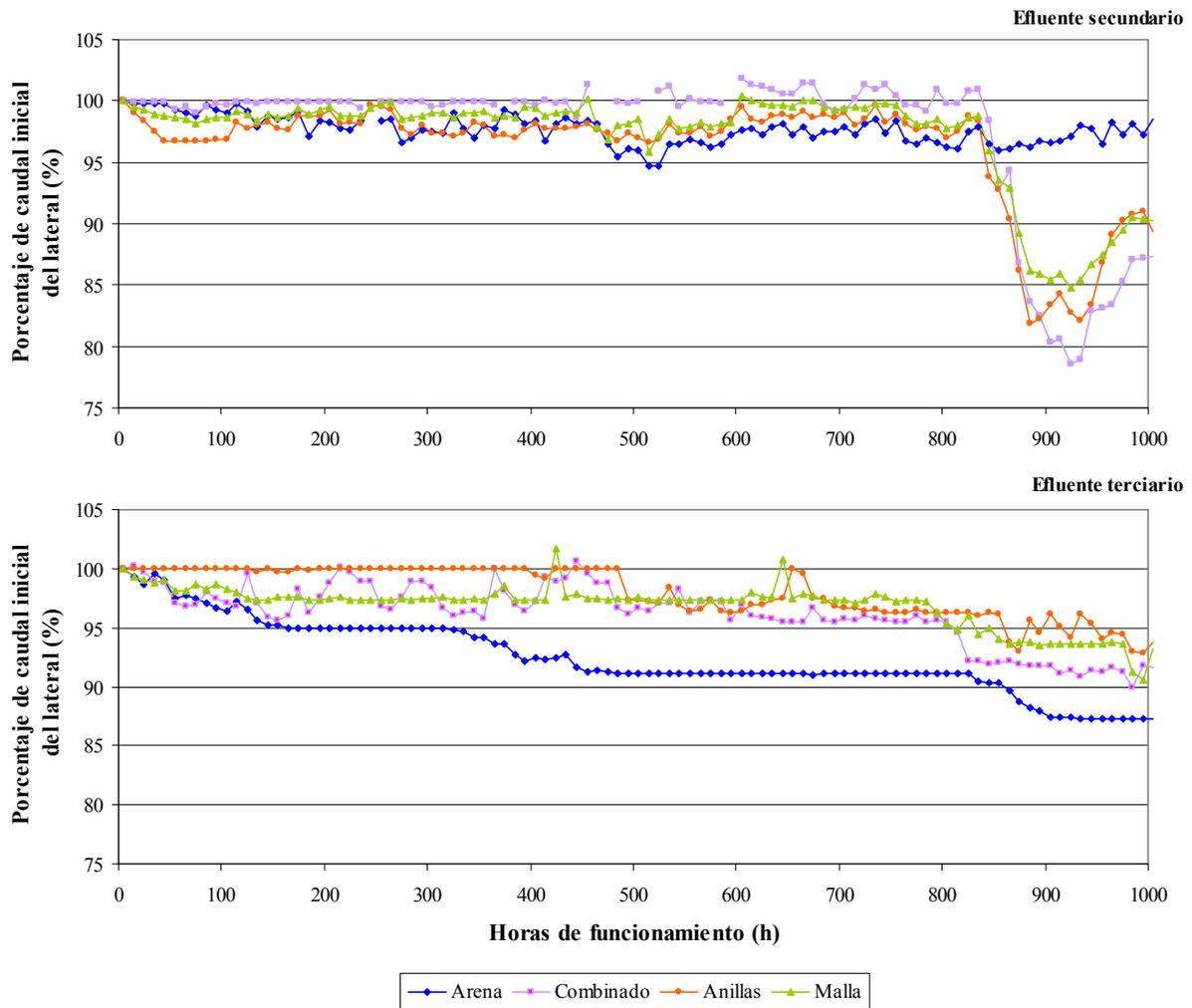


Figura 5.49. Evolución del porcentaje de caudal inicial de los cuatro laterales monitorizados en función de las horas transcurridas de riego con efluente secundario y terciario.

Tabla 5.26. Diferenciación estadística entre los volúmenes de los ciclos de filtración. Para cada sistema de filtración y efluente, horas de riego con letras distintas indican diferencias significativas ($P < 0.05$).

Efluente	Sistema de filtración	Horas de riego				
		0-200	200-400	400-600	600-800	800-1000
Secundario	Arena	a	ab	b	b	b
	Combinado	a	a	a	a	b
	Anillas	a	a	a	a	b
	Malla	b	a	b	a	c
Terciario	Arena	a	b	c	c	d
	Combinado	a	a	a	b	c
	Anillas	a	a	b	b	c
	Malla	a	a	a	a	b

Tabla 5.27. Volumen de efluente distribuido por los laterales monitorizados, después de 1000 h de riego, para cada ensayo y sistema de filtración (m³).

Efluente	Sistema de filtración			
	Arena	Combinado	Anillas	Malla
<i>Secundario</i>	513.79	484.59	510.03	481.80
<i>Terciario</i>	487.56	513.92	501.58	505.92

Con el efluente secundario el porcentaje de caudal inicial osciló más que con el efluente terciario. En los cuatro laterales monitorizados y con los dos efluentes, al final de los ensayos el porcentaje de caudal inicial emitido fue significativamente ($P < 0.05$) inferior al del inicio de los ensayos. Entre los distintos sistemas filtración y efluente utilizado, varió el ritmo de disminución del caudal emitido y el valor final emitido. A las 600 h de riego con efluente secundario, después de efectuar el mantenimiento del grupo de bombeo, el caudal del lateral aumentó sensiblemente y se mantuvo más regular. Hasta las 840 h de riego con el efluente secundario, los laterales con gotero UN registraron unos caudales del 95 al 102 % del caudal inicial. A partir de este momento, solamente la unidad con filtro de arena se mantuvo en estos intervalos. Los demás laterales protegidos con los otros tres sistemas de filtración redujeron el caudal emitido hasta llegar al mínimo de 78 – 85 % a las 925 h. Al final del ensayo, a las 1000 h de riego, los laterales monitorizados que presentaron la bajada de caudal, emitían entre un 87 % y un 90 % del caudal inicial. Sagi *et al.* (1995) encontraron caudales emitidos de alrededor del 95 % después de 7 semanas de funcionamiento a 20 h diarias (980 h) con un efluente procedente de una balsa donde se almacenaba agua procedente de un tratamiento secundario y agua procedente de escorrentía de lluvia. Cuando utilizaron agua procedente de un tratamiento secundario, los caudales de los laterales fueron del 70 % del caudal inicial. Estos autores compararon la evolución del comportamiento de los laterales sin tratamiento alguno, como es el caso de los ensayos presentados en este trabajo, con el comportamiento de los mismos laterales con la aplicación de cloro. En el trabajo de Ravina *et al.* (1992), con seis tipos de laterales con emisores autocompensantes de presión, como es el caso del lateral UN monitorizado en el presente ensayo, se obtuvieron caudales entre 70 y 100 % después de 1000 h de riego. En sus ensayos, también se detectaron oscilaciones de caudal que provocaron reducciones temporales del caudal del lateral de hasta el 50 %.

Schischa *et al.* (1997) encontraron un comportamiento del lateral diferente en función del sistema de filtración utilizado. Los laterales después del filtro de malla emitían un 90 % del caudal inicial, mientras que los laterales situados aguas abajo de los sistemas de filtración con arena y anillas, registraron caudales del 80 % del caudal inicial.

Si se tiene en cuenta el volumen total de agua distribuida por los laterales después de 1000 h de riego con efluente secundario, se observa que los laterales ubicados en el sistema de filtración de arena y de anillas, distribuyeron unos 30 m³ más de efluente que los laterales ubicados en los sistemas de filtración combinado y malla. Esta diferencia podría explicarse por el hecho que cuando los filtros de malla llegaban a un ciclo de lavado continuo, la presión y el caudal aguas abajo del sistema de filtración decrecía. Como se ha presentado en el apartado 5.2.2, los filtros de malla fueron los que presentaron un mayor número de lavados ineficientes con este efluente.

La disminución del porcentaje de caudal inicial en el lateral se asume como una obturación de los emisores situados en el lateral. Concretamente, con el efluente secundario se observó un aumento considerable de emisores completamente obturados con todos los sistemas de filtración, excepto el de arena, en el periodo comprendido entre las 825 h y las 1000 h de

riego (ver apartado 5.3.2.1). Con los sistemas de filtración combinado, de anillas y malla, se contabilizaron más de un 60 % de los emisores UN del final de lateral completamente obturados, mientras que con el filtro de arena, este porcentaje no superó el 13 %. Esta diferencia del comportamiento entre el lateral con emisor UN del sistema de filtración de arena y los demás sistemas de filtración también se observó en el porcentaje de caudal inicial de los emisores (ver Figura 5.40).

La reducción del caudal de entrada a los laterales UN con el efluente secundario coincidió con un incremento importante de la turbidez y de los sólidos en suspensión (ver apartado 5.1.3). El muestreo del agua se realizó a las 850 h de riego y el inicio de la disminución del caudal fue registrado entre las 835 h y las 840 h de riego. En el muestreo del efluente secundario se obtuvo un valor de sólidos en suspensión de 18 mg/l. Este valor fue un 225 % superior al valor de 10 días antes, obtenido en el muestreo a las 780 h, siendo también el mayor valor de sólidos en suspensión medido encontrado tanto con el efluente secundario como con el terciario.

De la observación en detalle de los valores registrados por el sistema SCADA, y no presentados en este documento, se observa claramente un punto de inflexión en el comportamiento de los sistemas de filtración. Se llegó a las 815 h de riego, que era el objetivo inicial de duración del ensayo, con el régimen diario de 12 h diarias. A partir de este momento se planteó un régimen horario de riego de 6 h diarias, durante cuatro días, y se decidió cambiar el objetivo de duración y extenderlo a 1000 h. En este momento, a las 840 h se paró durante 20 h la instalación para permitir las labores de mantenimiento de la estación depuradora, que consistían en el lavado a presión para eliminar las algas que se depositaban en la zona de vertido del agua en los decantadores. La instalación se paraba cada vez que se realizaba esta labor para evitar que el agua de lavado entrara en la instalación de riego. Una vez se reanudó el riego, los sistemas de filtración empezaron a obturarse con un menor volumen filtrado y, seguidamente, se presentaron las disminuciones de caudal del lateral. En ningún otro momento que se realizó la labor de mantenimiento en la estación depuradora, y en que se tomó la misma pauta de trabajo, es decir, parar la instalación hasta asegurar que el agua de lavado de los decantadores había sido totalmente evacuada, se observó una reducción de caudal tan importante.

Con hechos como el anteriormente descrito, es donde se pone de manifiesto lo difícil que es explicar el comportamiento de los emisores a partir de un muestreo del agua discontinuo en el tiempo. Con aguas de estaciones depuradoras, con gran variabilidad en el tiempo, es muy difícil caracterizar el efluente con muestreos discretos en el tiempo. Además, cuando se detectaban las variaciones de comportamiento de los componentes de la instalación, el agua causante ya había circulado por todo el sistema sin haber podido ser muestreada. No obstante los valores de los parámetros físico-químicos del agua depurada, estuvieron dentro de la legislación actual, Directiva 91/271 (DOCE, 1991) sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas.

El comportamiento de los laterales con emisores UN y efluente terciario fue distinto al observado con efluente secundario. En este caso, los cuatro laterales se mantuvieron con un caudal entre 95 y 100 % del caudal inicial hasta las 315 h. A partir de este momento, el lateral ubicado en el sistema de filtración de arena vio reducido paulatinamente su caudal de entrada hasta el 87 % a las 1000 h, y manteniéndose como el lateral con un menor caudal de entrada. Los tres laterales restantes, se mantuvieron con unos caudales superiores al 95 % hasta las 815 h de riego. Al final del ensayo, los laterales UN protegidos con los sistemas de filtración combinado, de anillas y malla se mantuvieron entre un 92 % y un 94 % del caudal inicial. En

el ensayo con efluente terciario, el lateral protegido con el sistema de filtración de arena fue el que distribuyó un menor volumen total después de 1000 h de riego (ver Tabla 5.27).

No se puede considerar que la obturación fuera únicamente provocada por los sólidos en suspensión, es decir una obturación física, ya que en el presente estudio se encontró una obturación más importante en el lateral UN y filtración de arena y efluente terciario que con el secundario. El efluente que entraba en el lateral en el ensayo con efluente terciario, además de ser un efluente con una menor concentración de sólidos en suspensión (ver apartado 5.1.1), vio reducido su contenido en sólidos en un 67 % por el filtro de arena mientras que con el secundario, el efluente tenía una mayor concentración y el filtro de arena sólo redujo un 47 % (ver apartado 5.2.1). Además, en el ensayo con efluente terciario, el lateral protegido con el sistema de filtración de arena estuvo en la mayor parte del ensayo, con unas obturaciones mayores (menor porcentaje de caudal inicial emitido, Figura 5.49) que los laterales protegidos con los otros sistemas de filtración que como se ha visto anteriormente, no presentaron reducciones de los sólidos en suspensión al contrario del filtro de arena. Esto podría explicarse por la obturación parcial de los emisores.

5.3.5.3. Evolución del caudal filtrado

En la Figura 5.50 se presenta, para cada sistema de filtración y efluente utilizado, la evolución del porcentaje de caudal inicial de toda la unidad de riego. Este caudal era el filtrado por el sistema de filtración correspondiente y se repartía entre los 24 laterales de riego. En la Tabla 5.28 se presenta el volumen total filtrado por el sistema de filtración y distribuido por los laterales de riego.

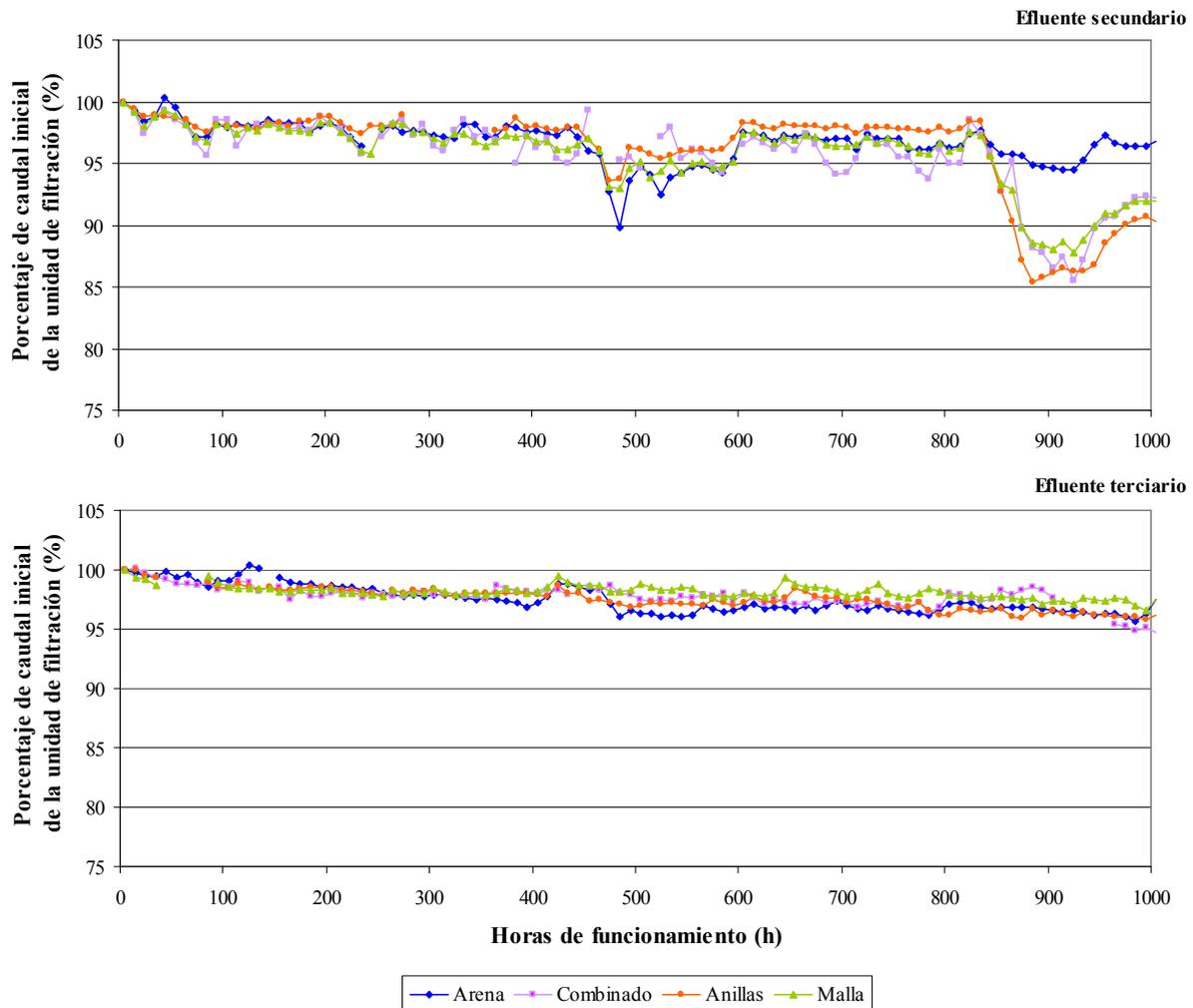


Figura 5.50. Evolución del porcentaje de caudal inicial de las cuatro unidades de riego en función de las horas transcurridas de ensayo con efluente secundario y terciario.

Tabla 5.28. Volumen de efluente distribuido por cada sistema de filtración, después de 1000 h de riego, para cada efluente (m³).

Efluente	Sistema de filtración			
	Arena	Combinado	Anillas	Malla
<i>Secundario</i>	8281.22	7725.31	8190.35	7734.77
<i>Terciario</i>	8485.88	8781.28	8624.11	8882.56

Al igual que se observó con el caudal de los laterales monitorizados, los caudales filtrados en el ensayo con efluente terciario, fueron más regulares que los caudales medidos en el ensayo con efluente secundario. También quedó registrado el aumento del caudal producido a las 600 h de riego con efluente secundario producido por los trabajos de mantenimiento del grupo de bombeo. Se puede observar que el caudal filtrado por las distintas unidades siguió el mismo comportamiento que el caudal de los laterales. Es decir, que a las 840 h solamente se mantuvo por encima del 94 % del caudal inicial el caudal medido después del sistema de filtración de arena. Los caudales medidos en los otros sistemas de filtración registraron una reducción de este valor hasta llegar a unos mínimos comprendidos entre 85 y 88 % del caudal inicial. Cabe destacar que esta disminución no fue inferior a la registrada por los caudalímetros de los laterales con emisores UN. Mientras, como ya se ha comentado, el caudal de los 24 laterales

descendió a un mínimo de 85 a 88 %, el caudal del lateral UN descendió a unos mínimos entre 78 y 85 %. Esto puede ser debido a que el emisor UN fue uno de los que se vio más afectado por el cambio de calidad del agua. Al final del ensayo con efluente secundario, los caudales filtrados por los distintos sistemas de filtración se recuperaron hasta el 90 y 97 % del caudal inicial.

En el ensayo con efluente secundario, al igual que ocurrió con el volumen de entrada a los laterales con gotero UN, el volumen total filtrado con el sistema de filtración de arena y de anillas fue superior, en unos 500 m³, al volumen total filtrado con el sistema de filtración combinado y de malla (Tabla 5.28). Este hecho se justifica porque los sistemas de filtración que filtraron menos volumen estaban formados como mínimo por un filtro de malla. Precisamente, los filtros de malla con efluente secundario, fueron los que presentaron un mayor número de lavados ineficientes provocando, en este estado, el descenso de la presión y del caudal aguas abajo del sistema de filtración.

La evolución del caudal filtrado por las unidades de filtración en el ensayo con efluente terciario fue más regular que con el secundario, gracias al funcionamiento individual que se proporcionó en este ensayo. En este caso, destacó el sistema de filtración de malla, que estuvo filtrando, a partir de las 400 h de riego, el mayor porcentaje de caudal inicial. Este sistema de filtración, que fue el que filtró un mayor volumen total, fue también el que a las 1000 h de riego, obtuvo unos mayores coeficientes de *UE* de caudales, un menor número de emisores completamente obturados y un mayor porcentaje de caudal inicial emitido por los emisores de la unidad. Aún así, las diferencias del volumen filtrado entre los distintos sistemas de filtración no fueron superiores a los 400 m³.

El caudal filtrado por los cuatro sistemas de filtración, se mantuvo durante todo el ensayo con efluente terciario con unos valores superiores al 94 % del caudal inicial. Al final de los ensayos, el sistema de filtración de arena estuvo filtrando un 97 % del caudal inicial con los dos efluentes pero los otros sistemas de filtración mantuvieron un mayor porcentaje de caudal inicial con el efluente terciario (entre el 94% y 98 %) que con efluente secundario (entre el 88 y el 93 %).

5.3.6. Presión del lateral monitorizado

En este apartado se presenta la evolución de la presión en los laterales de riego monitorizados y su relación con las medidas realizadas con el manómetro digital portátil utilizado durante las medidas de uniformidad del riego.

5.3.6.1. Relación entre la presión de los laterales medida en continuo y la presión medida con el manómetro digital

Se realizó un test de separación de medias para diferenciar la medida de presión tomada con el manómetro digital portátil y la medida tomada con el transductor de presión ubicado en el lateral. No se encontraron, con ningún transductor, diferencias significativas ($P < 0.05$) entre las dos medidas (Tabla 5.29), lo que indica que los dos medidores proporcionaron la misma información. En este estudio estadístico, se presentan la media de mínimos cuadrados en lugar de la media directa por la falta de alguna pareja de valores. Por lo tanto, el uso de transductores para monitorizar la presión a lo largo de laterales de riego permitió obtener resultados comparables a las lecturas manuales periódicas.

Tabla 5.29. Diferencias entre la presión medida por el transductor y la medida por el manómetro digital. Un P-valor <0.05 indica que existen diferencias significativas entre los dos valores.

Ubicación transductor	Presión manómetro (kPa)		Presión transductor (kPa)		P-valor
	Media mínimos cuadrados	Error estándar	Media mínimos cuadrados	Error estándar	
<i>U1 0</i>	160.73	2.28	165.88	2.28	0.1108
<i>U1 0.33</i>	122.96	2.20	121.03	2.20	0.5352
<i>U1 0.66</i>	102.77	2.12	101.17	2.12	0.5943
<i>U1 1</i>	98.32	2.20	97.61	2.20	0.8183
<i>U2 0</i>	152.77	2.28	157.77	2.28	0.1218
<i>U2 0.33</i>	104.69	2.28	101.91	2.28	0.3910
<i>U2 0.66</i>	83.50	2.20	79.50	2.20	0.1987
<i>U2 1</i>	77.41	2.38	75.91	2.38	0.6552
<i>U3 0</i>	156.61	2.28	159.38	2.28	0.3910
<i>U3 0.33</i>	115.23	2.28	113.38	2.28	0.5673
<i>U3 0.66</i>	96.07	2.20	95.49	2.28	0.8553
<i>U3 1</i>	88.30	2.20	90.59	2.28	0.4709
<i>U4 0</i>	157.46	2.28	160.69	2.28	0.3170
<i>U4 0.33</i>	117.86	2.20	116.43	2.20	0.6459
<i>U4 0.66</i>	97.61	2.28	95.69	2.28	0.5513
<i>U4 1</i>	91.14	2.20	91.29	2.20	0.9634

5.3.6.2. Evolución de la presión del lateral monitorizado

En la Figura 5.51 se presenta la presión registrada por el sistema SCADA en los laterales monitorizados con el gotero UN en el ensayo con efluente secundario. Se midió la presión en cuatro posiciones a lo largo del lateral y en un lateral de cada sistema de filtración.

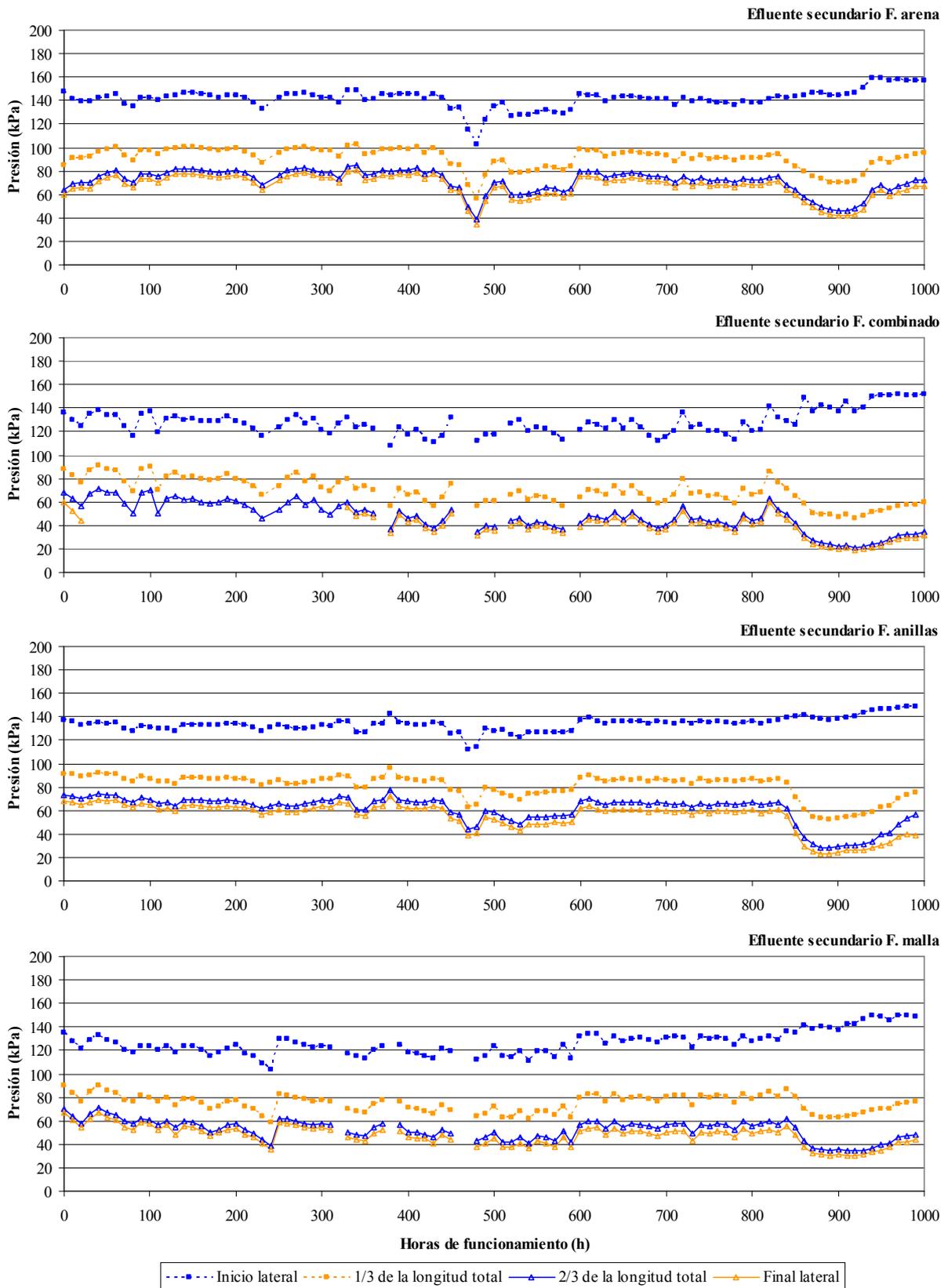


Figura 5.51. Evolución de la presión en las cuatro localizaciones del lateral UN monitorizado, para cada sistema de filtración, durante la realización del ensayo con efluente secundario.

Destaca la diferencia de presión existente entre las cuatro posiciones. Como es lógico, la mayor presión se encontró al inicio del lateral y, cuando aumentaba la distancia, se

encontraban presiones más bajas. La pérdida de presión entre los puntos de muestreo no fue constante. Entre el inicio y 1/3 de la longitud del lateral, tramo con la mayor diferencia, se produjo de media un 67 % de la pérdida de presión total del lateral. Entre 1/3 y 2/3 de la longitud del lateral, un 26 % y, en el último tercio, se perdía el 7 % restante de la caída de presión.

Al igual que se observó con el caudal monitorizado del ensayo con efluente secundario, la presión se regularizó a partir de las 600 h. En este momento se realizó la labor de mantenimiento del grupo de bombeo y la presión en los cuatro laterales monitorizados y en las cuatro posiciones muestreadas aumentó unos 20 kPa.

En los cuatro laterales en los que se monitorizó la presión se observó, a las 840 h de riego y en las tres últimas posiciones del lateral, una pérdida de presión entre 17 y 39 kPa en función de la posición y del sistema de filtración que duró menos de 100 h. Contrariamente, la posición inicial aumentó ligeramente su presión desde las 840 h hasta al final del ensayo. Después de la pérdida de presión en las tres últimas posiciones de los laterales, se registró una recuperación de 9 kPa en el lateral del sistema de filtración de anillas, de 20 kPa en el lateral del sistema combinado y de 30 kPa en el lateral del sistema de filtración de arena. Este último lateral fue el que presentó una recuperación de la presión más rápida y hasta los valores anteriores a la pérdida observada.

La pérdida de presión detectada a las 840 h de riego con efluente secundario, junto con el descenso de caudal detectado en los caudalímetros de los laterales (Figura 5.49) y de los sistemas de filtración (Figura 5.50), reafirma la hipótesis que alrededor de las 840 h hubo una entrada en la instalación de material con capacidad de obturación. Este material, que se podría haber adherido a la pared interior del lateral, provocaría una modificación de la sección de paso del agua y, en consecuencia, un aumento de la pérdida de presión, sobretodo en el primer tramo (entre el inicio y 1/3 de la longitud del lateral) que era donde circulaba un mayor caudal. El lateral del sistema de filtración con arena, fue el que se vio menos afectado seguramente gracias a su mayor capacidad de filtración, tal como se ha indicado en el apartado 5.2.1.1.

En la Figura 5.52 se presenta la presión registrada por el sistema SCADA de los laterales monitorizados con gotero UN en el ensayo con efluente terciario. Al igual que con el secundario, se midió la presión en cuatro posiciones a lo largo del lateral y en un lateral de cada sistema de filtración.

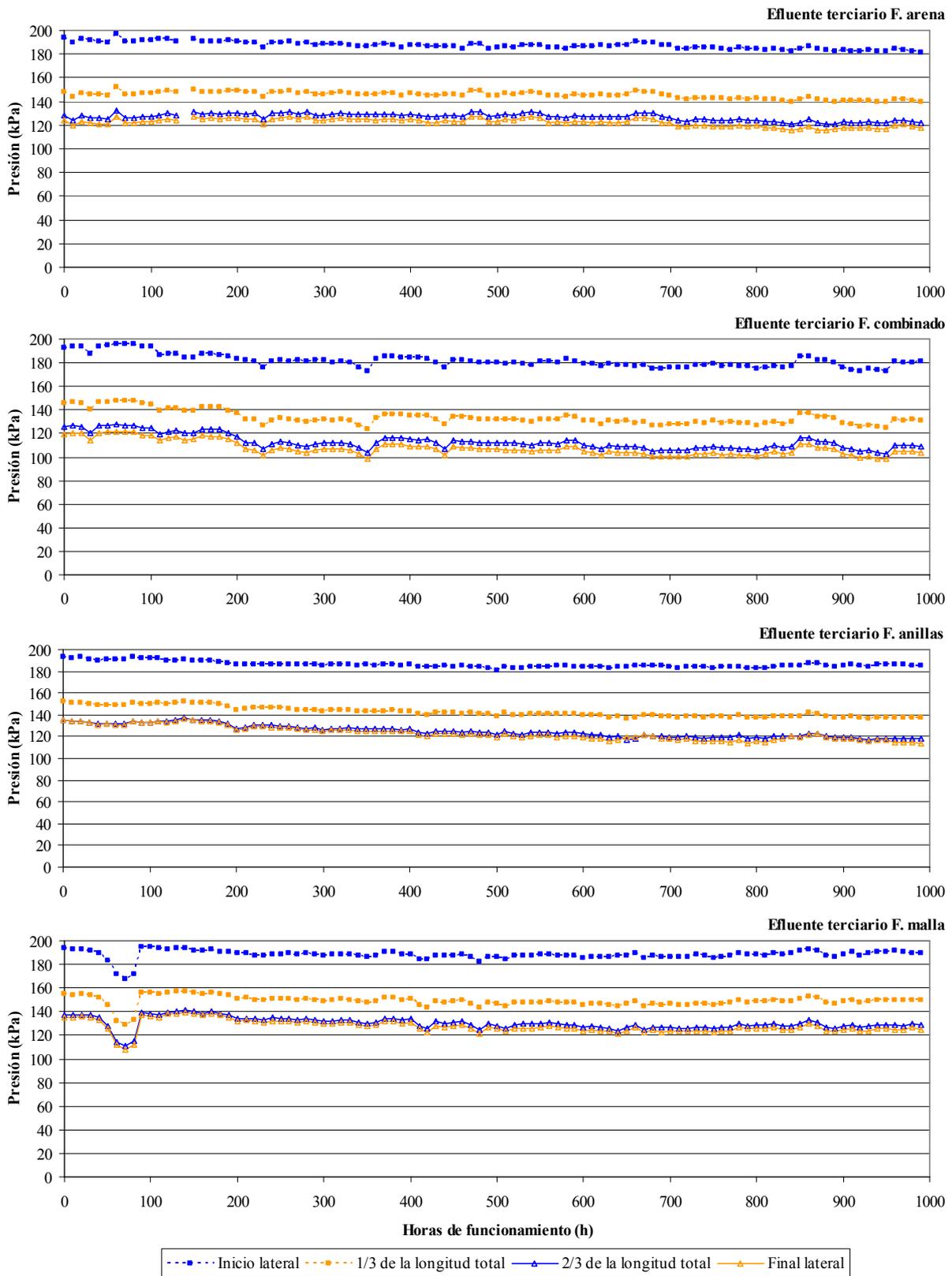


Figura 5.52. Evolución de la presión en las cuatro localizaciones del lateral UN monitorizado, para cada sistema de filtración, durante la realización del ensayo con efluente terciario.

Con el efluente terciario, la pérdida de presión a lo largo del lateral siguió la misma tendencia que se obtuvo en el ensayo con el efluente secundario, aunque los valores de la presión

absoluta fueron superiores en el ensayo con efluente terciario. En el primer tercio del lateral se produjo un 66 % de la pérdida de presión total y, en el segundo y tercer tercio, un 29 % y un 6 % de la pérdida total, respectivamente.

La presión de los laterales monitorizados en el ensayo con efluente terciario, fue más regular que la presión registrada en el efluente secundario. Esto se consiguió gracias a un comportamiento más constante de los sistemas de filtración ya que, como se ha comentado a lo largo del documento, en el ensayo con efluente terciario cada sistema de filtración funcionaba con un grupo de presión independiente, mientras que en el ensayo con efluente secundario un grupo de bombeo suministraba agua a dos sistemas de filtración.

En los cuatro laterales, se observó una tendencia a disminuir la presión en función del transcurso de las horas de riego. La diferencia entre la media de la presión de las 50 h primeras del ensayo y las 50 h últimas estuvo, con los cuatro sistemas de filtración, entre 2 y 11 kPa.

En el lateral monitorizado del sistema de filtración de malla se observó un descenso de la presión en las cuatro posiciones entre la hora 40 y la 90 de riego con efluente terciario. Este descenso, presente en todo el lateral, fue debido a un irregular suministro de efluente durante este periodo. El lateral monitorizado del sistema de filtración combinado también presentó un ligero decrecimiento en la presión en el mismo periodo. Los laterales de los sistemas de filtración de arena y anillas no lo presentaron porque no sufrieron esta irregularidad durante su periodo de funcionamiento.

5.3.7. Observación del material

5.3.7.1. Observación de los laterales y de los emisores

Se observaron deposiciones de color marrón en las paredes de los laterales (Ilustración 5.1), las cuales, una vez secas, se desprendían fácilmente al tocarlas. Chica (1999) observó que en los ramales sometidos a la circulación de aguas residuales depuradas con tratamiento primario y filtración posterior se formaban unos depósitos finos de color marrón, adheridos a las paredes del lateral. También comprobó, cuando el efluente primario no se sometía a filtración, que el depósito formado era más grueso y se desprendía fácilmente al tocarlo. Estas deposiciones en los laterales no presentaban microorganismos. Por otro lado, Puig-Bargués (2003) con efluentes secundarios y terciarios también observó la aparición de películas orgánicas, de apariencia mucilaginosas pero con presencia de microorganismos. En el presente estudio, los análisis de los emisores realizados por el Departamento de Agricultura de Netafim (Schifris, 2005) correspondientes a un muestra de goteros después de la realización del ensayo con efluente secundario, determinaron la presencia de limo, sarro, silicatos de aluminio, hierro, manganeso, arena fina de hasta 200 μm y biofilm. En las deposiciones de los emisores filtrados con filtro de arena, se encontró menos biofilm, hierro, manganeso y algas que en los emisores protegidos con otros sistemas de filtración.

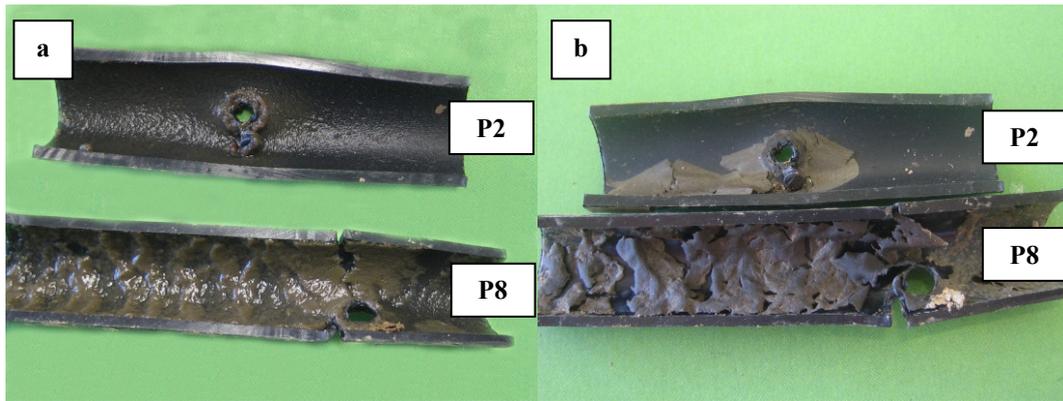


Ilustración 5.1 Deposición húmeda (a) y seca (b) al inicio del lateral con los emisores P2 y P8 con sistema de filtración de arena después de 1000 h de riego con efluente terciario.

Las películas orgánicas mucilaginosas provocadas por bacterias y algas, también conocidas como biofilms son el principal factor de obturación biológica en los sistemas de riego por goteo utilizando aguas residuales (Adin, 2002). Bucks *et al.* (1979) determinaron que los biofilms eran responsables de la producción del material pegajoso en el cual las partículas suspendidas se unían y acumulaban. Además, los biofilms pueden facilitar la precipitación de elementos químicos que podrían provocar obturaciones. Aparte de los lodos bacterianos, que inician los procesos de obturación, hay investigadores que identificaron otros agentes biológicos embozantes, como son las bacterias sulfurosas, protozoos coloniales (Sagi *et al.*, 1995) y protozoos (Ravina *et al.*, 1995).

En la Ilustración 5.2 se presenta, la vista exterior de los emisores integrados después de ser utilizados durante 1000 h en el ensayo con efluente secundario. Se observa en estas imágenes que se formó una película orgánica tanto en la superficie del lateral como en la del emisor. Esta película pudo provocar obturaciones, especialmente cuando se formaba en el filtro de entrada de agua al emisor (marcado con un perímetro blanco). En la Ilustración 5.2 se observa que los emisores TO y UN fueron los que presentaron estos puntos de entrada de agua al emisor más sucios.

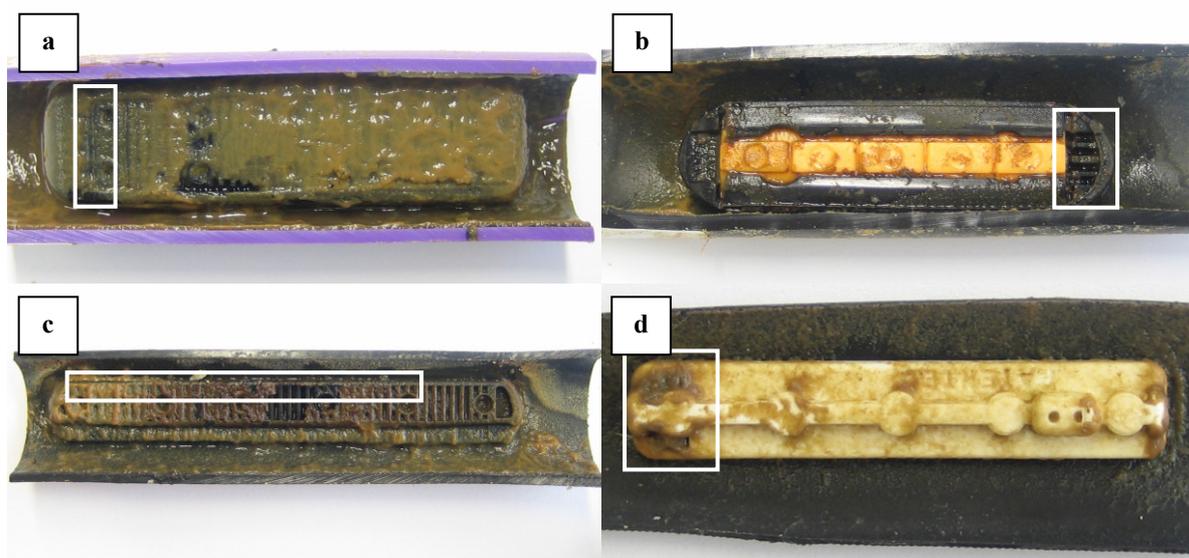


Ilustración 5.2. Estado de los emisores UN (a), RM (b), TI (c) y TO (d) ubicados al principio del lateral, después de 1000 h de riego con efluente secundario y protección con un filtro de malla. En blanco se muestra el estado de los filtros de entrada de agua a los emisores.

No se observaron obturaciones por partículas gruesas en los laberintos de los emisores (Ilustración 5.3) sino que únicamente se encontraron acumulaciones de materiales.

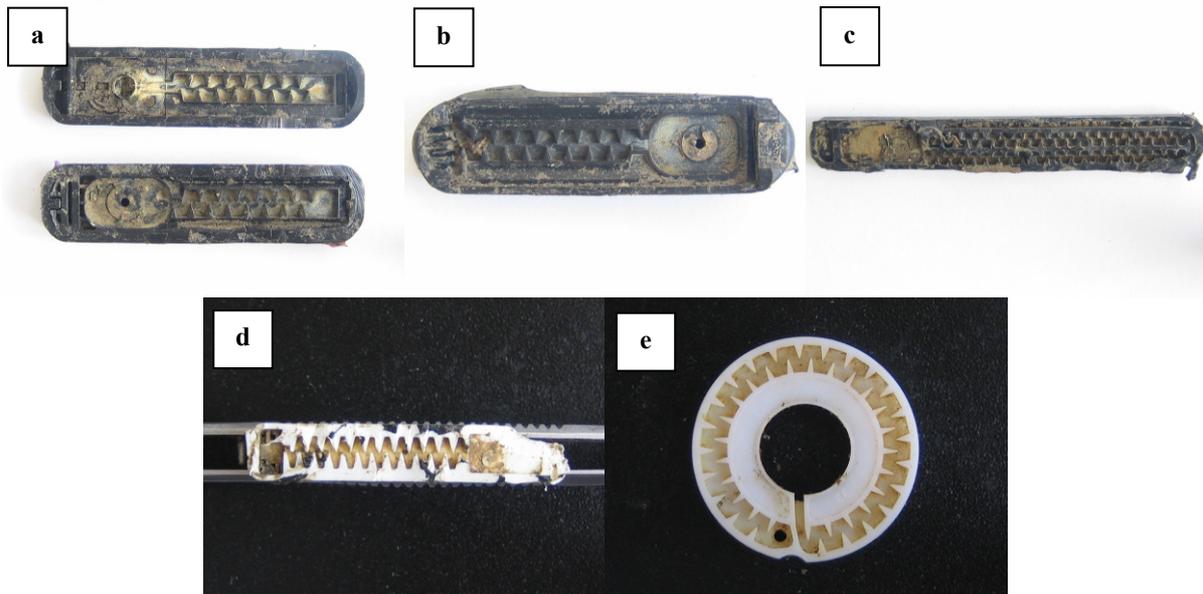


Ilustración 5.3. Estado de los laberintos de los emisores UN (a), RM (b), TI (c), TO (d) y P2 (e) del final del lateral, después de 1000 h de riego con efluente secundario y protección con un filtro de anillas.

Para poder realizar medidas de la suciedad presentada en las imágenes, se compararon las vistas exteriores y de los laberintos entre el inicio y el final del lateral, para cada tipo de emisor, sistema de filtración y efluente ensayado. En la Ilustración 5.4 se puede observar el aspecto exterior e interior del emisor TO después de 1000 h de riego con un sistema de filtración con filtros de anillas.

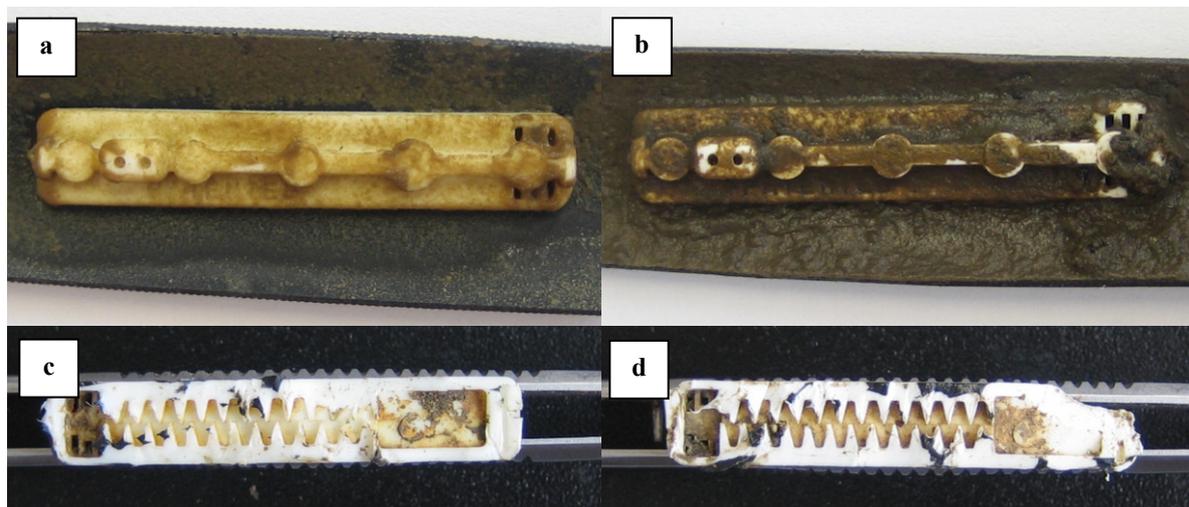


Ilustración 5.4. Fotografías del gotero TO protegido con un filtro de anillas después de 1000 h de riego con efluente secundario. Vista exterior de los emisores desde la parte interior de la tubería al inicio (a) y al final del lateral (b) y vista de los laberintos al inicio (c) y final del lateral (d).

En la Tabla 5.30 se presentan los resultados de las comparaciones efectuadas. En el ensayo con efluente secundario, se observó que los emisores no autocompensantes estuvieron más limpios al inicio del lateral que al final, tanto en el laberinto como en su vista exterior y con todos los sistemas de filtración. En las comparaciones entre el final y el inicio del lateral de

los emisores autocompensantes, no se observó ningún comportamiento regular. Por lo que se refiere a las imágenes tomadas después del ensayo con efluente terciario, se tiene que recordar que éstas fueron tomadas después del lavado por arrastre de los laterales de riego (apartado 4.20). En este caso, se observó que el número de ocasiones en que la vista exterior del emisor del final del lateral había menos suciedad que al inicio era mayor respecto al ensayo con efluente secundario.

Tabla 5.30. Indicación de la posición menos sucia (inicio o final) según las imágenes de las fotografías tomadas para cada emisor, sistema de filtración, vista del emisor y efluente ensayado.

Efluente	Vista	Sistema de filtración	Emisor					
			UN	RM	P2	P8	TO	TI
Secundario	Exterior	Arena	final	inicio	inicio	-	inicio	inicio
		Anillas	inicio	inicio	final	-	inicio	inicio
		Combinado	final	final	final	-	inicio	inicio
		Malla	inicio	inicio	inicio	-	inicio	inicio
	Laberinto	Arena	final	inicio	final	-	inicio	inicio
		Anillas	inicio	inicio	final	-	inicio	inicio
		Combinado	final	final	inicio	-	inicio	inicio
		Malla	inicio	final	inicio	-	inicio	inicio
Terciario	Exterior	Arena	final	inicio	inicio	final	final	inicio
		Anillas	final	inicio	inicio	final	final	inicio
		Combinado	final	inicio	final	final	final	inicio
		Malla	final	final	inicio	final	inicio	inicio
	Laberinto	Arena	inicio	final	final	inicio	inicio	final
		Anillas	final	final	inicio	final	final	inicio
		Combinado	final	inicio	final	inicio	final	inicio
		Malla	final	final	inicio	inicio	inicio	inicio

Para intentar obtener más información, se calificó de manera cualitativa la suciedad para cada gotero y tratamiento, valorándola de menos (1) a más (4), como, a modo de ejemplo, se muestra en la Ilustración 5.5.

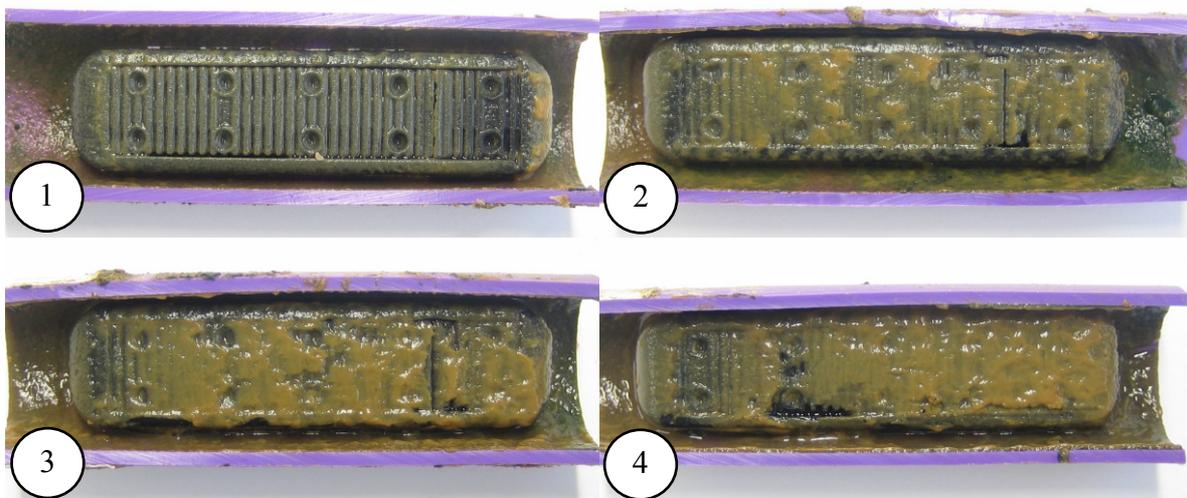


Ilustración 5.5. Vista exterior del emisor UN del inicio del lateral y protegido con sistema de filtración de arena (1), anillas (2), combinado (3) y malla (4) después del ensayo de 1000 h con efluente secundario.

En la Tabla 5.31 se presentan los valores resultantes de sumar la puntuación obtenida por cada sistema de filtración con los distintos emisores ensayados.

Tabla 5.31. Valoración de la suciedad presentada en el exterior e interior de los emisores, al inicio y al final de los laterales con los dos efluentes ensayados. Para un mayor valor indica mayor suciedad presentada.

Efluente	Sistema de filtración	Vista exterior del emisor		Vista del Laberinto		Total
		Inicio lateral	Final lateral	Inicio lateral	Final lateral	
Secundario	Arena	10	16	10	14	50
	Anillas	26	32	30	26	114
	Combinado	28	18	30	24	100
	Malla	36	34	30	36	136
Terciario	Arena	17	18	11	20	66
	Anillas	28	25	32	25	110
	Combinado	23	27	22	23	95
	Malla	32	30	35	32	129

De la valoración presentada en la Tabla 5.31 se extrae que, tanto para la vista externa como para la del laberinto del emisor, en las dos posiciones analizadas la menor suciedad se presentó cuando los emisores estaban protegidos con el filtro de arena. En todas las valoraciones realizadas en el ensayo con efluente secundario, el sistema de filtración de arena fue el que permitió encontrar menos suciedad en los emisores, obteniendo hasta la mitad de puntos que los otros sistemas de filtración. Con efluente terciario, aunque las imágenes fueron tomadas después del lavado de los laterales, el sistema de filtración de arena también obtuvo una puntuación muy inferior a los otros sistemas de filtración.

El sistema de filtración de malla, si bien con menos diferencia que la evidenciada por el sistema de filtración de arena, fue el que presentó los emisores con más suciedad en casi todas las vistas y posiciones. Por último, los emisores protegidos con el sistema de filtración de anillas y el sistema combinado de malla y anillas, fueron los que presentaron un grado medio de suciedad, con pocas diferencias entre ellos.

La valoración de la suciedad no se realizó entre distintos goteros puesto que por la diferente forma y puntos de acumulación de sedimento y formación de biofilm, no era posible efectuar una calificación objetiva. Sin embargo, se observó que, en líneas generales, de los emisores autocompensantes de presión, los emisores UN fueron los que presentaron más suciedad y los emisores RM los que menos. Por su lado, los emisores TI fueron los más limpios entre los no autocompensantes de presión. Estos resultados coinciden con lo indicado en el apartado 5.3.1, donde el emisor UN, al final del ensayo con efluente secundario, obtuvo unos bajos porcentajes de caudal inicial, frente los buenos resultados obtenidos con los emisores RM y TI.

5.3.7.2. Observación de la deposición sólida de los laterales

Se observaron al microscopio electrónico muestras del final del lateral recogidas con la finalidad de determinar la naturaleza de las deposiciones de los laterales después de 1000 horas de riego.

Al final de los ensayos con efluente terciario, se detectó una deposición sólida formada al final de los laterales (Ilustración 5.6). La menor velocidad de circulación del efluente al final

de los laterales facilita la sedimentación de partículas (Shannon *et al.*, 1982). Este depósito tomó forma de limo bacteriano y también fue detectado por Ravina *et al.* (1992), Trooien *et al.* (2000) y Hills y Brenes (2001).

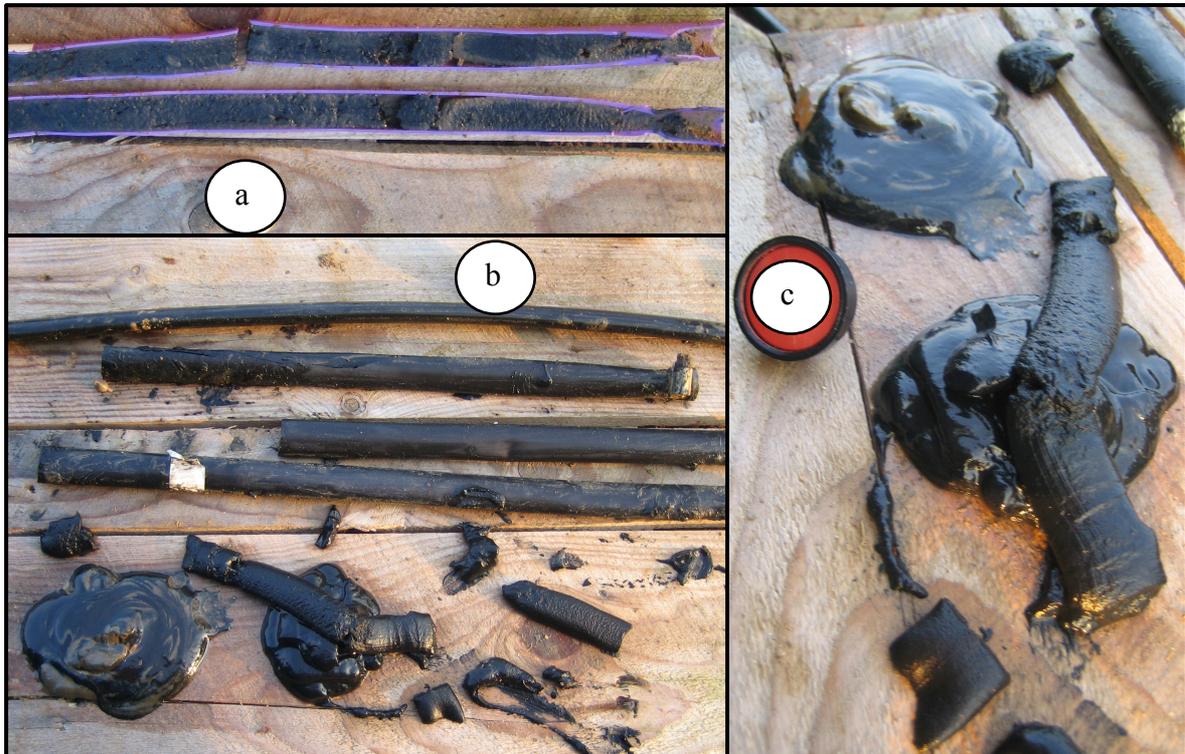


Ilustración 5.6. Depósito acumulado al final del lateral con emisor UN (a) y TO (b y c) después de 1000 h de riego con efluente secundario.

Las deposiciones se observaron con el microscopio electrónico de rastreo y se detectaron algas, bacterias, protozoos ciliados, partículas orgánicas e inorgánicas y restos de tejido de vegetales superiores. Puig-Bargués (2003), aunque no halló bacterias en el interior de los goteros, sí que las observó en el interior de los laterales de riego utilizando efluente terciario de una estación depuradora.

En la Ilustración 5.7 se presentan imágenes de material inorgánico y en la Ilustración 5.8 y en la Ilustración 5.9 imágenes de material procedente de vegetales superiores hallados en la observación de las deposiciones.

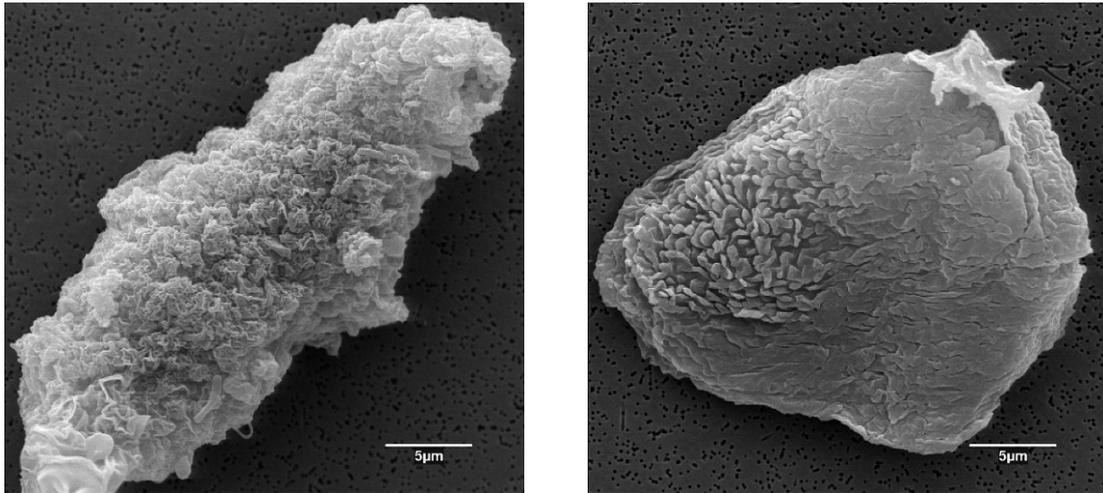


Ilustración 5.7. Partículas minerales observadas al final del lateral con emisor P8 y sistema de filtración de anillas.

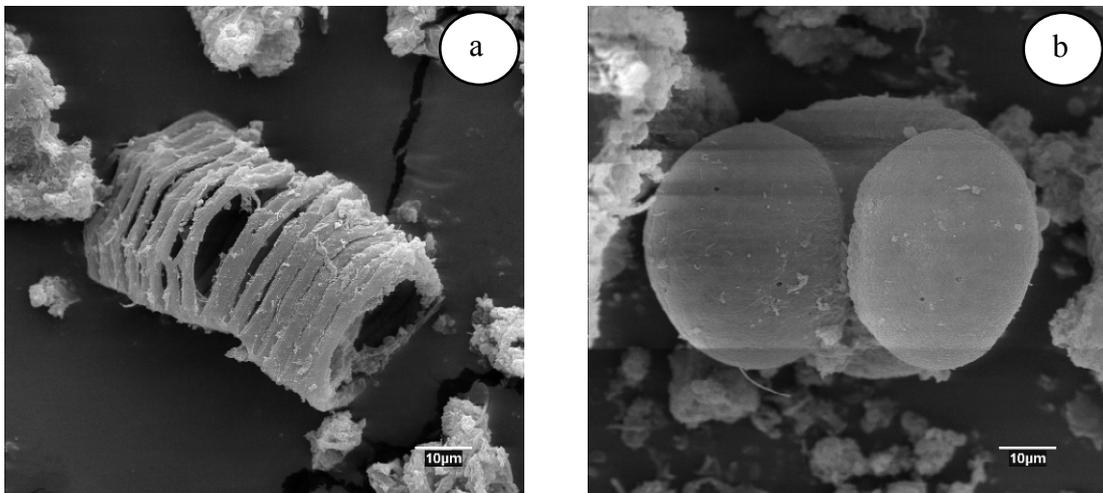


Ilustración 5.8. Vaso conductor de vegetal superior (a) y grano de polen (b), observados en el depósito del lateral con emisor P8 y filtración de anillas.

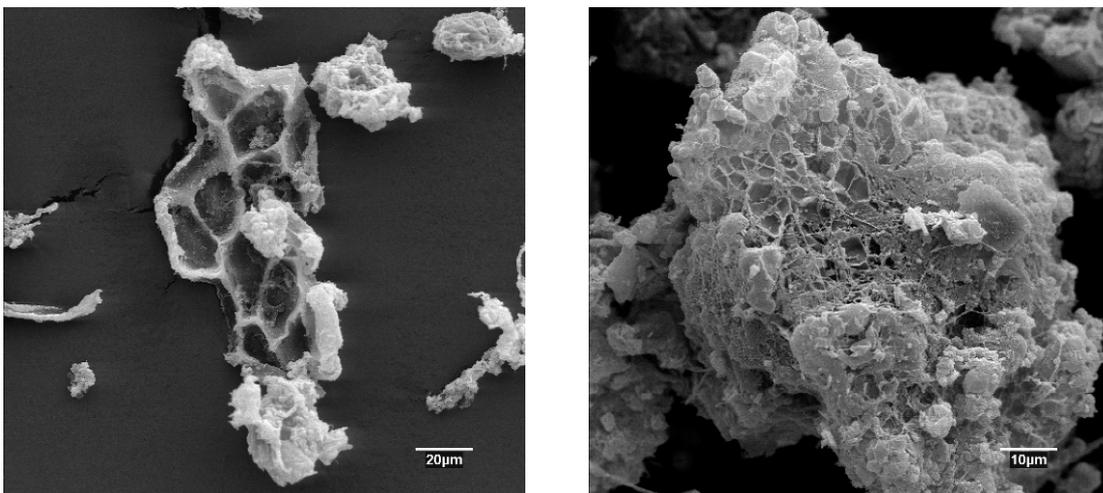


Ilustración 5.9. Resto de pared celular de vegetal superior observado en el depósito del final del lateral con emisor P8 y filtración con anillas.

También se observaron diatomeas de distintos géneros (Ilustración 5.10 e Ilustración 5.11). Las diatomeas son algas del grupo de las crisófitas, unicelulares, que están envueltas por una membrana de pectina impregnada de sílice y dividida en dos mitades. En realidad, en las imágenes captadas del microscopio se observan estas estructuras silíceas que han resistido a los procesos de preparación de la muestra para su observación al microscopio.

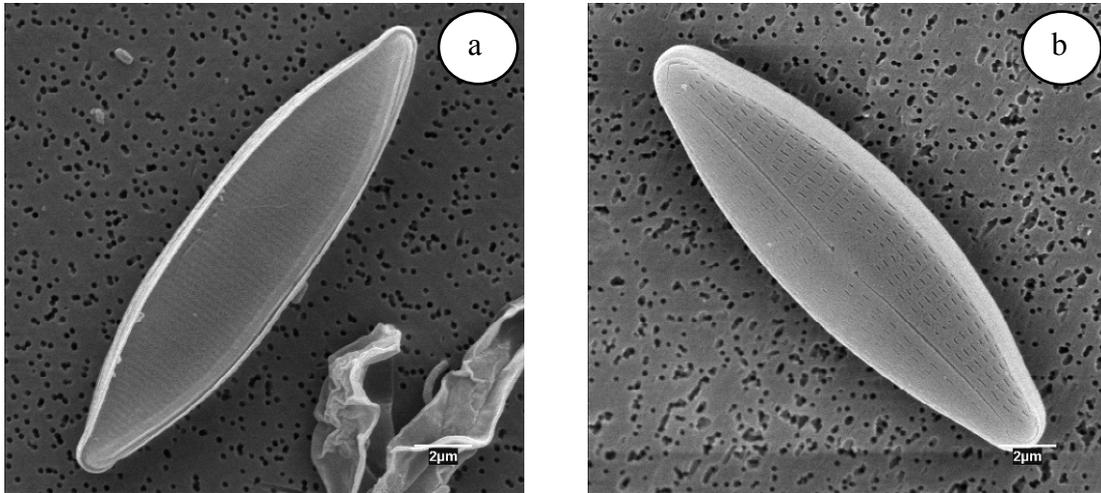


Ilustración 5.10. Diatomea del género *Nitzschia* encontrada al final del lateral con emisor P8 y filtro de anillas (a), y diatomea del género *Navicula* encontrada al final del lateral con emisor UN y filtración de malla (b).

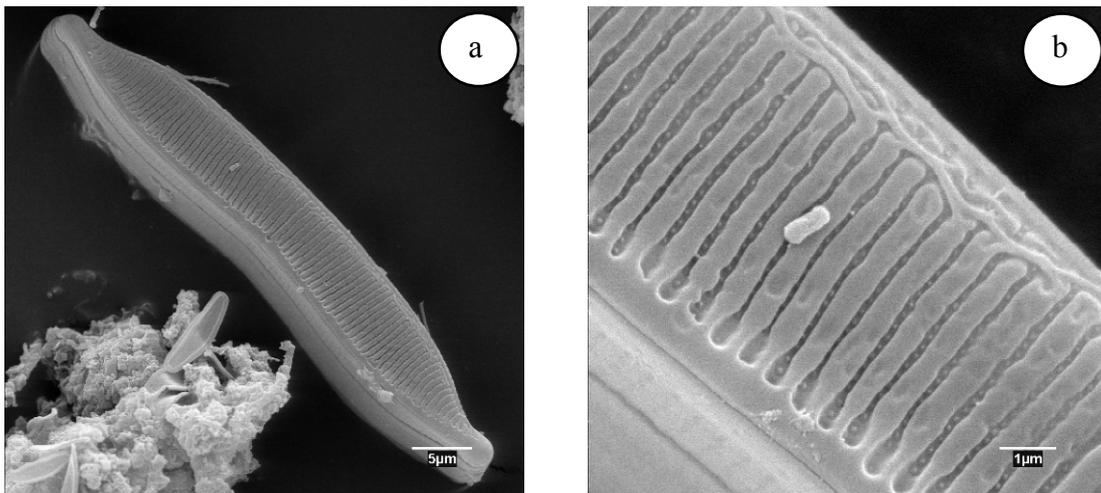


Ilustración 5.11. Diatomea del género *Hantzschia* (a) y su detalle con una bacteria (b) observada al depósito al final del lateral con emisor P8 y sistema de filtración con anillas.

Las diatomeas del género *Hantzschia*, de tamaño considerable, viven en lugares subaéreos y resisten a cambios de humedad y las del género *Nitzschia* viven en aguas dulces y saladas (Canter-Lund y Lund *et al.*, 1996).

En las muestras de los depósitos se detectaron escamas de tecamebas y tecamebas (Ilustración 5.12) y protozoos de la clase de los cilióforos (Ilustración 5.13).

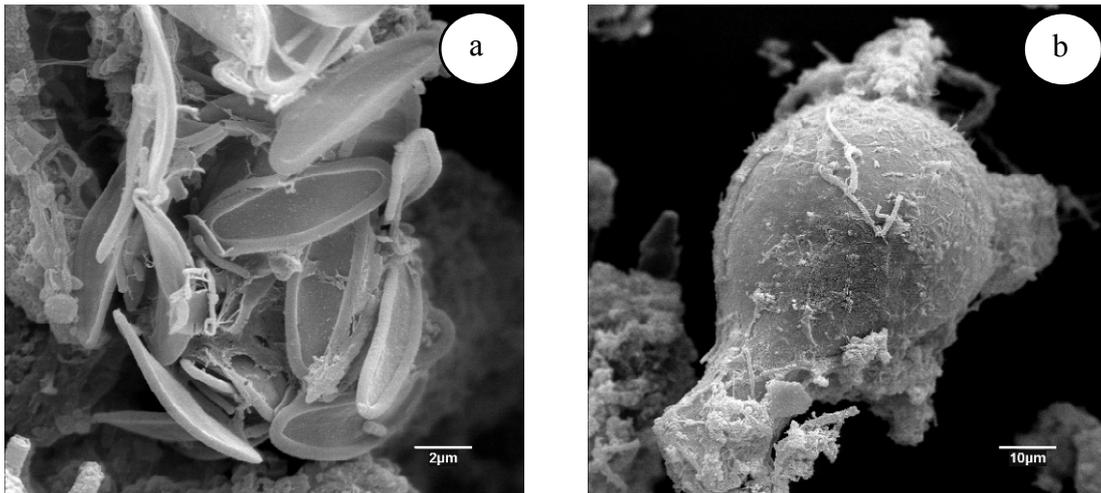


Ilustración 5.12. Escamas de tecamebas (a) y tecameba (b) observadas en el depósito del lateral con emisor P8 y filtración con anillas

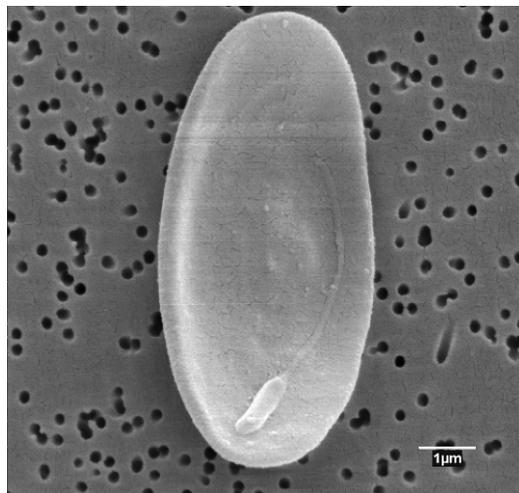


Ilustración 5.13. Protozoo de la clase de los cilióforos observado en la deposición del lateral con emisor TO y sistema de filtración combinado.

Formando parte de los depósitos también se detectaron protozoos ciliados peritrícos del género *Vorticella* (Ilustración 5.14 e Ilustración 5.15). Estos microorganismos unicelulares generalmente viven en aguas dulces, en forma solitaria o formando grupos y están unidos al sustrato con un pedúnculo contráctil.

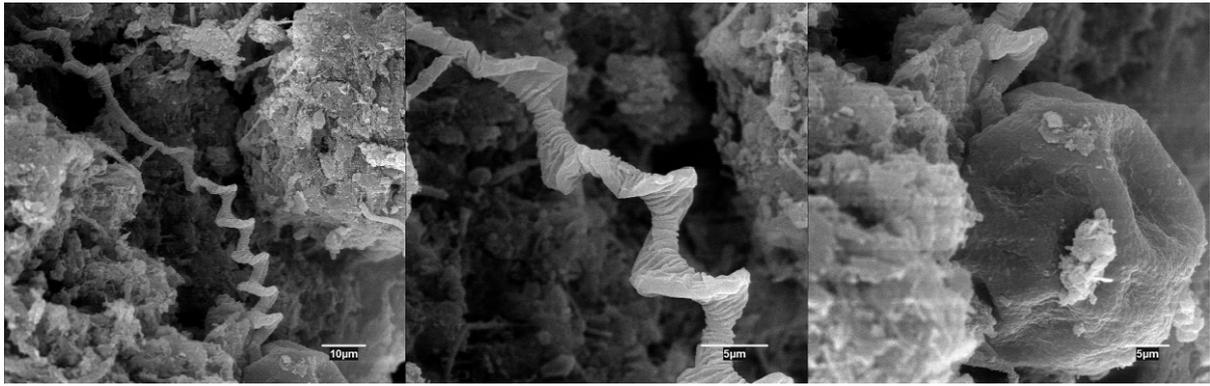


Ilustración 5.14. Protozoo ciliado del género *Vorticella* observado al final del lateral con emisor UN y filtración con malla.

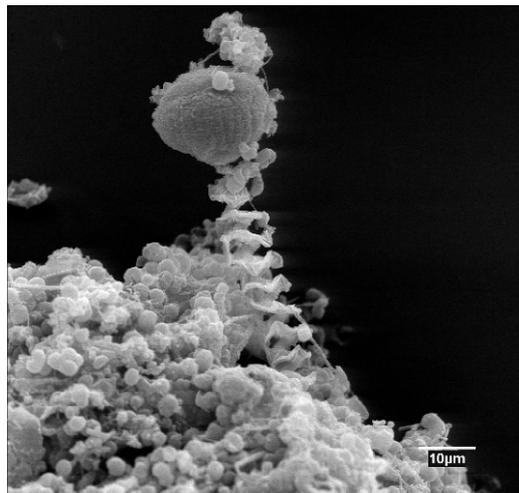


Ilustración 5.15. Protozoo ciliado del género *Vorticella* observado al final del lateral con emisor UN y filtración con arena

Se detectaron también gran cantidad de bacterias sobre materia orgánica, seguramente en proceso de descomposición, o bien aisladas (Ilustración 5.16 e Ilustración 5.17). Resende *et al.* (2001) identificaron bacterias del género *Bacillus* en el interior de emisores obturados.

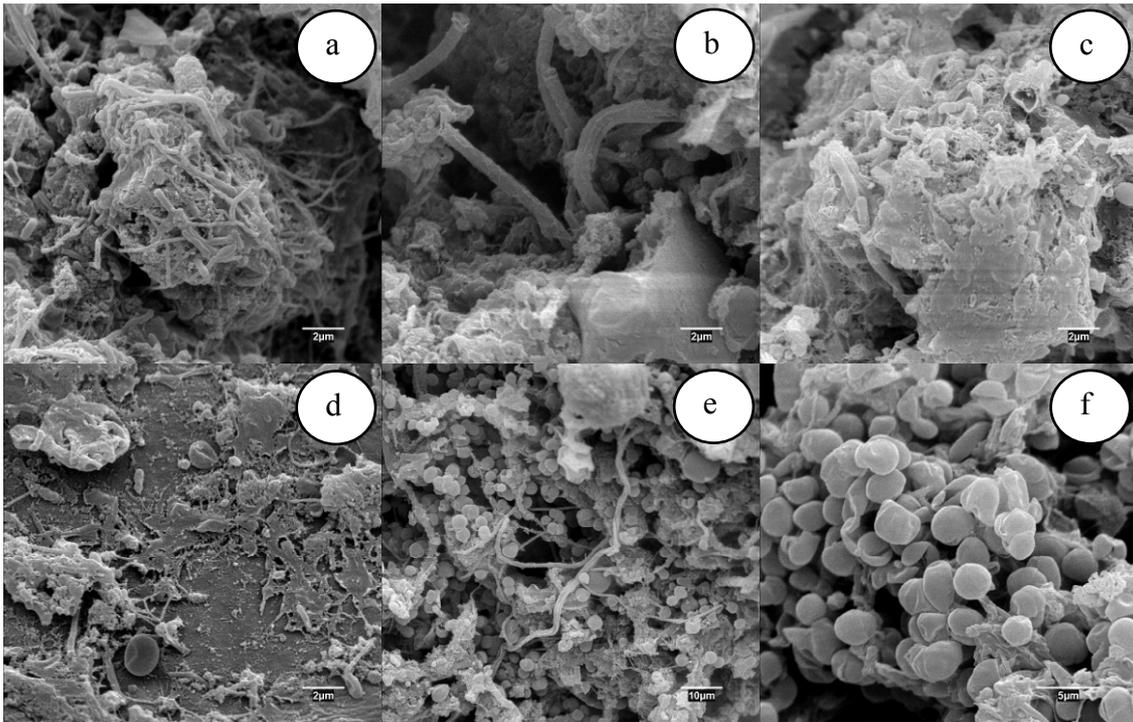


Ilustración 5.16. Bacterias observadas sobre masas de origen orgánico. Las imágenes fueron tomadas de las deposiciones de los laterales con emisores P8, TI y UN con filtración de anillas (a), combinada (b) y malla (c), y de las deposiciones de los laterales con emisor UN y sistema de filtración de malla (d) y arena las dos siguientes (e y f).

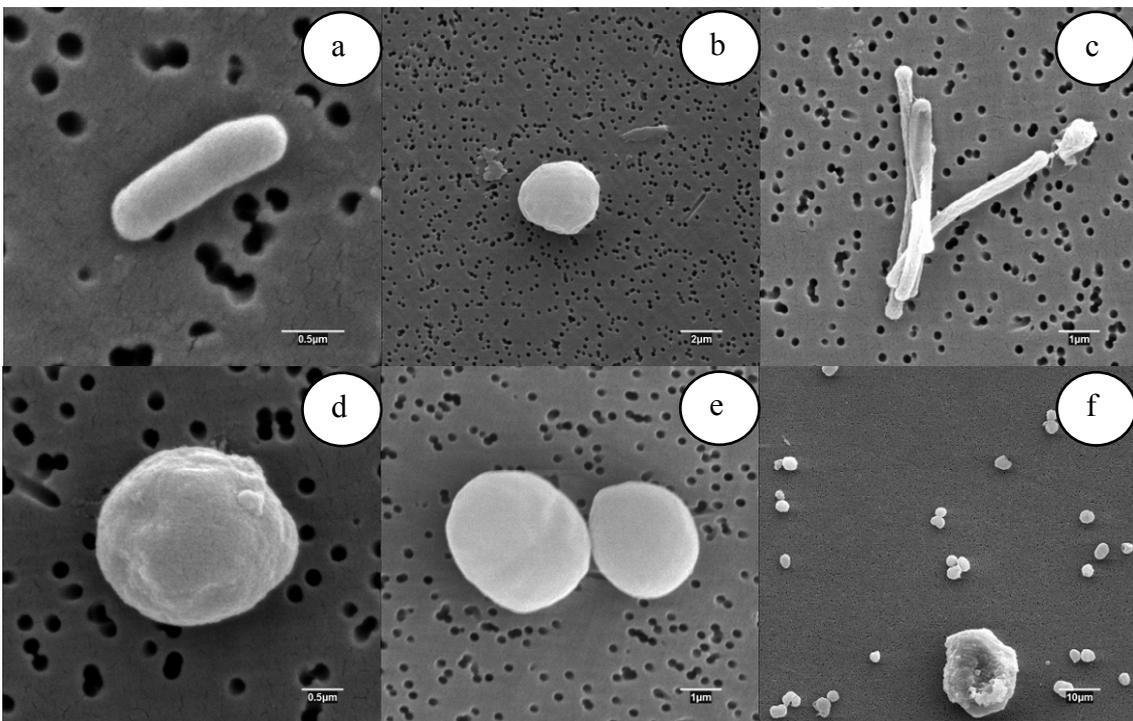


Ilustración 5.17. Bacterias observadas en las deposiciones del final de los laterales de riego. En la parte superior, observaciones de los laterales con emisores P8, TI y TO con sistemas de filtración de anillas (a), combinado (b) y combinado (c); del lateral TO y filtración combinada (d) y del lateral UN con sistema de filtración de arena (e y f).

También se detectaron espiroquetas, bacterias gram-negativas que tienen células largas y enrolladas helicoidalmente. La mayoría viven en condiciones anaeróbicas y muchos de ellas son patógenos de los humanos (Ilustración 5.18).

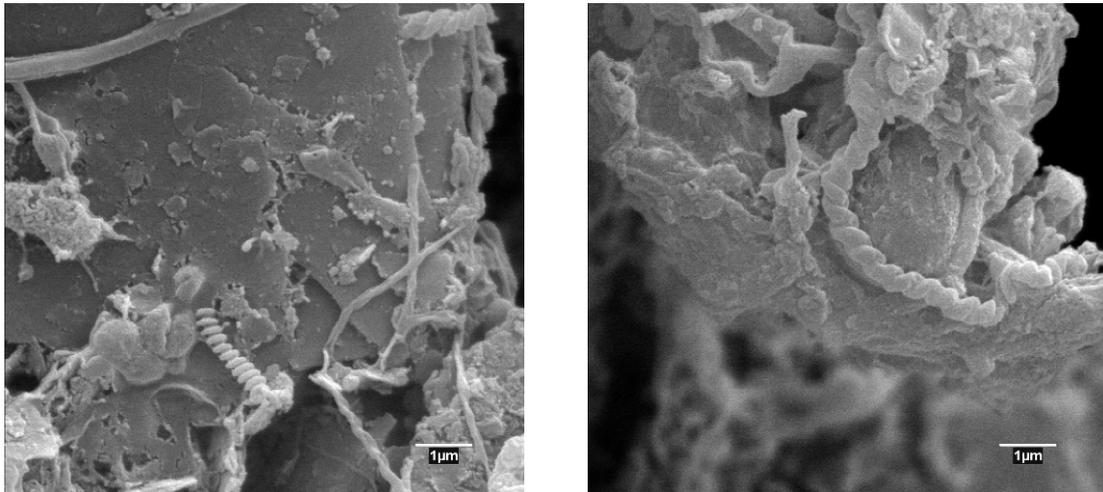


Ilustración 5.18. Bacterias espiroqueta observadas en las deposiciones del lateral con emisor TO y filtración combinada.

6. Conclusiones

Las conclusiones obtenidas se presentan de acuerdo con los objetivos fijados en la tesis.

A. En relación con la definición del potencial embozante del agua regenerada utilizada a partir de la caracterización física, química y biológica de los efluentes y a su contraste con los resultados obtenidos:

1. Los dos efluentes utilizados han presentado un potencial de obturación de tipo física débil y de tipo química moderada.
2. Teniendo en cuenta la determinación puntual de bacterias aerobias mesófilas, el efluente secundario ha presentado un potencial de obturación biológica importante, mientras que con el efluente terciario ha sido moderado.

B. En relación con la variación de las características físicas, químicas, biológicas y de las partículas de los efluentes causada por distintos sistemas de filtración:

1. El sistema de filtración con arena ha sido el único que ha reducido significativamente los sólidos en suspensión y la turbidez del efluente de entrada. Concretamente, ha reducido un 47.30 % y un 66.63 % los sólidos en suspensión del efluente secundario y terciario, respectivamente, y un 57.57 % y un 66.38 % la turbidez del efluente secundario y terciario, respectivamente. Con el sistema de filtración combinado y efluente terciario, se ha reducido un 5.07 % el oxígeno disuelto del efluente de entrada.
2. Se han observado incrementos de sólidos en suspensión y turbidez a la salida de los filtros de malla y anillas en estado obturado, provocados por liberaciones de material de la torta de filtración.
3. La conductividad eléctrica y el pH no se han visto afectados por ninguno de los sistemas de filtración.
4. Por lo que se refiere al número de partículas, también el filtro de arena ha sido el único capaz de reducirlo, aunque sin diferencias significativas con los otros filtros.
5. Los filtros de malla y anillas en estado obturado han retenido más partículas que en estado no obturado debido a la reducción de la luz de paso provocada por la torta de filtración.
6. El filtro de arena ha provocado la reducción de la media de la distribución de partículas de los efluentes secundario y terciario, consiguiendo una disminución del porcentaje de partículas de tamaño superior a 3 μm .
7. Los sistemas de filtración con mayor superficie de filtración, el de arena y el combinado, han sido los que han obtenido unas mayores reducciones del número de partículas por tamaños con los dos efluentes ensayados.
8. El filtro de arena ha provocado la disminución de la mediana de la distribución del volumen de partículas, reduciendo el porcentaje de partículas de tamaño superior a 15 μm .

C. *En relación con la determinación de los volúmenes de efluente filtrados en cada ciclo de filtración, los tiempos y las características del embozamiento en los distintos sistemas de filtración, analizando los lavados en cuanto a frecuencia, volumen de efluente utilizado y eficiencia:*

1. Los filtros de arena, anillas y malla en el combinado, anillas y malla se han obturado, en funcionamiento eficiente, con la filtración de 43.01, 92.95, 29.28, 39.30 y 35.58 m³ de efluente secundario, respectivamente, y con 13.22, 145.79, 48.55, 52.40 y 56.36 m³ de efluente terciario, respectivamente. Los volúmenes filtrados en cada ciclo de filtración con los filtros de arena y anillas con los dos efluentes, han ido disminuyendo a medida que transcurrían las horas de ensayo.
2. Los filtros con mayores consumos de agua durante los lavados, han sido los de arena, anillas y malla, con 1.10 %, 0.69 % y 0.17 % para el ensayo con efluente secundario, respectivamente y 5.04 %, 0.32 % y 0.14 % para el efluente terciario, respectivamente.
3. Los filtros de anillas y malla han presentado más requerimientos de presión para su lavado automático que los filtros de arena. Con presiones de lavado más bajas los filtros de malla y anillas han necesitado más lavados manuales.
4. La utilización de un filtro de arena durante 1000 horas y la filtración de 8281 m³ de efluente secundario o de 8485 m³ de efluente terciario, ha implicado que el diámetro efectivo de la arena haya aumentado (0.01 y 0.25 mm para el efluente secundario y terciario, respectivamente), y el coeficiente de uniformidad haya disminuido a valores inferiores a 2.
5. Se ha podido determinar la conductividad hidráulica saturada del medio granular del filtro de arena utilizando la Ley de Darcy. En cada ciclo de filtración el valor de la conductividad hidráulica ha decrecido hasta 5 m/h en el momento del lavado, que ha vuelto a recuperarse hasta 16 y 9 m/h en el ensayo con efluente secundario y terciario, respectivamente. En el ensayo con efluente secundario, la conductividad hidráulica saturada media ha sido 1.5 m/h mayor a la obtenida con efluente terciario.
6. Con la ecuación de Poiseuille se ha calculado el diámetro del poro del medio granular y se ha observado que éste ha sido mayor en la arena del ensayo con el efluente secundario que con el efluente terciario. Por tanto, el menor diámetro del poro medido en la arena del efluente terciario, coincide con la mayor capacidad de retención de los sólidos en suspensión obtenida en el ensayo con efluente terciario.

D. *En relación con encontrar ecuaciones explicativas de los procesos de filtración a partir de relacionar la evolución de la pérdida de presión en los filtros con el volumen de efluente filtrado y desarrollar fórmulas mediante análisis dimensional que relacionen estas dos variables con las características del efluente y de los filtros:*

1. La evolución de la pérdida de carga producida en los filtros de anillas, malla y arena se ha ajustado significativamente a la relación de Boucher. Las medias de los coeficientes de regresión obtenidos para cada filtro y efluente han sido superiores a 0.92.
2. Con los sistemas de filtración de malla y anillas, se han obtenido unos mayores índices de filtrabilidad, indicativos de una mayor obturación, en el ensayo con efluente

secundario que con el terciario, mientras que con el sistema de filtración de arena, los índices de filtrabilidad han sido superiores en el ensayo con efluente terciario.

3. Con el efluente secundario el filtro que ha presentado mayor índice de filtrabilidad y, por tanto, ha presentado un mayor embozamiento ha sido el de malla, seguido por el de anillas y el de arena, ambos con unos índices muy parecidos. Con el efluente terciario, el filtro de arena ha presentado el mayor índice de filtrabilidad y por tanto una obturación superior, seguido del de malla y del de anillas.
 4. El análisis dimensional ha permitido desarrollar ecuaciones utilizando las variables pérdida de carga en el filtro, diámetro de paso del agua en los filtros de anillas y malla o diámetro efectivo de la arena del filtro, diámetro medio de las partículas del efluente, superficie total de filtración, caudal y volumen de agua que atraviesa el filtro, contenido en sólidos en suspensión del agua, la viscosidad y densidad del efluente, velocidad de filtración y diámetro de la tubería de entrada al filtro. Con una de las ecuaciones desarrolladas y cada uno de los filtros, se ha obtenido unos ajustes significativos y con unos buenos coeficientes de regresión. También se han ajustado los datos a otras relaciones existentes, obteniendo unos ajustes significativos para cada uno de los filtros y con unos aceptables coeficientes de regresión.
- E. En relación a conocer la adecuación de los distintos emisores y filtros a partir de los tiempos y características del embozamiento en los goteros, la evolución del caudal de los goteros, el efecto de la compensación de presiones y la localización de los atascamientos en los laterales:*
1. La uniformidad de presión de todos los emisores, a lo largo de todo el ensayo, con los cuatro sistemas de filtración y los dos efluentes ensayados, ha sido superior a 91.90 %. Por lo tanto, los problemas en la distribución de caudales, al ser el coeficiente de fabricación inferior al 3 %, han sido causadas por obturaciones en los goteros.
 2. La diferencia entre la uniformidad de emisión y el porcentaje de caudal inicial ha sido mayor cuanto mayor era el número emisores completamente obturados.
 3. El emisor utilizado y su localización a lo largo del lateral han sido factores con un efecto significativo en el caudal emitido por los goteros en los ensayos con los dos efluentes. Además, en el ensayo con efluente terciario, el sistema de filtración también ha tenido un efecto significativo en el caudal emitido por los emisores.
 4. En la posición final del lateral de riego es donde se han presentado más diferencias en el porcentaje de caudal emitido entre los distintos emisores. Los emisores UN y TO con los dos efluentes ensayados, han sido los que han presentado unas mayores reducciones de caudal emitido debido a una mayor aparición de emisores completamente obturados. Aunque el porcentaje de caudal emitido por los emisores UN y TO ha sido parecido a las 1000 horas, su comportamiento a lo largo de los ensayos ha sido distinto. Mientras el emisor TO ha presentado una disminución constante a lo largo del ensayo, el emisor UN ha mostrado la disminución del caudal emitido en las últimas 200 horas del ensayo.
 5. El emisor RM ha presentado en algunos muestreos caudales superiores de hasta un 6 % del caudal inicial.

6. Los emisores P2 y P8 con los dos efluentes ensayados y, RM con el efluente terciario sólo han presentado obturación parcial pero no total.
 7. Un lavado de los laterales a velocidades entre 0.41 y 0.80 m/s después de 1000 h de riego y sin aplicar ningún tipo de tratamiento químico durante el ensayo, no ha conseguido una recuperación significativa de los caudales de los goteros obturados.
 8. El caudal del lateral estimado a partir de las medidas de caudal emitido en cuatro puntos de los laterales ha sido significativamente inferior al medido con el caudalímetro instalado al inicio del lateral. Los emisores completamente obturados al final del lateral han provocado la subestimación del caudal del lateral. Esta diferencia ha aumentado a medida que han transcurrido las horas de riego del ensayo.
 9. El caudal filtrado se ha reducido durante la realización de los ensayos con los dos efluentes debido a la obturación de los goteros. Después de 1000 horas de riego, el caudal emitido por los laterales protegidos con sistema de filtración combinado, anillas y malla, se ha encontrado entre 87 y 90 % del inicial con el efluente secundario y entre 92 y 94 % con el efluente terciario. El sistema de filtración de arena, ha obtenido al final del ensayo con efluente secundario un caudal emitido superior al 95 % y con el efluente terciario, un 87 %.
 10. Con el efluente terciario ha existido un efecto significativo de la interacción entre filtro y posición en el caudal emitido por los goteros. Únicamente en la posición final del lateral ha habido diferencias, obteniéndose los mayores caudales con el filtro de malla y los menores con el de anillas.
 11. No se ha apreciado una reducción de caudal distinta entre emisores autocompensantes y no autocompensantes.
- F. En relación con la caracterización de las deposiciones de material en los filtros, laterales y goteros:*
1. Los embozamientos de los filtros han sido causados por la fracción orgánica y biológica del agua utilizada.
 2. Se han detectado películas orgánicas mucilaginosas en las paredes y emisores utilizados para regar con efluente secundario y terciario. Se han localizado obturaciones en los filtros de los emisores mientras que en los laberintos no se han observado partículas gruesas que provocasen obturaciones sino acumulaciones de materia.
 3. Los emisores protegidos con el sistema de filtración de arena han sido los que presentaron menor suciedad tanto en la superficie expuesta al flujo de agua como en los laberintos internos, mientras que los protegidos con el sistema de filtración de malla han presentado los emisores con mayor suciedad.
 4. Se ha formado una deposición sólida en el final de los laterales, constituida por algas, bacterias, protozoos ciliados, partículas orgánicas e inorgánicas y restos de tejido de vegetales superiores.

G. En relación a la evaluación de la utilidad de un sistema SCADA para manejar y controlar un sistema de riego por goteo utilizando aguas regeneradas:

1. El sistema de supervisión, control y adquisición de datos que se ha implantado ha funcionado correctamente durante los dos experimentos de 1000 h de duración.
2. La medición en continuo del caudal y presión ha permitido detectar fallos en la instalación cuando han ocurrido, variaciones en estos dos parámetros y el agente que las ha producido.

7. Futuros desarrollos

Después de la conclusión de esta tesis doctoral, se han abierto planteamientos para futuras investigaciones en las que se puede intentar abordar los siguientes aspectos:

- Realizar la medición en continuo de los parámetros físico-químicos del efluente utilizado. Esta medición en continuo permitiría relacionar las variaciones de los efluentes con las variaciones en el comportamiento hidráulico de los sistemas de filtración y emisores, además poder describir mejor los procesos de filtración a partir de las relaciones adimensionales desarrolladas.
- Estudiar sistemas de operación de los sistemas de filtración que requieran menos presión de funcionamiento del sistema.
- Estudiar el efecto de los lavados de los laterales en el comportamiento hidráulico de los goteros.
- Investigar la viabilidad del enterrado de los laterales de riego utilizando aguas regeneradas.
- Determinar el efecto de la utilización de aguas regeneradas durante varias campañas de riego en los filtros y goteros.

8. Bibliografía

- **Abedi-Koupai, J. y Bakhtiarifar, A.** 2003. *Investigation the effect of treated wastewater on hydraulic properties of emitters in trickle irrigation system*. International Workshop on Improved Irrigation Technologies and Methods: Research, Development and Testing, Montpellier.
- **ACA.** 2008. *Memoria 2006*. [Fecha de consulta: 08-03-2008] Accesible en: www.mediambient.gencat.net/aca/ca/inici.jsp.
- **Adin, A.** 1987. *Clogging in irrigation systems reusing pond effluents and its prevention*. *Water Science Technology*, 19, 12, 323-328.
- **Adin, A.** 2002. *Water treatment and filtration for drip/micro irrigation*. International meeting on advances in drip/micro irrigation, Puerto de la Cruz, 221-237.
- **Adin, A.** 2003. *Slow granular filtration for water reuse*. *Water Science and Technology: Water Supply*, 3, 4, 123-130.
- **Adin, A. y Alon, G.** 1986. *Mechanisms and process parameters of filter screens*. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 112, 4, 293-304.
- **Adin, A. y Elimelech, M.** 1989. *Particle filtration for wastewater irrigation*. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 115, 3, 474-487.
- **Adin, A. y Sacks, M.** 1987. *Water quality and emitter clogging relationship in wastewater irrigation*. *Proceeding Water Reuse Symposium IV*, Denver, Colorado, 517-530.
- **Adin, A. y Sacks, M.** 1991. *Dripper-clogging factors in wastewater irrigation*. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 117, 6, 813-826.
- **AENOR.** 1996. *Norma UNE-EN 872. Calidad del agua. Determinación de los sólidos en suspensión*. AENOR, Madrid.
- **APHA; AWWA y WEF.** 1998. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. American Public Health Association, Washington.
- **Arviza, J.; González-Altozano, P.; Balbastre, I. y Mulet, I.** 2007. *Caracterización de la eficiencia de filtración mediante anillas en redes colectivas de riego a presión*. IV Congreso Nacional y I Congreso Ibérico de Agroingeniería, Albacete, 82-84.
- **ASAE,** 2003. *ASAE Engineering practice EP405.1, Design and installation of microirrigation systems*. ASAE, St. Joseph, Michigan.
- **Ayars, J. E. y Phene, C. J.** 2007. *Automation*. En: Lamm, F. R.; Ayars, J. E. y Nakayama, F. S. (eds.). *Microirrigation for Crop Production. Design, Operation, and Management*. Elsevier, Amsterdam, 389-430.
- **Ayers, R. S. y Westcot, D. W.** 1985. *La calidad del agua en la agricultura. Riego y Drenaje 29, Rev. 1*. FAO, Roma.

-
- **Balcells, J. y Romeral, J. L.** 2003. *Autómata programables*. Marcombo Boixareu Editores, Barcelona.
 - **BOE.** 2007. *Real Decreto 1620/2007, de 7 de noviembre*. Boletín Oficial del Estado, 294, 50639-50661
 - **Bozzola, J. J. y Russell, L. D.** 1998. *Electron Microscopy. Principles and Techniques for Biologists*. Jones and Bartlett Publishers, Sudbury, Massachusetts.
 - **Bralts, V. F.** 1986. *Field performance and evaluation*. En: Nakayama, F. S. y Bucks, S. A. (eds.). *Trickle irrigation for crop production, design, operation and management*. Elsevier, Amsterdam, 216-240.
 - **Bralts, V. F.; Wu, I. P. y Gitlin, H. M.** 1981. *Manufacturing variation and drip irrigation uniformity*. Transaction of the ASAE, 24, 1, 113-119.
 - **Bucks, D. A.; Nakayama, F. S. y Gilbert, R. G.** 1979. *Trickle irrigation water quality and preventive maintenance*. Agricultural Water Management, 2, 2, 149-162.
 - **Burt, C. M. y Styles, S. W.** 2000. *Riego por goteo y por microaspersión para árboles, vides y cultivos anuales*. Irrigation Training & Research Center, California Polytechnic State University, San Luis Obispo, California.
 - **Canter-Lund, H. y Lund, J. W. G.** 1996. *Freshwater algae. Their microscopic world explored*. Biopress Ltd, Bristol.
 - **Capra, A. y Scicolone, B.** 2001. *Wastewater reuse by drip irrigation*. En: Brebbia, C.A. y Fayzieva, D. (eds.). *Environmental Health Risk, Biomedicine and Health* volume 5., Wessex Institute of Technology, Southampton, 153-161.
 - **Capra, A. y Scicolone, B.** 2004. *Emitter and filter test for wastewater reuse by drip irrigation*. Agricultural Water Management, 68, 2, 135-149.
 - **Capra, A. y Scicolone, B.** 2005. *Assessing dripper clogging and filtering performance using municipal wastewater*. Irrigation and Drainage, 54, S1, 71-79.
 - **Capra, A. y Scicolone, B.** 2007. *Recycling of poor quality urban wastewater by drip irrigation systems*. Journal of Cleaner Production, 15, 16, 1529-1534.
 - **Cararo, D. C.; Botrel, T. A.; Hills, D. J. y Leverenz, H. L.** 2006. *Analysis of clogging in drip emitters during wastewater irrigation*. Applied Engineering in Agriculture, 22, 2, 251-257.
 - **CCB.** 2008. *Reutilització*. [Fecha de consulta: 08-03-2008] Accesible en: <http://www.ccbgi.org/reutilitzacio.php>
 - **Chica, R. M.** 1999. *Uso de aguas residuales depuradas en sistemas de riego por goteo*. Tesis doctoral. Departamento de Agronomía. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes. Universidad de Córdoba. Córdoba.

- **Chica, R. M.; Roldán, J. y Alcaide, M.** 2001. *Grados de obturación alcanzados por emisores a lo largo de un tiempo trabajando con aguas residuales depuradas*. Ingeniería del Agua, 8, 3, 351-362.
- **Clark, D. A. y Phene, C. J.** 1992. *Automated centralized data acquisition and control of irrigation management systems*. ASAE Paper No. 92-3021. 11. St. Joseph, Michigan.
- **Colomer, J.; Meléndez, J. y Ayza, J.** 2000. *Sistemas de supervisión*. Cuadernos CEA-IFAC, Barcelona.
- **Dehghanisani, H.; Yamamoto, T.; Rasiah, V.; Utsunomiya, J. e Inoue, M.** 2004. *Impact of biological clogging agents on filter and emitter discharge characteristics of microirrigation systems*. Irrigation and Drainage, 53, 4, 363-373.
- **Dehghanisani, H.; Yamamoto, T.; Ould Ahmad, B.; Fujiyama, H. y Miyamoto, K.** 2005. *The effect of chlorine on emitter clogging induced by algae and protozoa and the performance of drip irrigation*. Transactions of the ASAE, 48, 2, 519-527.
- **DGQA.** 2003. *Instrucció tècnica IT 200 Ed 2 25/3/03*. Direcció General de Qualitat Ambiental. Departament de Medi Ambient i Habitatge. Generalitat de Catalunya, Barcelona.
- **DOCE.** 1991. *Directiva del Consejo 91/271/CEE, de 21 de mayo de 1991. Tratamiento de las aguas residuales urbanas*. DOCE núm. L 135, de 30 de mayo de 1991.
- **Domingo, J.; Gámiz, J; Grau, A. y Martínez, H.** 2003. *Diseño y aplicaciones con autómatas programables*. Editorial UOC, Barcelona.
- **El-Berry, A. M.; Bakeer, G. A. y Al-Weshali, A. M.** 2003. *The effect of water quality and aperture size on clogging of emitters*. International Workshop on Improved Irrigation Technologies and Methods: Research, Development and Testing, Montpellier.
- **FAO.** 2008. *AQUASTAT. Sistema de información sobre el uso del agua en la agricultura y el medio rural de la FAO*. [Fecha de consulta: 08-03-2008] Accesible en: <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/indexesp.stm>.
- **Google Earth.** 2007. Google Earth 4.0.2737. Google Inc., Mountain View, California.
- **Granados, G.; Alcaide, M. y Roldán, J.** 2001. *Estudio del comportamiento hidráulico de unidades de riego localizado usando aguas residuales*. I Congreso de Agroingeniería, Valencia, 153-159.
- **Gushiken, E. C.** 1995. *Irrigation with reclaimed water through permanent subsurface drip irrigation systems*. Proceedings of the 17th International Microirrigation Congress, Orlando, Florida, 169-274.
- **Haman, D. Z.; Smajstrla, A. G. y Zazueta, F. S.** 1994. *Media filters for trickle irrigation in Florida*. Agricultural Engineering. Fact Sheet AE-61. Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, Gainesville, Florida.
- **Hamoda, M. F.; Al-Ghusain, I. y Al-Mutairi, N. Z.** 2004. *Sand filtration of wastewater for tertiary treatment and water reuse*. Desalination, 164, 3, 203-211.

- **Hidalgo, M. D.; Gómez, M. y Irusta, R.** 2005. *Reutilización de aguas residuales. Recomendaciones generales de la Directiva Marco del Agua y legislación vigente en España*. Ingeniería Química, 425, 129-134.
- **Hills, D. J.; Tajrishy, G. y Tchobanoglous, G.** 2000. *The influence of filtration on ultraviolet disinfection of secondary effluent for microirrigation*. Transactions of the ASAE, 43, 6, 1499-1505.
- **Hills, D. J. y Brenes, M. J.** 2001. *Microirrigation effluent using drip tape*. Applied Engineering in Agriculture, 17, 3, 303-308.
- **Idescat.** 2007. *Estadística bàsica territorial. Municipis. Celrà*. [Fecha de consulta: 19-4-2007] Accesible en: www.idescat.net/
- **INE.** 2008. *INEbase*. [Fecha de consulta: 08-03-2008] Accesible en: <http://www.ine.es/inebmenu/indice.htm/>
- **Karmeli, D. y Keller, J.** 1975. *Trickle irrigation design*. Rain Bird Sprinkler Manufacturing Corporation, Glendora, California.
- **Keller, J. y Karmeli, D.** 1974. *Trickle irrigation design parameters*. Transactions of the ASAE, 17, 4, 678-684.
- **Kirnak, H.; Dogan, E.; Demir, S. y Yalçin, S.** 2004. *Determination of hydraulic performance of trickle irrigation emitters used in irrigation systems in the Harran Plain*. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 28, 4, 223-230.
- **Lide, D. R.** 2003. *Handbook of Chemistry and Physics*. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- **Losada, A.** 2000. *El riego. Fundamentos hidráulicos*. Ed. Mundi-Prensa, Madrid.
- **Merriam, J. L. y Keller, J.** 1978. *Farm irrigation evaluation: A guide for management*. Department of Agricultural and Irrigation Engineering, Utah State University, Logan, Utah.
- **Nakayama, F. S.; Boman, B. J. y Pitts, D. J.** 2007. *Maintenance*. En: Lamm, F. R.; Ayars, J. E. y Nakayama, F. S. (eds.). *Microirrigation for Crop Production. Design, Operation, and Management*. Elsevier, Amsterdam, 389-430.
- **Nakayama, F. S. y Bucks, D. A.** 1991. *Water quality in drip / trickle irrigation: a review*. Irrigation Science, 12, 4, 187-192.
- **Nakayama, F. S.; Gilbert, R. G. y Bucks, D. A.** 1978. *Water treatments in trickle irrigation systems*. Journal of the Irrigation and Drainage Division, 104, 1, 23-25.
- **Netafim.** 2004. *Catálogo de productos*. [Fecha de consulta: 5-9-2004] Accesible en: www.netafim.com.
- **Oñate, I.** 2006. *Reutilización de aguas residuales regeneradas. Marco legal. Criterios de calidad*. XXIV Congreso Nacional de Riego, Lugo, España.

- **Oron, G.; Shelf, G. y Turzynsky, B.** 1979. *Trickle irrigation using treated wastewaters*. Journal of the Irrigation and Drainage Division, 105, 2, 175-186.
- **Oron, G.; Shelf, G. y Zur, B.** 1980. *Storm water and reclaimed effluent in trickle irrigation*. Journal of the Irrigation and Drainage Division, 106, 4, 299-310.
- **Paraskeva, P. y Graham, N. J. D.** 2005. *Treatment of a secondary municipal effluent by ozone, UV and microfiltration: microbial reduction and effect on effluent quality*. Desalination, 186, 1-3, 47-56.
- **Puig-Bargués, J.** 2003. *Utilización de aguas residuales en los sistemas de riego localizado: embozamiento y filtración*. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Agroforestal. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria. Universitat de Lleida. Lleida
- **Puig-Bargués, J.; Arbat, G.; Barragán, J. y Ramírez de Cartagena, F.** 2005a. *Effluent particle removal by microirrigation system filters*. Spanish Journal of Agricultural Research, 3, 2, 182-191.
- **Puig-Bargués, J.; Arbat, G.; Barragán, J.; Ramírez de Cartagena, F.** 2005b. *Hydraulic performance of drip irrigation subunits using WWTP effluents*. Agricultural Water Management, 77, 1-3, 249-262.
- **Puig-Bargués, J.; Barragán, J. y Ramírez de Cartagena, F.** 2005c. *Filtration of effluents for microirrigation systems*. Transactions of the ASAE, 48, 3, 969-978.
- **Puig-Bargués, J.; Barragán, J. y Ramírez de Cartagena, F.** 2005d. *Development of equations for calculating the head loss in effluent filtration in microirrigation systems using dimensional analysis*. Biosystems Engineering, 92, 3, 383-390.
- **Radcliffe, D.E. y Rasmussen, T.C.** 2002. *Soil water movement*. En: Warrick, A. W. (ed). Soil Physics Companion. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- **Ravina, I.** 2002. *Drip irrigation with treated sewage effluent*. International meeting on advances in drip/microirrigation, Puerto de la Cruz, 241-252.
- **Ravina, I.; Paz, E.; Sagi, G.; Schischa, A.; Marcu, A.; Yechiely, Z.; Sofer, Z. y Lev, Y.** 1995. *Performance evaluation of filters and emitters with secondary effluent*. Microirrigation for a Changing World: Conserving Resources/Preserving the Environment. Proceedings of the Fifth International Microirrigation Congress, Orlando, Florida, 244-249.
- **Ravina, I.; Paz, E.; Sofer, Z.; Marcu, A.; Schischa, A. y Sagi, G.** 1992. *Control of emitter clogging in drip irrigation with reclaimed wastewater*. Irrigation Science, 13, 3, 129-139.
- **Ravina, I.; Paz, E.; Sofer, Z.; Marcu, A.; Schischa, A.; Sagi, G.; Yechiely, Z. y Lev, Y.** 1997. *Control of clogging in drip irrigation with stored treated municipal sewage effluent*. Agricultural Water Management, 33, 2-3, 127-137.

- **Resende, R. S.; Coelho, R. D. y Piedade, S. M. S.** 2000. *Susceptibilidade de gotejadores ao entupimento de causa biológica*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 4, 3, 368-375.
- **Rhoades, J. D.; Kandiah, A. y Mashali, A. M.** 1992. *The use of saline waters for crop production*. FAO Irrigation and Drainage 48. FAO, Roma.
- **Ribeiro, T. A. P.; Airoidi, R. P. S.; Paterniani, J. E. S. y Silva, M. J. M.** 2005a. *Efeito da qualidade da água na perda de carga em filtros utilizados na irrigação localizada*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 9, 1, 1-6.
- **Ribeiro, T. A. P.; Airoidi, R. P. S.; Paterniani, J. E. S. y Silva, M. J. M.** 2005b. *Varição dos parâmetros físicos, químicos e biológicos da água em um sistema de irrigação localizada*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 9, 3, 295-301.
- **Ribeiro, T. A. P.; Paterniani, J. E. S.; Airoidi, R. P. S. y Silva, M. J. M.** 2004. *Water quality and head loss in irrigation filters*. Scientia Agrícola, 61, 6, 563-572.
- **Rijo, M.** 2008. *Design and field tuning of an upstream controlled canal network SCADA*. Irrigation and Drainage, 57, 2, 123-137.
- **Rodgers, M.; Mulqueen, J. y Healy, M. G.** 2004. *Surface clogging in an intermittent stratified sand filter*. Soil Science Society of America, 68, 6, 1827-1832.
- **Rodríguez, C.** 1990. *Evaluación de instalaciones de microirrigación*. IV Curso de Tecnología del Riego. ETSIA, Universidad Politécnica de Catalunya. Lleida.
- **Rowan, M. A.** 2004. *The utility of drip irrigation for the distribution of on-site wastewater effluent*. Ph.D. Dissertation. Graduate School of The Ohio State University. The Ohio State University. Columbus, Ohio.
- **Rowan, M.; Mancl, K. y Tuovinen, O. H.** 2004. *Clogging incidence of drip irrigation emitters distributing effluents of differing levels of treatment*. On-Site Wastewater Treatment X, Conference Proceedings, Sacramento, California, 84-91.
- **Sagi, G.; Paz, E.; Ravina, I.; Schischa, A.; Marcu, A. y Yechiely, Z.** 1995. *Clogging of drip irrigation systems by colonial protozoa and sulphur bacteria*. Microirrigation for a Changing World: Conserving Resources/Preserving the Environment, Proceedings of the Fifth International Microirrigation Congress, Orlando, Florida, 250-254.
- **Sahin, Ü.; Anapali, Ö; Dönmez, M.F. y Sahin, F.** 2005. *Biological treatment of clogged emitters in a drip irrigation system*. Journal of Environmental Management, 76, 4, 338-341.
- **Schifris, S.** 2005. *Análisis de la obturación de goteros*. Departamento de Agricultura, Netafim, Tel Aviv.
- **Schischa, A.; Ravina, I.; Sagi, G.; Paz, E.; Yechiely, Z.; Alkon, A.; Scharamm, G.; Sofer, Z.; Marcu, A. y Lev, Y.** 1997. *Drip irrigation with reclaimed effluent – the clogging problems*. International Water & Irrigation Review, 17, 3, 8-12.

-
- **Shannon, W. M.; James, L.; Basset, D. L. y Mih, W. C.** 1982. *Sediment transport and deposition in trickle irrigation laterals*. Transactions of the ASAE, 25, 1, 160-164.
 - **Tajrishy, M.A.; Hills, D. J. y Tchobanoglous, G.** 1994. *Pretreatment of secondary effluent for drip irrigation*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 120, 4, 716-731.
 - **Taylor, H. D.; Pearson, H. W. y Mara, D. D.** 1989. *Microbial clogging of drip irrigation emitters in effluent reuse systems*. Irrigation, Theory and Practice. Proceedings of the International Conference, Southampton, 661-671.
 - **Taylor, H. D.; Bastos, R. K. X.; Pearson, H. W. y Mara, D. D.** 1995. *Drip irrigation with waste stabilisation pond effluents: solving the problem of emitter fouling*. Water Science and Technology, 31, 12, 417-424.
 - **Trooien, T. P. y Hills, D. J.** 2007. *Application of biological effluent*. En: Lamm, F. R.; Ayars, J. E.; Nakayama, F. S. (eds.). Microirrigation for Crop Production. Elsevier. Amsterdam. 329-356.
 - **Trooien, T. P.; Lamm, F. R.; Stone, L. R.; Alam, M.; Rogers, D. H.; Clark, G. A. y Schlegel, A. J.** 2000. *Subsurface drip irrigation using livestock wastewater: dripline flow rates*. Applied Engineering in Agriculture, 16, 5, 505-508.
 - **Vermeiren, L. y Jobling, G. A.** 1986. *Riego localizado. Riego y Drenaje*, 36. FAO, Roma.
 - **Viviani, G. e Iovino, M.** 2004. *Wastewater reuse effects on soil hydraulic conductivity*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 130, 6, 476-484.