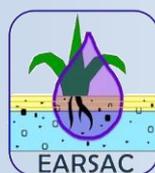




# EFECTO DEL REGADÍO CON AGUAS REGENERADAS SOBRE LOS SUELOS, ACUÍFEROS Y CULTIVOS



RESULTADOS  
DEL PROYECTO DE I+D+i  
EARSAC



## EFFECTO DEL REGADÍO CON AGUAS REGENERADAS SOBRE LOS SUELOS, ACUÍFEROS Y CULTIVOS.

### RESULTADOS DEL PROYECTO DE I+D+i EARSAC



## **EFFECTO DEL REGADÍO CON AGUAS REGENERADAS SOBRE LOS SUELOS, ACUÍFEROS Y CULTIVOS. RESULTADOS DEL PROYECTO DE I+D+i EARSAC**

Grupo Tragsa, Octubre de 2019.

Publicación multiautor

Edita: Grupo Tragsa. C/ Maldonado 58, 28006, Madrid

Tf. +34 91 3226000

ISBN-13- 978-84-09-15528-6

Depósito legal: Exento (edición digital)

Distribución: <http://www.tragsa.es>

Em: [imasd@tragsa.es](mailto:imasd@tragsa.es)

Coordina: Enrique Fernández Escalante, GRUPO TRAGSA, 2019

Queda prohibida la reproducción en cualquier tipo de soporte o medio de la parte registrada. Reservados todos los derechos ©.



## EQUIPO REDACTOR

### **Grupo Tragsa:**

Sergi Mulet Aloras (Ing. Agrónomo, Tragsa)

Enrique Fernández Escalante (Dr. en Hidrogeología, Tragsa)

Rodrigo Calero Gil (Ing. Agrónomo, Tragsa)

Luis Antonio Galán Benzal (Ing. Industrial, Tragsa)

### **Universitat de les Illes Balears, Departament de Biología:**

Jaume Solivellas Prats (Ecólogo)

Gabriel Moyà Niell (Dr. en Ecología)

### **Departament de Edafología:**

Jaume Vadell Adrover (Dr. en Edafología)

### **CEBAS-CSIC:**

Emilio Nicolás Nicolás (Dr. Ing. Agrónomo)

Pedro Nortes Tortosa (Dr. Ing. Agrónomo)

### **Amphos 21 Consulting S.L.:**

Diego Sampietro Lardies (Hidrogeólogo)

Jorge Molinero Huguet (Dr. en Hidrogeología)



## PRÓLOGO

Esta publicación surge como resultado del proyecto de I+D+i EARSAC (Efecto del regadío con aguas regeneradas sobre los suelos, acuíferos y cultivos) desarrollado, coordinado y financiado por el Grupo Tragsa entre 2011 y 2018 sobre cinco zonas piloto: Santa Maria del Camí, Inca, Ariany y Consell en Mallorca y Es Mercadal en Menorca.

El proyecto se enmarca en la línea estratégica de I+D+i de gestión hídrica y calidad de las aguas, dando respuesta a la necesidad de abordar la reutilización del agua regenerada como un “*driving force*” de primer orden, para el fomento de su inminente regularización y regulación a escala europea, con plena conciencia de las importantes ventajas sociales y económicas que podrían derivarse del estudio de riesgos e impactos relacionados con la viabilidad agronómica del regadío con aguas regeneradas.

Este libro constituye la primera de dos publicaciones. Esta primera dirigida a especialistas en la materia y escrita con un lenguaje técnico aunque, a su vez, sencillo. Así mismo está previsto lanzar una segunda guía enfocada a usuarios finales, en lenguaje coloquial y con carácter eminentemente práctico.

Además del listado de autores y colaboradores presentado con anterioridad, cabe mencionar la intervención y ayuda de organizaciones y administraciones públicas, en general del ámbito Balear, como la *Conselleria de Medi Ambient, Agricultura i Pesca*, la *Conselleria de Salut*, el *Institut Biotecnològic de les Illes Balears* (IBIB) y las Comunidades de Regantes de las respectivas zonas regables. En todos los lugares demostrativos se han instalado sensores y realizado campañas de campo para la recopilación de datos de manera periódica. Además han estado involucrados activamente los gestores de las balsas de aguas regeneradas, agricultores, propietarios de los terrenos y de los pozos privados, quienes nos han brindado ayuda y acceso a muestrear. A todos ellos nuestro más sincero agradecimiento por haber hecho posible que este proyecto haya alcanzado los objetivos inicialmente planteados.

La publicación ha sido financiada a través de la Subdirección de Soporte Técnico e Innovación del Grupo Tragsa, en plena coordinación con la Gerencia de Zona de Tragsa de las Islas Baleares y el apoyo del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (actual MAPA) del Gobierno de España y de la Consejería de Agricultura del gobierno de las Islas Baleares.

El Grupo Tragsa agradece a los autores y colaboradores el esfuerzo dedicado durante varios años.

## **EARSAC: EFECTO DEL REGADÍO CON AGUAS REGENERADAS SOBRE LOS SUELOS, ACUÍFEROS Y CULTIVOS.**

### **RESULTADOS DEL PROYECTO DE I+D+i EARSAC**

#### **ÍNDICE GENERAL**

#### ***ESTUDIO DE LA VIABILIDAD AGRONÓMICA DE LAS AGUAS REGENERADAS EN MALLORCA (ISLAS BALEARES)***

#### **APARTADO 1. EL REGADÍO CON AGUAS REGENERADAS EN LAS ILLES BALEARS**

#### **APARTADO 2. CULTIVOS**

#### **APARTADO 3. SUELOS**

#### **APARTADO 4. BALSAS DE REGULACIÓN**

#### **APARTADO 5. ACUÍFEROS**

#### **APARTADO 6. ESTUDIOS DE IMPACTO AMBIENTAL ESPECÍFICOS**

#### **APARTADO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES**



# EARSAC: EFECTO DEL REGADÍO CON AGUAS REGENERADAS SOBRE LOS SUELOS, ACUÍFEROS Y CULTIVOS. RESULTADOS DEL PROYECTO DE I+D+i

## INDICE

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | EL REGADÍO CON AGUAS REGENERADAS EN LAS ISLAS BALEARES .....  | 1  |
| 1.1   | ANTECEDENTES. LA REUTILIZACIÓN DE LAS AGUAS .....   | 2  |
| 1.1.1 | ANTECEDENTES LEGISLATIVOS .....   | 5  |
| 1.1.2 | ANTECEDENTES EN MATERIA DE I+D+i .....  | 7  |
| 1.2   | LA AGRICULTURA EN LES ILLES BALEARS. CONTEXTO DE LA ACTUACIÓN .....   | 9  |
| 1.2.1 | SITUACIÓN DE LA REUTILIZACIÓN EN <i>LES ILLES BALEARS</i> .....   | 11 |
| 1.2.2 | FUTURO DE LA AGRICULTURA Y LA REUTILIZACIÓN EN <i>LES ILLES BALEARS</i> .....   | 12 |
| 1.3   | OBJETIVOS .....   | 15 |
| 1.4   | METODOLOGÍA .....   | 16 |
| 1.5   | ESTRUCTURA DE LA PUBLICACIÓN.....   | 18 |
| 1.6   | BIBLIOGRAFÍA DEL APARTADO INTRODUCTORIO.....  | 19 |
| 1.6.1 | ACCESOS WEB.....  | 20 |
| 2     | <b>CULTIVOS</b> .....   | 21 |
| 2.1   | INTRODUCCIÓN.....   | 22 |
| 2.2   | INVESTIGACIÓN EN REUTILIZACIÓN AGRÍCOLA. ANTECEDENTES ESPECÍFICOS .....   | 22 |
| 2.3   | ESTUDIOS AGRONÓMICOS DE UTILIZACIÓN DE AGUAS REGENERADAS EN LA AGRICULTURA DE<br>LES ILLES BALEARS.....   | 25 |
| 2.3.1 | PARCELAS ACONDICIONADAS PARA LA I+D+i CON AGUAS REGENERADAS.....  | 26 |
| 2.3.2 | METODOLOGÍA Y PROTOCOLOS A REALIZAR EN LAS PARCELAS PILOTO .....  | 28 |
| 2.3.3 | CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE LAS AGUAS DE LA EDAR EN LAS DISTINTAS ZONAS .....  | 30 |
| 2.4   | INFLUENCIA DE LAS AGUAS REGENERADAS SOBRE EL ESTADO HÍDRICO Y NUTRICIONAL DE LOS<br>CULTIVOS. EVALUACIÓN DE RENDIMIENTO EN CULTIVOS HORTÍCOLAS..... | 35 |
| 2.4.1 | PARCELA OLIVOS JÓVENES DE LA VARIEDAD 'PICUAL' (AGUA DE POZO Y REGENERADA) .....  | 35 |
| 2.4.2 | PARCELA VID (AGUA DE POZO Y REGENERADA) .....   | 36 |
| 2.4.3 | PARCELA HORTÍCOLAS (AGUA DE POZO Y REGENERADA).....   | 39 |
| 2.4.4 | PARCELA HORTÍCOLAS (AGUA DE POZO Y REGENERADA).....   | 41 |
| 2.4.5 | PARCELA HORTÍCOLAS (AGUA DE POZO Y REGENERADA CON Y SIN FERTILIZANTES) .....  | 53 |
| 2.5   | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DE REUTILIZACIÓN DE AGUAS REGENERADAS EN<br>MALLORCA .....   | 63 |
| 2.5.1 | CONCLUSIONES DEFINITIVAS .....  | 63 |
| 2.5.2 | RECOMENDACIONES .....   | 64 |
| 2.6   | BIBLIOGRAFÍA .....  | 64 |
| 3     | <b>SUELOS</b> .....   | 67 |
| 3.1   | INTRODUCCIÓN.....   | 68 |
| 3.2   | METODOLOGÍA, CONDICIONES AMBIENTALES Y SU CARACTERIZACIÓN .....   | 69 |
| 3.2.1 | CARACTERIZACIÓN EDÁFICA .....   | 69 |
| 3.2.2 | CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA .....   | 72 |
| 3.3   | CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DEL SUELO.....   | 73 |
| 3.3.1 | SALINIDAD DEL SUELO.....  | 73 |
| 3.3.2 | FRACCIÓN DE LAVADO.....   | 74 |
| 3.3.3 | SODICIDAD. DISPERSIÓN DE ARCILLAS Y DE LOS AGREGADOS DEL SUELO .....  | 77 |
| 3.3.4 | CONTENIDO EN METALES PESADOS DEL SUELO.....   | 80 |
| 3.3.5 | SUBSTANCIAS ORGÁNICAS: CONTAMINANTES EMERGENTES .....   | 81 |
| 3.3.6 | ORGANISMOS PATÓGENOS.....   | 83 |
| 3.4   | CONCLUSIONES. EFECTO DEL RIEGO CON AGUAS REGENERADAS SOBRE LA FERTILIDAD DEL<br>SUELO .....   | 84 |
| 3.5   | BIBLIOGRAFÍA.....   | 85 |
| 4     | <b>BALSAS DE REGULACIÓN</b> .....   | 87 |
| 4.1   | INTRODUCCIÓN.....   | 88 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 4.2   | OBJETIVOS .....   | 88  |
| 4.3   | METODOLOGÍA .....   | 89  |
| 4.4   | RESULTADOS .....  | 90  |
| 4.4.1 | TIPIFICACIÓN DE LAS BALSAS .....  | 90  |
| 4.4.2 | QUÍMICA DEL AGUA .....  | 96  |
| 4.4.3 | CALIDAD DEL AGUA LIGADA AL TIEMPO DE RESIDENCIA Y A LOS PROCESOS BIOLÓGICOS.....                                    | 102 |
| 4.4.4 | ASPECTOS NORMATIVOS: CUMPLIMIENTO DEL REAL DECRETO 1620/2007 .....  | 110 |
| 4.4.5 | CONSIDERACIONES SOBRE LA REDUCCIÓN DE LOS COSTES DE TRATAMIENTO MEDIANTE BALSAS.....                                | 112 |
| 4.5   | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....  | 113 |
| 4.6   | BIBLIOGRAFÍA .....  | 115 |
| 5     | <b>ACUÍFEROS</b> .....  | 118 |
| 5.1   | INTRODUCCIÓN .....  | 119 |
| 5.2   | CONTEXTO .....  | 120 |
| 5.3   | OBJETIVOS .....   | 121 |
| 5.4   | METODOLOGÍA .....   | 122 |
| 5.4.1 | CARACTERIZACIÓN INICIAL PARA EL ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LAS AGUAS REGENERADAS EN LOS ACUÍFEROS .....            | 124 |
| 5.4.2 | CAPACIDAD DE AUTODEPURACIÓN DEL TERRENO.....  | 132 |
| 5.4.3 | NATURALEZA DEL ACUÍFERO.....  | 132 |
| 5.4.4 | MODELIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA .....  | 139 |
| 5.5   | RESULTADOS .....  | 147 |
| 5.5.1 | LOS PROCESOS CONTAMINANTES. DISTRIBUCIÓN Y EVOLUCIÓN PREVISIBLE .....   | 147 |
| 5.5.2 | RESULTADO DE LA MODELACIÓN .....  | 152 |
| 5.6   | RECOMENDACIONES PRÁCTICAS.....  | 161 |
| 5.6.1 | DISEÑO DE POZOS JUNTO A BALSAS DE REGULACIÓN COMO ELEMENTO DE SEGURIDAD Y RECARGA GESTIONADA “DE OPORTUNIDAD” ..... | 161 |
| 5.6.2 | POSIBILIDADES DE RECARGA GESTIONADA DE EXCEDENTES CON DISTINTOS DISPOSITIVOS .....                                  | 163 |
| 5.6.3 | PROPUESTA DE ELEMENTOS COMPLEMENTARIOS RELACIONADOS CON LA HIDROLOGÍA .....   | 167 |
| 5.6.4 | AUTODEPURACIÓN DEL TERRENO. ALGUNAS OPCIONES DE ACTUACIÓN .....   | 167 |
| 5.7   | CONCLUSIONES.....   | 168 |
| 5.8   | BIBLIOGRAFÍA .....  | 170 |
| 6     | <b>IMPACTO AMBIENTAL</b> .....  | 172 |
| 6.1   | EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL. CRITERIOS A TENER EN CUENTA .....  | 173 |
| 6.2   | LEGISLACIÓN AMBIENTAL .....   | 173 |
| 6.3   | ACCIONES DE UN PROYECTO TIPO.....   | 176 |
| 6.3.1 | IDENTIFICACIÓN DE IMPACTOS .....  | 178 |
| 6.3.2 | VALORACIÓN DE IMPACTOS .....  | 179 |
| 6.4   | MEDIDAS CORRECTORAS .....   | 181 |
| 6.5   | PROGRAMA DE VIGILANCIA .....  | 183 |
| 6.6   | TABLAS DE CHEQUEO.....  | 184 |
| 6.7   | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES MEDIOAMBIENTALES .....   | 189 |
| 6.8   | BIBLIOGRAFÍA .....  | 190 |
| 7     | <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES FINALES</b> .....   | 191 |
| 8     | ANEXO .....   | 196 |
|       | ANEXO 1. ACUÍFEROS. ANÁLISIS QUÍMICOS REALIZADOS EN LOS POZOS DE LOS CIRCUITOS DE INTERACCIÓN.....                  | 196 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1: Origen del Agua de Regadío en España. Fuente: INE (Encuesta sobre el uso del agua en el sector agrario - Año 2014), 2016.....   | 3  |
| Figura 2. Evolución de la SAU en Baleares. ....   | 10 |
| Figura 3: Actuaciones finalizadas que aprovechan el agua regenerada. ....   | 14 |
| Figura 4. Detalle de la parcela de olivos jóvenes de la variedad ‘Picual’ al inicio del ensayo (2011). ....   | 26 |
| Figura 5. Imagen de la parcela de cultivo de sandía. ....   | 27 |
| Figura 6. Imagen de la parcela piloto en Ariany.....  | 28 |
| Figura 7. Situación de todas las parcelas experimentales.....   | 28 |
| Figura 8. Producción del cultivo de sandía regado con ambas fuentes de agua (n= 200 plantas).....   | 41 |
| Figura 9. Producción del cultivo de pimiento regado con ambas fuentes de agua (n= 40 plantas).....  | 44 |
| Figura 10. Producción del cultivo de tomate en ambas variedades regado con ambas fuentes de agua (n= 40 plantas). ....  | 48 |
| Figura 11. Producción del cultivo de pepino regado con ambas fuentes de agua (n = 80 plantas).....  | 50 |
| Figura 12. Producción del cultivo de melón regado con ambas fuentes de agua (n = 80 plantas).....   | 53 |
| Figura 13. Producción del cultivo de pimiento regado con ambas fuentes de agua con y sin adición de fertilizantes (n = 20 plantas).....   | 56 |
| Figura 14. Detalle del desarrollo de las plantas de pimiento. ....  | 57 |
| Figura 15. Detalle del desarrollo de las plantas de tomate a los 30 DDP. ....   | 59 |
| Figura 16. Producción del cultivo de pepino regado con ambas fuentes de agua con y sin adición de fertilizantes (n = 40 plantas).....   | 62 |
| Figura 17. Detalle del desarrollo de las plantas de pepino en la fase inicial de desarrollo. ....   | 62 |
| Figura 18. La adecuación de los suelos al cultivo y riego con aguas regeneradas varía en función de sus características. La abertura de calicatas permite diagnosticar con detalle las particularidades del suelo que condicionarán el desarrollo radicular, la infiltración y la retención de agua.....  | 71 |
| Figura 19. Diagrama ombrotérmico característico de les Illes Balears. En otoño e invierno, con temperaturas bajas, se concentran la mayor parte de las precipitaciones. En primavera y en verano, con alta demanda hídrica y escasas precipitaciones el riego constituye un complemento básico para asegurar una disponibilidad hídrica suficiente.....   | 72 |
| Figura 20. Evolución de la salinidad del suelo (conductividad eléctrica del extracto de pasta saturada; CE eps, dS/m, 25 °C) a lo largo del año en la capa arable de un suelo regado con agua regenerada y con agua subterránea (agua de pozo) en Maria de la Salut (Mallorca). El periodo de riego se extiende desde mediados de la primavera hasta el inicio del otoño. A partir de mediados de otoño hasta el inicio de la primavera las lluvias provocan el lavado de las sales acumuladas con el riego estival. .... | 75 |
| Figura 21. Evolución del contenido de sodio (Na) del extracto de pasta saturada en dos tratamientos: parcelas regadas con aguas regeneradas y parcelas regadas con agua subterránea (agua de pozo) en Maria de la Salut (Mallorca). Esta figura complementa a la Figura 21. ....  | 76 |
| Figura 22. Relación entre la conductividad eléctrica del extracto de pasta saturada (CE) y el contenido de sodio (Na) en parcelas regadas con aguas regeneradas y subterráneas medidas en diferentes épocas del año. Las muestras corresponden a las Islas de Mallorca y Menorca.....   | 77 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 23. Evolución del índice de estabilidad estructural (IEE) a lo largo del año. Las variaciones a lo largo del año son notorias, en función del estado de los agregados en el momento del muestreo. En general la tendencia de las muestras regadas con aguas regeneradas es similar a la obtenida en las parcelas regadas con aguas subterráneas (agua de pozo). Este seguimiento se realizó en las parcelas experimentales del Huerto Piloto Ariany. ....   | 78  |
| Figura 24. Fotografías aéreas de las balsas de regulación de Inca y Ariany y sus principales características morfológicas. ....  | 91  |
| Figura 25: Representación gráfica con isolíneas de las temperaturas registradas durante los años de estudio en la balsa de Inca, donde se pueden apreciar las estratificaciones térmicas que tienen lugar durante los meses más cálidos, con diferencias que llegan a los 10°C entre la superficie y el fondo de la balsa. ....  | 93  |
| Figura 26. Evolución de las concentraciones de oxígeno (mg/L) entre marzo de 2012 y octubre de 2014 en la balsa de Inca, donde puede apreciarse la aparición de procesos de anoxia en el fondo de la balsa.....  | 94  |
| Figura 27. Evolución del oxígeno (mg/L) en la balsa de Ariany entre los meses de abril de 2012 y septiembre de 2014. Se puede apreciar la inestabilidad de la estratificación de la columna de agua de esta balsa, y la consecuente disminución de la concentración de oxígeno en toda la columna de agua. ....  | 95  |
| Figura 28. Precipitado de carbonato cálcico en las orillas de la balsa de Ariany. Los cristales provocan el blanqueado de las lonas de la balsa, convirtiéndose éstas en un buen indicador de estos procesos. Dicha precipitación puede ser puntualmente ventajosa para los sistemas de conducción de agua, ya que conlleva una bajada en la concentración de carbonato cálcico dentro de la red. ....   | 97  |
| Figura 29. Correlación entre los parámetros alcalinidad y pH en la balsa de Inca durante el año 2013.....  | 99  |
| Figura 30. Correlación entre las concentraciones de sólidos volátiles y la demanda biológica de oxígeno en la balsa de Ariany. ....  | 102 |
| Figura 31. Evolución de las concentraciones de clorofila a en la balsa de Ariany, con entradas de agua y sin ellas. Los muestreos se realizaron durante períodos de 25 días. ....  | 104 |
| Figura 32. Fotografías realizadas en el microscopio invertido de algunas de las especies más frecuentes en las dos balsas. Las clorofíceas representan el grupo mayoritario; <i>Pediastrum boryanum</i> (A), <i>Oocystis lacustris</i> (B) y <i>Scenedesmus acuminatus</i> (C). Las criptofíceas son el grupo más abundante durante el invierno y durante los procesos de aclarado del agua. En la imagen un representante del género <i>Cryptomonas</i> (D) que, junto a <i>Plagioselmis</i> , son los taxones más abundantes de este Grupo en las balsas. .... | 105 |
| Figura 33. Representación de la evolución de las concentraciones de <i>E. Coli</i> en la balsa de Ariany durante los años de estudio. Los máximos de otoño de 2013 coinciden con tasas de renovación del agua muy elevadas y, por tanto, cortos tiempos de residencia. ....  | 106 |
| Figura 34. Ejemplar del cladóceros <i>Daphnia magna</i> , protagonista de los procesos de aclarado del agua en las balsas (Fotografía: J. Solivellas).....   | 108 |
| Figura 35. Evolución en profundidad de los porcentajes de intensidad luminosa incidente en la balsa de Ariany, y de los registros del disco de Secchi durante los dos primeros años de estudio. Los mínimos registros coinciden con los máximos de clorofila a, y los máximos de transparencia con las mínimas concentraciones de este pigmento durante los procesos de aclarado posteriores a las fases con alta proliferación de fitoplancton.....   | 108 |
| Figura 36. Esquema de la red trófica que se establece entre el fitoplancton, el zooplancton y la comunidad de peces de la balsa y que tiene como consecuencia los procesos de aclarado del agua. (Fuente, Brönmark and Hansson, 2006). ....  | 109 |
| Figura 37. Cartografía hidrogeológica básica para la Isla de Mallorca y posición de las parcelas de estudio conforme a su zonificación en Masas de agua (tomado del PHIB, pg. 128). Las zonas piloto se han marcado con un rectángulo rosáceo. Modificado del PHIB.....  | 121 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 28. Puntos de agua seleccionados para el estudio de su evolución cualitativa y sentido de las líneas de flujo. Representación sobre la capa de geología. Los polígonos verdes corresponden a las parcelas regadas. ....   | 123 |
| Figura 39. Hidrograma de Piper-Hill-Langelier para los puntos de agua de las tres redes de control establecidas.....   | 127 |
| Figura 40. Gráfico en el que se comparan el tamaño de bacterias, virus y moléculas con diámetros equivalentes de los poros. Fuente: ITGE, 1998.....  | 133 |
| Figura 41. Disminución del contenido en bacterias de un acuífero en función del tipo de material. Tomado de Crane & Moore, 1984.....   | 135 |
| Figura 42. Gráfico que muestra la supervivencia de varios tipos de bacterias en aguas subterráneas. Fuente: Bitton, 1998.....  | 137 |
| Figura 43. Gráfico que muestra la supervivencia en aguas subterráneas de dos tipos de virus. Fuente: Bitton, 1998.....   | 138 |
| Figura 44. Piezometría local del acuífero Cuaternario y Mioceno (Datos octubre 2010 DGRH). Base mapa geológico local (Fuente: <a href="http://ideib.caib.es">http://ideib.caib.es</a> ).....   | 140 |
| Figura 45. Foto área de la zona de estudio con las parcelas regadas con agua regenerada resaltadas en rojo. Los puntos de agua subterránea de los cuales se tiene información están representados con puntos azules (pozos perforados en el acuífero calcáreo mioceno) y grises (pozos pertenecientes al acuífero cuaternario-pleioceno). ....   | 141 |
| Figura 46. Corte geológico esquemático con los materiales diferenciados en el modelo. Gris = Cuaternario + plioceno, naranja = Margas miocenas, amarillo = calizas miocenas y azul = Calizas liásicas. Por debajo de las calizas aparecen unidades impermeables. Modificado del “Estudio hidrogeológico del impacto a las aguas subterráneas del regadío mediante aguas residuales depuradas en Inca”..... | 141 |
| Figura 47. Imagen de la malla de 135.364 elementos y detalle de la discretización vertical en la zona del suelo. ....  | 142 |
| Figura 48. Secuencias importantes en los procesos redox. Fuente: Appelo y Postma, 2013. ....   | 143 |
| Figura 49. Esquema mostrando las condiciones de contorno empleadas para el cálculo del flujo de agua subterránea.....  | 145 |
| Figura 50. Gráfica mostrando la recarga de los acuíferos por meses para el periodo de tiempo 2010-2015. ....   | 145 |
| Figura 51. Diagramas de estabilidad de los distintos ligandos ferrosos y fases en función del pH y Eh del medio (tomado de Custodio y Llamas, 1983).....   | 151 |
| Figura 52. Isopiezas en 3D (arriba) y perfil 2D (abajo) con los resultados de la simulación de flujo estacionario. Acuífero superficial con niveles en un rango entre 100 metros y 60 m y acuífero profundo con niveles en el intervalo 55-10 metros. ....   | 153 |
| Figura 53. Comparación entre los valores medidos y los valores simulados en el modelo para los resultados del modelo estacionarios. Datos de octubre de 2010. ....   | 154 |
| Figura 54. Evolución del nivel freático en 3 puntos del dominio modelado. En continuo el resultado del modelo, en puntos los datos medidos. ....   | 154 |
| Figura 55. Distribución espacial del cloruro. El norte viene marcado por la dirección Y del eje localizado en el centro de la imagen. ....   | 155 |
| Figura 56. Distribución espacial de la materia orgánica. El norte viene marcado por la dirección Y del eje localizado en el centro de la imagen. ....  | 156 |
| Figura 57. Distribución espacial del oxígeno disuelto. El norte viene marcado por la dirección y del eje localizado en el centro de la imagen. ....  | 157 |
| Figura 58. Distribución espacial del nitrato. El norte viene marcado por la dirección y del eje localizado en el centro de la imagen. ....   | 157 |
| sitrato en distintos puntos del modelo para 5 años de simulación. En continuo el resultado del modelo, en puntos los datos medidos. ....   | 158 |
| Figura 60. Evolución del sulfato en un corte transversal NW-SE para un tiempo de simulación de 5 años.....   | 159 |

Figura 61. Evolución de la concentración de sulfato en distintos puntos del modelo para 5 años de simulación. En continuo el resultado del modelo, en puntos los datos medidos. .... 160

Figura 62. Evolución del hierro en un corte transversal NW-SE para un tiempo de simulación de 5 años..... 160

Figuras 63. Detalle del cabezal de inyección del sondeo Arnachos 1, en Chulilla, Valencia. Fotos por cortesía de J.M. Montes..... 162

Figura 64. Columna litológica y diseño de la captación Arnachos 1, Chulilla, Valencia. .... 163

Figura 65. Esquema de un dispositivo de pozos abiertos de infiltración y pozos profundos. .. 164

Figura 66. Esquema de un dispositivo de pozos profundos. .... 165

Figura 67. Esquema de un sistema de recarga artificial a través de un sistema de riego tradicional. .... 166

Figura 68. Esquema de un sistema de recarga artificial a través de un sistema de riego subsuperficial o subterráneo. .... 166

Figura 69. Relación entre impactos agrarios y sus aspectos ambientales relacionados. Modificado de MAPA-Tragsatec, 2007 ..... 177

Figura 70. Principales vectores relacionados con la contaminación agraria difusa afectados por la actuación. Modificado de MAPA-Tragsatec, 2007..... 177

Figura 71. Impactos previsibles del cambio de cultivo y método de riego. Modificado de MAPA-Tragsatec, 2007. .... 183



## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1: Datos extraídos del Plan hidrológico de les Illes Balears (2015-2021). .....  | 11 |
| Tabla 2: Actuaciones de aprovechamiento de las aguas regeneradas, 1ª fase. ....  | 14 |
| Tabla 3: Actuaciones de aprovechamiento de las aguas regeneradas del convenio de colaboración entre el MAPA (actual MAPAMA) y la CAIB (Conselleria de Medi Ambient, Agricultura i Pesca). Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por el MAPA y la CAIB. ....  | 14 |
| Tabla 4: Valor máximo admisible fijado por el RD 1620/2007. ....   | 30 |
| Tabla 5: Media anual de los principales parámetros físico-químicos del agua regenerada (R) y de pozo (P) en la zona de Inca (2011-2015). ....  | 31 |
| Tabla 6: Media anual de los principales parámetros físico-químicos del agua regenerada (R) y de pozo (P) en la zona de Santa Maria del Camí (2011-2015). ....  | 32 |
| Tabla 7: Media anual de los principales parámetros físico-químicos del agua regenerada (R) y de pozo (P) en la zona de Ariany-Maria de la Salut (2011-2015). ....  | 34 |
| Tabla 8: Media anual de los principales parámetros físico-químicos del agua regenerada (R) y de pozo (P) en la zona de Consell (2014-2015). ....   | 34 |
| Tabla 9: Media anual de potencial hídrico de tallo ( $\psi_t$ , MPa), fotosíntesis neta ( $F_n$ , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), conductancia estomática ( $g_s$ , $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) y eficiencia en el uso del agua (EUA, $\mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ ) en hojas de olivo regados con agua de pozo (P) y agua regenerada (R). ....                                    | 35 |
| Tabla 10: Media anual de las concentraciones foliares en macro- y micro-nutrientes en olivo regados con agua de pozo (P) y agua regenerada (R). ....   | 36 |
| Tabla 11: Media anual de potencial hídrico de tallo ( $\psi_t$ , MPa), fotosíntesis neta ( $F_n$ , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), conductancia estomática ( $g_s$ , $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) y eficiencia en el uso del agua (EUA, $\mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ ) en hojas de vid de la variedad 'Prensal Blanc' regadas con agua de pozo (P) y agua regenerada (R). ....      | 37 |
| Tabla 12: Media anual de potencial hídrico de tallo ( $\psi_t$ , MPa), fotosíntesis neta ( $F_n$ , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), conductancia estomática ( $g_s$ , $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) y eficiencia en el uso del agua (EUA, $\mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ ) en hojas de vid de la variedad 'Cabernet Sauvignon' regadas con agua de pozo (P) y agua regenerada (R). .... | 37 |
| Tabla 13: Media anual de las concentraciones foliares en macro- y micro-nutrientes en vides de la variedad 'Prensal Blanc' con agua de pozo (P) y agua regenerada (R). ....  | 38 |
| Tabla 14: Media anual de las concentraciones foliares en macro- y micro-nutrientes en vides de la variedad 'Cabernet Sauvignon' con agua de pozo (P) y agua regenerada (R). ....   | 39 |
| Tabla 15: Niveles de fotosíntesis neta ( $F_n$ , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), conductancia estomática ( $g_s$ , $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) y eficiencia en el uso del agua (EUA, $\mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ ) en hojas de sandía regadas con agua de pozo (P) y agua regenerada (R) 30 y 60 días después de la plantación (DDP). ....  | 39 |
| Tabla 16: Análisis de elementos foliares en sandía regadas con agua de pozo (P) y regenerada (R) en la zona de Inca a los 30 y 60 días después de la plantación (DDP). ....  | 40 |
| Tabla 17: Valores de potencial hídrico de tallo ( $\psi_t$ , MPa) en hojas de plantas de pimiento regadas con agua de pozo (P) y agua regenerada (R) a los 30, 45 y 80 días después de la plantación (DDP). ....   | 41 |
| Tabla 18: Niveles de fotosíntesis neta ( $F_n$ , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), conductancia estomática ( $g_s$ , $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) y eficiencia en el uso del agua (EUA, $\mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ ) en hojas de pimiento regados con agua de pozo (P) y agua regenerada (R) a los 30, 45 y 80 días después de la plantación (DDP). ....                            | 42 |
| Tabla 19: Análisis de elementos foliares en plantas de pimiento regados con agua de pozo (P) y agua regenerada (R) durante 2012 a los 15, 30, 45 y 80 días después de la plantación (DDP). ....  | 43 |
| Tabla 20: Valores de potencial hídrico de tallo ( $\psi_t$ , MPa) en hojas de plantas de tomate regadas con agua de pozo (P) y agua regenerada (R) a los 30 y 45 días después de la plantación (DDP). ....   | 45 |

|   |    |
|---|----|
| Tabla 21: Niveles de fotosíntesis neta ( $F_n$ , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), conductancia estomática (gs, $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) y eficiencia en el uso del agua (EUA, $\mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ ) en hojas de tomate regados con agua de pozo (P) y agua regenerada (R) a los 30 y 45 días después de la plantación (DDP). .....   | 45 |
| Tabla 22: Análisis de elementos foliares en plantas de tomate regados con agua de pozo (P) y agua regenerada (R) a los 15, 30, 45 y 80 días después de la plantación (DDP).....   | 47 |
| Tabla 23: Niveles de fotosíntesis neta ( $F_n$ , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), conductancia estomática (gs, $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) y eficiencia en el uso del agua (EUA, $\mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ ) en hojas de pepino regados con agua de pozo (P) y agua regenerada (R) a los 30 y 45 días después de la plantación (DDP). .....   | 48 |
| Tabla 24: Análisis de elementos foliares en plantas de pepino regados con agua de pozo (P) y agua regenerada (R) a los 15, 30, 45 y 80 días después de la plantación (DDP).....   | 50 |
| Tabla 25: Niveles de fotosíntesis neta ( $F_n$ , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), conductancia estomática (gs, $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) y eficiencia en el uso del agua (EUA, $\mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ ) en hojas de melón regados con agua de pozo (P) y agua regenerada (R) a los 30 y 45 días después de la plantación (DDP). .....  | 51 |
| Tabla 26: Análisis de elementos foliares en plantas de melón regados con agua de pozo (P) y agua regenerada (R) a los 15, 30, 45 y 80 días después de la plantación (DDP).....  | 52 |
| Tabla 27: Valores de potencial hídrico de tallo ( $\psi_t$ , MPa) en hojas de plantas de pimiento regadas con agua de pozo sin fertilización adicional (P) y con fertilización adicional (P+F), y regadas con agua regenerada sin fertilización adicional (R) y con fertilización adicional (R+F) a los 30 y 60 días después de la plantación (DDP). .....  | 54 |
| Tabla 28: Niveles de fotosíntesis neta ( $F_n$ , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), conductancia estomática (gs, $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) y eficiencia en el uso del agua (EUA, $\mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ ) en hojas de plantas de pimiento regadas con agua de pozo sin fertilización adicional (P) y con fertilización adicional (P+F), y regadas con agua regenerada sin fertilización adicional (R) y con fertilización adicional (R+F) a los 30 y 60 días después de la plantación (DDP). ..... | 55 |
| Tabla 29: Análisis de elementos foliares en plantas de pimiento regados con agua de pozo (P) y agua regenerada (R), sin y con aplicación de fertilizantes (F) a los 30 y 60 días después de la plantación (DDP).....  | 56 |
| Tabla 30: Valores de potencial hídrico de tallo ( $\psi_t$ , MPa) en hojas de plantas de tomate regadas con agua de pozo sin fertilización adicional (P) y con fertilización adicional (P+F), y regadas con agua regenerada sin fertilización adicional (R) y con fertilización adicional (R+F) a los 30 días después de la plantación (DDP).....   | 58 |
| Tabla 31: Niveles de fotosíntesis neta ( $F_n$ , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), conductancia estomática (gs, $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) y eficiencia en el uso del agua (EUA, $\mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ ) en hojas de plantas de tomate regadas con agua de pozo sin fertilización adicional (P) y con fertilización adicional (P+F), y regadas con agua regenerada sin fertilización adicional (R) y con fertilización adicional (R+F) a los 30 días después de la plantación (DDP). .....        | 58 |
| Tabla 32: Análisis de elementos foliares en plantas de tomate regados con agua de pozo (P) y agua regenerada (R), sin y con aplicación de fertilizantes (F) a los 30 días después de la plantación (DDP). .....   | 59 |
| Tabla 33: Niveles de fotosíntesis neta ( $F_n$ , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), conductancia estomática (gs, $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) y eficiencia en el uso del agua (EUA, $\mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ ) en hojas de plantas de pepino regadas con agua de pozo sin fertilización adicional (P) y con fertilización adicional (P+F), y regadas con agua regenerada sin fertilización adicional (R) y con fertilización adicional (R+F) a los 30 y 60 días después de la plantación (DDP). .....   | 60 |
| Tabla 34: Análisis de elementos foliares en plantas de pepino regados con agua de pozo (P) y agua regenerada (R), sin y con aplicación de fertilizantes (F) a los 30 y 60 días después de la plantación (DDP). .....  | 61 |
| Tabla 35: Conductividad eléctrica del extracto de pasta saturada (CE eps, dS/m, 25 °C) de suelos regados con aguas de pozo y regeneradas en cultivos de viña de vinificación en Santa María. Valores medios acompañados de la desviación típica, obtenidos a partir de cuatro (capa superior) o dos (capa inferior) muestras compuestas entre el verano de 2012 y el invierno de 2014. ....   | 75 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 36: Concentración de sodio (Na) del extracto de pasta saturada (eps) en suelos regados con aguas de pozo y regeneradas en cultivos de viña de vinificación en Santa María. Valores medios acompañados de la desviación típica, obtenidos a partir de cuatro (capa superior) o dos (capa inferior) muestras compuestas entre el verano de 2012 y el invierno de 2014. Estos resultados complementan los indicados en la Tabla 35. .... | 76  |
| Tabla 37: Concentración (mg/kg) de diferentes elementos traza en suelos agrícolas de Mallorca y Menorca usados en el estudio del efecto del riego con aguas regeneradas sobre el suelo. Los niveles registrados son habituales para los suelos de la región y no se ha podido constatar ningún incremento apreciable en los suelos que se han usado aguas regeneradas. ....   | 80  |
| Tabla 38: Influencia de las diferentes características de las balsas y de los procesos que se dan en ellas sobre los parámetros de control establecidos por el Real Decreto 1620/2007....   | 110 |
| Tabla 39: Puntos de agua de las redes de control de Santa Maria del Camí, Inca y Maria de la Salut respectivamente. ID común con la Figura 38, último dígito de cada código. ....   | 123 |
| Tabla 40: Composición química (macroconstituyentes) de las aguas regeneradas de los tres sectores de estudio iniciales en el verano de 2012. ....   | 125 |
| Tabla 41: Parámetros hidráulicos base empleados para los diversos materiales en el modelo. Modificado de PHIB (Plan Hidrológico de les Illes Balears, 2009, rev. 2016). ....  | 142 |
| Tabla 42: Consumo total de agua de las parcelas regadas. Información propia. Unidades en m <sup>3</sup> . ....  | 146 |
| Tabla 43: Composición química de los ENDMS empleados en la simulación. ....   | 146 |
| Tabla 44: Listados de chequeo para impactos y actuaciones en proyectos de regadío, en especial con aguas regeneradas, conforme a los factores del medio. Fase de construcción (página siguiente). ....  | 178 |
| Tabla 45: Listados de chequeo para la evaluación de los impactos y actuaciones en proyectos de regadío, en especial con aguas regeneradas, conforme a los factores del medio. Fase de construcción. ....  | 180 |
| Tabla 46: Listados de chequeo para la evaluación de los impactos y actuaciones en proyectos de regadío, en especial con aguas regeneradas, conforme a los factores del medio. Fase de funcionamiento. ....  | 181 |
| Tabla 47: Parámetros para el seguimiento ambiental por infraestructuras y parcelas en riego   | 184 |
| Tabla 48: Parámetros para el seguimiento ambiental por infraestructuras   | 186 |
| Tabla 49: Parámetros para el seguimiento ambiental de canales y acequias  | 188 |
| Tabla 50: Parámetros para el seguimiento ambiental de pozos y sondeos   | 189 |



# 1 EL REGADÍO CON AGUAS REGENERADAS EN LAS ISLAS BALEARES



## *ESTUDIO DE LA VIABILIDAD AGRONÓMICA*

## 1.1 ANTECEDENTES. LA REUTILIZACIÓN DE LAS AGUAS

La situación futura sobre la sostenibilidad de los recursos hídricos, dependerá básicamente de las tendencias de renovación de los recursos hídricos (que se verán afectados por el cambio climático y la contaminación) y la presión ejercida sobre las extracciones de agua (que depende principalmente de la evolución de los usos sectoriales del agua, población y crecimiento urbanístico, turismo e industria), así como del uso de recursos hídricos no convencionales.

Desde 1997, el uso a nivel mundial de las aguas regeneradas se ha desarrollado muy rápidamente. En la actualidad, aproximadamente el 2% de todo el agua residual se reutiliza en el mundo, lo que representa un volumen de aproximadamente 7,1 mil millones de m<sup>3</sup>, el 0,18% de la demanda mundial de agua (Global Water Intelligence, 2005). Todos los estudios de mercado de reutilización pronostican un alto crecimiento en los próximos diez a veinte años. A nivel mundial, el volumen de agua reutilizada se triplicará en los diez próximos años y, en algunos países como China, esta cifra previsiblemente se multiplicará por diez. El crecimiento anual del mercado de la reutilización del agua, en volumen, se estima entre un 10-12%, lo cual se traduce en una tasa de crecimiento del 181% en la próxima década, en contraste con algo más del 100% de la desalación (Global Water Intelligence, 2005).

El riego agrícola se presenta como el principal potencial de utilización del agua regenerada, ya que los mayores consumos se producen en este sector. En el mundo, la agricultura consume aproximadamente el 70% de los recursos hídricos disponibles, alcanzando valores de hasta un 95% en países en vías de desarrollo (FAO, 2013). En el año 2012, había en todo el mundo más de 324 millones de hectáreas equipadas para el riego (FAO, 2014).

En el caso de España, la demanda de la agricultura es también la más importante (aproximadamente el 71% del volumen total). Según datos del INE (Encuesta sobre el uso del agua en el sector agrario - Año 2014, INE 2016), el volumen de agua de riego utilizado por las explotaciones agrarias ascendió a 15.129 hectómetros cúbicos en 2014. Respecto al origen del agua (Figura 1), el 75,7% del volumen de agua disponible para el riego fue de origen superficial, un 22,4% tuvo origen subterráneo y un 1,9% procedió de otros recursos hídricos, como agua desalada (marina o salobre) o regenerada (procedente de las estaciones de depuración de aguas residuales).

## Origen del agua del regadío

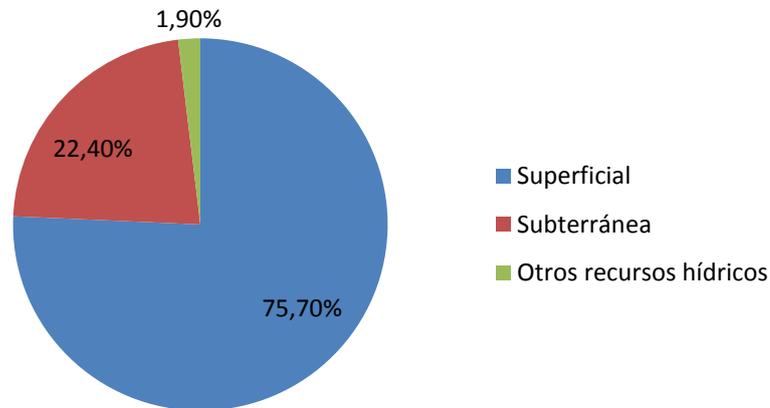


Figura 1: Origen del Agua de Regadío en España. Fuente: INE (Encuesta sobre el uso del agua en el sector agrario - Año 2014), 2016.

En este contexto, y como consecuencia de la alta variabilidad de la disponibilidad de los recursos hídricos, y con un balance hídrico final deficitario casi generalizado a nivel nacional, el uso de agua regenerada está adquiriendo altas expectativas para su empleo en distintos usos.

Según Iglesias (2009), en nuestro país se regeneraban y reutilizaban aproximadamente 368,2 hm<sup>3</sup>/año. Esta cifra es acorde a lo indicado en la noticia publicada en 2016: “España reutiliza 300 hectómetros cúbicos de agua depurada al año, una cuarta parte de lo previsto” (ADECAGUA, 2016). Por otra parte, el MAGRAMA (actual MAPAMA) había previsto en el borrador del Plan Nacional de Reutilización de Aguas alcanzar un total de 463 hm<sup>3</sup>/año de agua regenerada en 2015 y 1.130 hm<sup>3</sup>/año posteriormente (PNRA, versión Preliminar, MAGRAMA 2010). También cabe citar que el marco regulatorio ha traído como consecuencia una cierta reutilización “alegal” de las aguas depuradas (Salgot, 2016), por lo que las cifras pueden estar subdimensionando a la realidad. A pesar de ello, parece irrefutable que el marco normativo es convulso y la tendencia a la (re)utilización de este recurso, creciente.

El uso mayoritario de las aguas reutilizadas en España es el agrícola, unos 261,4 hm<sup>3</sup>/año (Iglesias, 2009) lo que representa aproximadamente el 70,9% del total. Este uso agrícola tiene especial relevancia en las Cuencas del Segura y el Júcar, con un 98 % del volumen total del agua reutilizada destinada a este uso (103,00 y 97,62 hm<sup>3</sup>/año de aguas regeneradas en las Cuencas Segura y Júcar respectivamente).

En cuanto a los usos, además del agrícola, cuenta con un tradicional consumo urbano, tanto para el riego de jardines como para el baldeo de calles, actividades practicadas en un buen número de ciudades de España. Por citar un ejemplo, la ciudad de Madrid utiliza un volumen de 6 hm<sup>3</sup>/año para el riego de zonas verdes y limpieza urbana.

Los usos industriales están representados por diferentes tipologías, destacando las conserveras, la industria textil o la del papel y la celulosa.

En cuanto al uso recreativo, el riego de campos de golf se sitúa como el principal consumidor de este recurso alternativo, Andalucía es la Comunidad Autónoma donde más superficie de golf se riega con agua depurada (23,15 hm<sup>3</sup>/año).

Finalmente, con respecto a los usos medioambientales, destaca la recarga artificial de acuíferos, ya sea para mejorar la calidad de las aguas o para la recuperación de acuíferos sobreexplotados, existiendo además ejemplos para la regeneración hídrica de humedales españoles (PNT Daimiel, humedales del Complejo Coca-Olmedo...) o para la lucha contra la intrusión marina, como usos reales contrastados. Como ejemplo del litoral mediterráneo, en Cataluña se emplearon 42 hm<sup>3</sup>/año en 2015 para la recarga gestionada de acuíferos mediante la inyección de agua regenerada, con expectativas crecientes (Observatorio de sostenibilidad, 2016). También hay casos claros de recuperación de humedales mediante la aplicación directa de aguas regeneradas, como es el caso de la Albufera de Valencia (CENTA, 2017).

Vistos los principales usos, el agua regenerada se ha convertido en un recurso muy valioso para numerosos sectores, y especialmente para la agricultura. No solo se debe al hecho de ser un recurso fiable y continuo, ya que es independiente del régimen pluviométrico y de la disponibilidad de otros recursos de la cuenca, sino además por los nutrientes-fertilizantes que contiene, lo que hace que sea particularmente interesante para la producción agrícola, especialmente en las regiones con escasez de agua y en las que la carestía de los fertilizantes representa un contratiempo para los agricultores. Actualmente, se estima que en todo el mundo existen 20 millones de hectáreas regadas con aguas residuales sin tratar o parcialmente tratadas, lo que representa aproximadamente el 10% del total de tierras de regadío (FAO, 2013). La agricultura representa el primer uso de la reutilización de este tipo de aguas y ya existen evidencias de ello en las antiguas civilizaciones griega y romana (Angelakis y Rose, 2014).

Sin embargo, la regeneración y reutilización de aguas residuales tiene una problemática asociada, principalmente relativa a los riesgos que puede suponer para la salud pública, debido a que puede contener patógenos fecales y otras sustancias contaminantes. Así mismo, es preciso tener en cuenta que cuando su uso final sea agrícola, dichas aguas pueden llevar consigo sustancias potencialmente peligrosas que afecten al sistema suelo-planta, así como a las aguas superficiales y acuíferos adyacentes (con referencia a aguas indebidamente tratadas o con presencia de contaminantes emergentes no evaluados). Los vertidos residuales, particularmente, pueden llegar a aportar al agua metales pesados como el cadmio o mercurio, cuya presencia y dependiendo de su persistencia, puede acumularse en las plantas, provocando fitotoxicidad, con el potencial riesgo para la salud humana si se consumen esos alimentos.

La reutilización de aguas residuales exige, por tanto, la adopción de medidas de protección para la salud pública, en general de carácter preventivo; y/o aplicar tecnologías modernas y eficientes de depuración. Por ello, muchos países basan sus

reglamentaciones sobre esta materia en una combinación de las directrices de California, primeras publicaciones referenciadas acerca de este tema, y a las recomendaciones de la OMS (FAO, 2013).

### 1.1.1 Antecedentes legislativos

El escenario actual en materia de reutilización y legislación resulta un tanto convulso a nivel europeo. En enero de 2017 ha cerrado el período de participación pública para la publicación de la futura Directiva de Reutilización, que se encuentra en estado avanzado en la actualidad. El camino hasta aquí se remonta a “los años veinte”.

En 1918, el Consejo de Salud Pública del Estado de California estableció las primeras regulaciones sobre el uso de aguas residuales para el riego. Durante muchos años, dichas normas fueron la única referencia legalmente válida para lograr el objetivo de “riesgo cero”. Este contaba con requerimientos costosos basado en una tecnología denominada “*Title 22 benchmark*”, que fue revisada en el año 2000 y considerada como referencia mundial para el riego sin restricciones. Dicha tecnología estipula que para lograr un efluente con 0 coliformes/100 ml se requiere, tras un tratamiento secundario, un tratamiento adicional avanzado que incluya una etapa de coagulación/filtración, seguida de una etapa de cloración/decloración (Aquarec, 2006).

Por su parte, la OMS publicó por primera vez unas directrices acerca de la reutilización de aguas residuales en 1973, estableciendo valores de 100 coliformes/100 ml para el riego sin restricciones. En 1989 publicaron las “*Directrices para el reúso de las aguas residuales en agricultura y acuicultura*” donde incluyeron valores limitantes para nuevos parámetros biológicos, en concreto para huevos de helmintos ( $\leq 1/L$ ) y para coliformes fecales (1.000 Ud/100 ml). Las directrices fueron revisadas nuevamente en 2006, en un trabajo conjunto con la FAO, aplicando un enfoque de gestión multi-barrera y recomendando definir objetivos sanitarios realistas. Este paso supuso abandonar una metodología convencional de evaluación de la calidad en el punto de uso (OMS, 1989) a una visión en conjunto de la cadena alimentaria. Esta visión integrada propuso evaluar los riesgos habidos desde la generación de las aguas residuales hasta el consumo de productos cultivados con las mismas.

Las “*Guías de uso de aguas residuales, excretas y aguas grises*” (OMS, 2006) fueron publicadas como herramientas de manejo preventivo de aguas residuales en agricultura para maximizar la seguridad y la salud pública. Las directrices se refieren al nivel de tratamiento de las aguas residuales, restricción relativa a su aplicación a los cultivos, métodos de aplicación en caso de llevarse a cabo y control de la exposición humana.

En Europa, la mayoría de los sistemas de reutilización se ubican en las áreas costeras y en las islas de las regiones mediterráneas semiáridas, debido a la distribución irregular de las precipitaciones, la escasez de los recursos hídricos disponibles, la explotación intensiva o sobreexplotación de ciertos acuíferos, los procesos de intrusión salina de origen marino, etc. Debido al diferente grado de implantación de los sistemas de reutilización, existen legislaciones específicas en los diferentes Estados Miembros

de la UE, así por ejemplo, Francia basa sus directrices en las guías de la OMS, Italia, Grecia o Chipre toman como modelo las directrices de California y de Australia, en general adaptadas y modificadas, mientras que España y Portugal han basado su reglamentación en una combinación de las dos (Angelakis, 2010).

La Directiva 91/271/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas, transpuesta al ordenamiento interno por los diferentes Estados Miembros, obliga a la depuración de aguas residuales urbanas mediante un tratamiento biológico con sedimentación secundaria o sistema equivalente, con objeto de proteger los cauces receptores de dichos vertidos.

Las distintas regulaciones convergen en un punto común, que es considerar las aguas regeneradas como un recurso hídrico alternativo que no sólo permite paliar el déficit hídrico en ciertas zonas geográficas, sino que posibilita el uso sostenible de este valioso recurso. Sin embargo, es necesario un proceso adicional de acondicionamiento de estas aguas depuradas (regeneración) para adecuarlas a los diferentes usos posibles. En este contexto ha habido varios proyectos en Europa, por ejemplo *Aquarec* (2002-2006) fue financiado por la Comisión Europea y tuvo por objetivo planear un contexto integrado en materia de reutilización de aguas regeneradas. Dicho proyecto propuso diferentes categorías de calidad del agua (microbiana y química) para diferentes usos finales (urbanos, agrícolas o industriales).

En España, el *Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas*, aclara varios conceptos relativos a la reutilización del agua, empleados indistintamente hasta su publicación. Así fija un conjunto de usos permitidos (urbanos, agrícolas, recreativos, industriales y ambientales), y prohibidos, entre los que destaca el consumo humano. Además normaliza los procedimientos administrativos para la obtención del derecho al acceso para su uso y establece los parámetros de calidad y valores máximos exigidos para cada uso, determinando asimismo el régimen de control y responsabilidades en relación al mantenimiento de la calidad. Esta regulación ha sido considerada como una de las más restrictivas del mundo en materia de recarga intencional de los acuíferos, a pesar de que solo son regulados ocho parámetros (Fernández et al., 2016).

En cuanto a la reutilización de estas aguas en agricultura, se establecen distinciones en tres sub-usos de tipo agrícola: riego de cultivos para su consumo en fresco, riego de cultivos para cuyo consumo no sea en fresco, riego de pastos y acuicultura, y por último, riego de cultivos leñosos, flores ornamentales, viveros e invernaderos y riego de cultivos industriales no alimentarios. Se prevén tres tipos de calidad según el alimento se consuma elaborado o en crudo, aumentando de forma progresiva el nivel de exigencia (B, C y D). Así mismo, el RD propone tipos de tratamiento para los distintos usos, recomendando un tratamiento de filtración seguido de una etapa de desinfección con luz UV en el caso de calidades B (*E. coli* <100 ufc/100ml) y C y D (*E. coli* <1.000 ufc/100 ml), y en caso de aguas con alto contenido en sales, incluir una etapa de ósmosis inversa o electrodiálisis reversible (EDR).

En este contexto, la Organización Internacional de Normalización ha publicado en 2015 la Norma ISO 16075 para el tratamiento y la reutilización de aguas residuales

depuradas para riego agrícola. Dicha norma ofrece directrices para el desarrollo y ejecución de proyectos de aguas residuales depuradas, incluyendo elementos de diseño, materiales, construcción y rendimiento. Así mismo engloba otros temas de interés, tales como la calidad del agua, los tipos de cultivos que pueden regarse, los riesgos asociados y los principales componentes del proyecto, especialmente los dispositivos de almacenamiento y las redes de distribución, entre otros. La norma se divide en tres partes, correspondientes a las bases de un proyecto de reutilización de aguas depuradas para riego, su desarrollo y los componentes del proyecto respectivamente. Actualmente, está en curso el desarrollo de una cuarta parte relativa a la supervisión y control. En esta norma se inspira la inminente Directiva para la reutilización de aguas regeneradas para regadío, cuya publicación está prevista para la anualidad 2020.

### 1.1.2 Antecedentes en materia de I+D+i

Respecto a las tecnologías de regeneración, éstas han experimentado en los últimos años un notable desarrollo, mejorándose sensiblemente su fiabilidad y la calidad de los efluentes resultantes, contándose en la actualidad con unos 180 tratamientos de regeneración (Ortega & Iglesias, 2009). Según Asano (1998), la mejor calidad del agua regenerada se logra mediante procesos de tratamiento terciarios con doble membrana (microfiltración y ósmosis inversa). La selección de los procesos y tecnologías necesarios para la regeneración de aguas residuales implica el conocimiento previo de los efluentes a tratar, su calidad en el tiempo y la calidad del agua exigida para su uso final.

Según el informe "*Optimising water reuse in the EU*" (BIO, 2015), se pronostica un volumen de reutilización de aguas residuales de 3.222 hm<sup>3</sup>/año en Europa para el horizonte 2025, con España ocupando el primer lugar por su mayor potencial de reutilización (más de 1.200 hm<sup>3</sup>/año), seguido por Italia y Bulgaria. En esta línea, la UE sigue apostando por la reutilización de aguas depuradas y así ha quedado demostrado tras la publicación de los cinco objetivos prioritarios de la "*European Innovation Partnership on Water*" (EIP Water). Así mismo, la UE continúa financiando proyectos de investigación enfocados a promover la reutilización del agua.

Por citar algunos, el proyecto SAFIR (2006-2010) "*Safe and high quality food production using low quality waters and improved irrigation systems and management*" se centra en evaluar nuevos sistemas de riego que garanticen la calidad y seguridad de vegetales regados con aguas depuradas, la evaluación de su impacto y del riesgo emparejado bajo la perspectiva "*De la granja a la mesa*". Finalmente hay referencias a desarrollos de modelos matemáticos, económicos y de gestión que supongan una herramienta para el apoyo de toma de decisiones de los agricultores.

El proyecto de investigación *Consolider-Tragua "Tratamiento y Reutilización de Aguas Residuales para una Gestión Sostenible"* iniciado en 2006, contó con la experiencia de 24 grupos de investigación de diferentes disciplinas para abordar de manera integrada los diferentes aspectos implicados en la reutilización de aguas residuales procedentes de EDARs de diferentes puntos de España (Gómez et al.,

2009). Entre otras tareas, llevó a cabo la profundización en diferentes tecnologías; unas ya desarrolladas y otras en desarrollo, pero todas ellas de gran utilidad para llevar a cabo el tratamiento de regeneración y posterior reutilización de agua. Entre sus objetivos también estuvieron el establecimiento de criterios de calidad química y biológica de las aguas y la determinación de su impacto sobre el medio natural, concretamente en agricultura, el riego de campos de golf y la recarga intencionada de acuíferos, todo ello bajo el análisis de los aspectos económicos.

De este proyecto emanaron interesantes resultados y una serie de publicaciones sobre la reutilización de aguas y sus diferentes aplicaciones, tales como.

- Guía de Tecnologías de Tratamiento de aguas para su reutilización. Donde se describen procedimientos y resultados de la eficacia de tecnologías innovadoras como el uso de ozono o la adsorción con nuevos materiales en la eliminación de contaminantes emergentes entre otros aspectos.
- Guía metodológica para el uso de aguas regeneradas en riegos y recarga de acuíferos. Se determinan los aspectos más relevantes a tener en cuenta en la reutilización, tanto en el estudio previo como en las comprobaciones posteriores para reutilizar con garantías.
- Ejemplos prácticos de reutilización de agua residual tratada y regenerada para el riego de cultivos. Evaluación de riesgos. Este documento presenta nueve experiencias llevadas a cabo para evaluar el riesgo del riego de cultivos agrícolas con aguas regeneradas. Se proponen entre otros, estudios de semicampo utilizando mesas de escorrentía para evaluar la movilidad de contaminantes, evaluación de la viabilidad del agua residual depurada en cultivos como el tabaco o eficacia de la microfiltración en cultivos hortícolas.
- Experiencias prácticas de reutilización en el marco del Programa Consolider Tragua. Se evalúan aspectos suelo-agua-planta y sus posibles impactos en el medio de diferentes aplicaciones, destacando la reutilización de agua en un campo de golf en Canarias, el riego de cultivos para obtención de biodiesel en Andalucía y la inyección de agua regenerada en un acuífero para frenar la intrusión marina en Cataluña.
- Guía de caracterización edáfica para actividades de regeneración de aguas residuales en usos ambientales. El objetivo de esta guía es establecer el estado inicial de la zona no saturada y así poder establecer las posibles interacciones futuras con las aguas regeneradas.

El Proyecto *DEMOWARE* (2014-2016, FP7 Water inno-demo) “*Innovation Demonstration for a Competitive and Innovative European Water Reuse Sector*” ha desarrollado mejoras para la disponibilidad y fiabilidad de las soluciones tecnológicas enfocadas a la reutilización, y a la vez, creado una identidad profesional unificada de los agentes reutilizadores dentro del sector europeo del agua. Su principal objetivo ha sido incrementar la disponibilidad de agua a partir de la superación de las principales barreras tecnológicas, sociales y económicas que tradicionalmente limitan la implantación de esquemas de reutilización de agua en Europa.

Numerosas instituciones han posibilitado el avance técnico en materia de reutilización, tales como la Universidad de Barcelona, el Centro de Nuevas Tecnologías del Agua (CENTA), con múltiples proyectos relacionados en la temática.

Debido al importante potencial de la reutilización de las aguas residuales depuradas en el riego agrícola, es primordial seguir estudiando los efectos de su aplicación en el medio ambiente, así como en los riesgos para la salud pública. En esta línea se enmarcan muchas de las investigaciones que se llevan a cabo actualmente, y de modo particular, enfocadas al estudio de técnicas de regeneración que eliminen contaminantes emergentes. Otra línea destacada de las investigaciones es el aumento de la eficacia de las tecnologías existentes.

Obviamente, el objetivo de esta publicación difiere de hacer un estudio exhaustivo del estado del arte en esta materia, y los autores se han limitado a referenciar los documentos consultados. No existe ánimo alguno por parte del equipo redactor de ofender a importantes investigadores cuyos trabajos no han sido mencionados en aras de la brevedad, sin menoscabo alguno por su apreciable esfuerzo.

Como conclusión, la regeneración y reutilización del agua debe ser una herramienta de la gestión integrada de los recursos hídricos en España que ayude a aliviar la presión que sobre ellos se ejerce, especialmente ante los nuevos retos que plantea el futuro: una mayor población con una mayor necesidad de alimentos, el acceso al agua como un derecho humano y acciones para mitigar los efectos adversos del cambio climático.

Ante la creciente preocupación por el cambio climático y su relación con la disponibilidad de agua, las aguas regeneradas han pasado a constituir un sistema alternativo eficiente que puede paliar e incluso suplir las incertidumbres en el regadío, así como asegurar unos ingresos estables a los agricultores. Consecuentemente, las previsiones relativas al incremento en la utilización de estos sistemas empiezan a constituir un hecho incuestionable.

## **1.2 LA AGRICULTURA EN LES ILLES BALEARS. CONTEXTO DE LA ACTUACIÓN**

La situación geográfica y el clima del Archipiélago Balear han favorecido el desarrollo, especialmente a partir de los años 60, de un importante sector turístico. Este representa la principal actividad económica del archipiélago con un 75% del PIB (sector servicios 85%).

Con la información disponible en la actualidad se estiman unas extracciones para abastecimiento de 90-95 hm<sup>3</sup> y de 130-150 hm<sup>3</sup> para agricultura. La agricultura, con un 1,5 del PIB y un porcentaje de 2,3% de población activa, utiliza, aproximadamente, el 60% de los recursos extraídos. Dichas extracciones están muy próximas e incluso superan los recursos explotables de modo sostenible del archipiélago Balear provocando serios problemas de salinización en numerosos acuíferos.

Con la situación actual de los recursos, para satisfacer esta demanda creciente habrá que, además de disponer de las infraestructuras existentes o en construcción, actuar seriamente sobre la demanda (reduciendo la actual entre un 20 y un 30%), especialmente en el sector agrícola, realizando proyectos de sustitución de recursos hídricos para abastecimiento urbano, por aguas regeneradas.

En términos generales, en la agricultura balear existe una tendencia decreciente de la superficie de regadío, que en cifras relativas descendió un 20% entre los años 1982 y 1997. La disponibilidad de agua decreciente y el encarecimiento del acceso a ésta han traído como consecuencia un progresivo y creciente abandono del sector agrícola en las islas, con su consiguiente deterioro socio-económico, cultural y, en definitiva, social. Hay que subrayar que en los 10 últimos años la superficie agraria útil se ha visto reducida en casi 32.000 hectáreas (Figura 2).

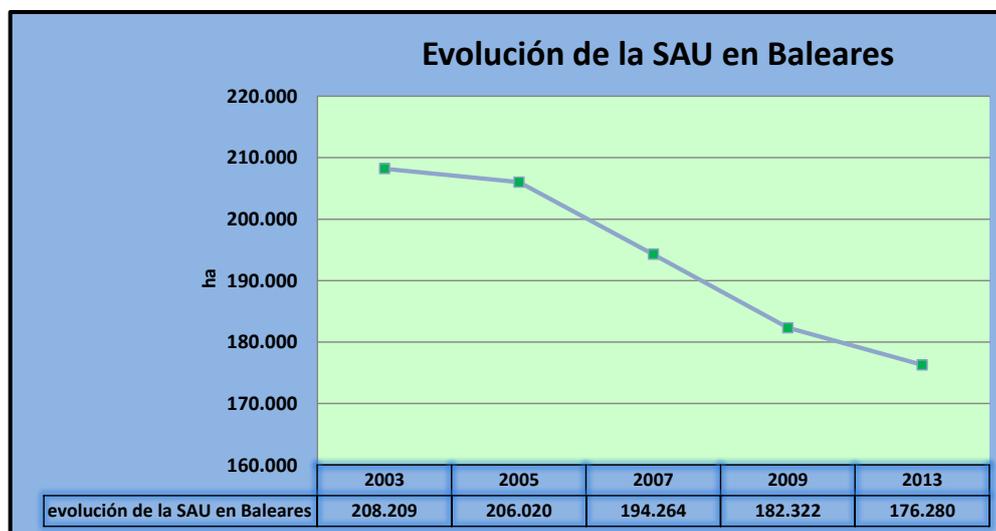


Figura 2. Evolución de la SAU en Baleares.

El aumento de la superficie dedicada a cultivos mediterráneos como almendro, olivo y vid, frente al gran retroceso de forrajeras y, en general, el cambio hacia cultivos con menores requerimientos hídricos, ha reducido notablemente los consumos de agua para riego entre 1995 y 2003 de 122 a 98,1 hm<sup>3</sup>. Estudiando la procedencia del agua para riego agrícola, únicamente entre un 11-12% se trata de aguas residuales depuradas con un volumen total de reutilización de 13,15 hm<sup>3</sup>. Esta cifra es un poco mayor en la actualidad, pero no ha variado significativamente. Hay que incidir en que las cifras que se exponen se refieren a riegos agrícolas planificados, no a los que se realizan en muchos casos de forma precaria en las cercanías de las estaciones depuradoras que vierten o no a torrentes. Tampoco se tratan los regadíos de campos de golf o jardines urbanos (Santarrufina, 2007).

Al mismo tiempo, el incremento de la superficie regada con riego localizado, frente a la cada vez menor aplicación de riegos por gravedad también ha contribuido, en gran medida, a una mejor eficiencia en el uso del recurso en *les Illes Balears*. Así, mientras el riego por gravedad ha pasado de representar el 25% de la superficie a pasar a utilizarse únicamente en el 7% de la superficie de regadío, el riego localizado

(microaspersión, goteo, etc.) ha pasado de ser aplicado en el 18,29% de la superficie a serlo en el 38% de la misma, por tanto, ha existido un incremento superior al 100% (Santarrufina, 2007).

### 1.2.1 Situación de la reutilización en *les Illes Balears*

En *les Illes Balears* existen unos recursos naturales subterráneos limitados, cifrados en torno a 612,88 hm<sup>3</sup>/año. De ellos, los recursos movilizables en la actualidad han sido evaluados en 189,34 hm<sup>3</sup>/año en periodos de pluviometría normal, registrando una importante disminución en los casos de sequías prolongadas.

Tabla 1: Datos extraídos del Plan hidrológico de *les Illes Balears* (2015-2021).

|                | Superficiales |             | Subterráneos  |               | Totales       |                         |
|----------------|---------------|-------------|---------------|---------------|---------------|-------------------------|
|                | Potenciales   | Disponibles | Potenciales   | Extraído      | Potenciales   | Disponibles / Extraídos |
| Mallorca       | 95,00         | 7,20        | 395,90        | 142,10        | 490,90        | 149,30                  |
| Menorca        | 18,00         | 0,00        | 61,11         | 20,18         | 79,11         | 20,18                   |
| Eivissa        | 8,00          | 0,00        | 30,41         | 19,28         | 38,31         | 19,28                   |
| Formentera     | 0,00          | 0,00        | 4,56          | 0,58          | 4,56          | 0,58                    |
| <b>Balears</b> | <b>121,00</b> | <b>7,20</b> | <b>491,98</b> | <b>182,14</b> | <b>612,88</b> | <b>189,34</b>           |

La capacidad de depuración de aguas residuales sobrepasa los 100 hm<sup>3</sup> anuales, de los cuales se reutiliza un 20% aproximadamente. La Propuesta del Plan Hidrológico de *les Illes Balears* prevé elevar la cifra de reutilización a 74 hm<sup>3</sup>, destinados principalmente a la agricultura (Santarrufina, 2007).

La explotación de los acuíferos de algunos sectores del litoral mediterráneo se ha traducido en cifras consideradas como “sobreeplotación”. Este hecho ha motivado procesos de intrusión salina de origen marino, con la consecuente salinización de ciertos acuíferos baleares con una explotación tradicional, como es el caso de Campos y del *Pla de Sant Jordi*, en Mallorca, o la de la práctica totalidad en los de Ibiza.

En Mallorca concretamente, la salinización de acuíferos ya provocó una cadena de actuaciones para contrarrestar este impacto desde la década de los años setenta del siglo pasado. La creciente salinización del agua de los pozos de los agricultores motivó que las aguas regeneradas empezaran a ser consideradas como una alternativa para su utilización (reutilización) como agua de riego, concepto innovador para la época y consonante con la primera depuradora que se construyó en Palma.

Desde principios de la década de los 70 se llevó a cabo las primeras actuaciones de reutilización de las aguas depuradas en la Ciudad de Palma para regar la zona agrícola del *Pla de Sant Jordi* (250 ha). Esta práctica se incrementó notablemente en el año 1990 al extenderse a otras zonas regables del Polígono II (900 ha), con un volumen anual de reutilización de 12 hm<sup>3</sup>.

El Pla de Sant Jordi constituye la mayor zona regable con aguas regeneradas de *les Illes Balears*, en la cual la alfalfa ha constituido el cultivo dominante. Su tolerancia a la salinidad permite su cultivo con aguas con una salinidad considerable. Prácticamente, todas las parcelas se riegan a manta. El cultivo se mantiene entre 5 y 7 años, realizando entre 6 y 7 cortes anuales, mayoritariamente en primavera y verano. En suelos del Pla de Sant Jordi, Peguera e Inca se han estudiado los efectos del riego con aguas regeneradas durante un periodo largo de tiempo, de más de 20 años (Adrover et al., 2012). Así, si se compara estos suelos regados o no con aguas depuradas, no se aprecian efectos negativos sobre los parámetros indicadores de la fertilidad, constatándose un incremento significativo en la actividad biológica, aspecto reflejado a través de la biomasa microbiana y las actividades enzimáticas  $\beta$ -glucosidasa y fosfatasa alcalina. El impacto del riego con aguas regeneradas relacionado con la concentración de metales pesados fue estudiado también en las mismas zonas, incluyendo parcelas que se empezaron a regar a mediados de la década de 1970. No fue detectada ninguna acumulación de estos metales en el suelo, comparándolos con suelos característicos de la zona (Adrover et al., 2007), ni en muestras de alfalfa regadas con aguas regeneradas recogidas en el Pla de Sant Jordi (Adrover y Vadell, 2007).

A lo largo de los últimos 10 años se ha realizado un control continuo de la piezometría y calidad química del acuífero Pliocuaternario, observando una clara recuperación de los niveles piezométricos y un descenso importante del contenido en cloruro del acuífero, lo cual pone de manifiesto un retroceso de la intrusión marina. No obstante, la presencia de nitratos se ha incrementado notablemente y se han detectado contenidos anómalos en microelementos como Fe, Mn y Zn. Además, posibles contaminaciones puntuales a partir de parámetros microbiológicos indican procesos puntuales en este tipo de contaminación, no estando muy clara su relación con la reutilización de las aguas depuradas (según IRYDA, 1995-- trabajo no referenciado). Son abundantes los trabajos que, a lo largo de la última década, estudian la incidencia de este recurso en los suelos y aguas subterráneas (IRYDA, 1976,1994; IGME, 1980; Santarrufina et al., 1996; SGOP, 1991; Junta D'Aigües de Balears, 1995 y 1997).

### **1.2.2 Futuro de la agricultura y la reutilización en *les Illes Balears***

La capacidad nominal de depuración de las Estaciones Depuradoras en funcionamiento en *les Illes Balears* es del orden de 100 hm<sup>3</sup>. Según datos recogidos en el Plan Hidrológico de *les Illes Balears* (2013) en el año 2011 se utilizaban para riego 24,5 hm<sup>3</sup> y estaba en proyecto el aprovechamiento de 11,5 hm<sup>3</sup> adicionales.

Para impulsar la reutilización y la agricultura balear, se aprovecha el fuerte potencial de producción de aguas depuradas del sector turístico para complementar la escasez de recursos hídricos destinados al sector agrícola. La utilización de las aguas regeneradas para el riego agrícola representa una opción de extraordinario interés, tanto para las Administraciones responsables de la gestión de los recursos hídricos como para el sector agrario. Como objetivos más destacables, cabe mencionar la eliminación de los vertidos contaminantes de las aguas residuales; aprovechamiento y optimización de los recursos hídricos disponibles y la mejora de la rentabilidad

económica de las explotaciones agrarias. Conforme a los últimos indicadores, la reutilización de las aguas en el ámbito mediterráneo se constituye como una alternativa “inevitable”.

Por otra parte, el efecto del riego con agua regenerada contribuye a preservar o incrementar una masa vegetal proveedora de materia orgánica al suelo, y por lo tanto, favorece su retención en el suelo, con su consecuente enriquecimiento, y favorece su infiltración hacia los acuíferos. Ambos procesos son considerados capacitados para actuar en sentido opuesto al avance de la desertificación.

Conscientes de lo expuesto anteriormente, y dado lo limitado de los recursos hidráulicos convencionales, el legislador declaró la reutilización de aguas residuales regeneradas para regadío en *les Illes Balears* “de interés general”, mediante la Ley 30/1998 de Régimen Especial de *les Illes Balears*. En dicha Ley establecía que los Gobiernos del Estado y de la Comunidad Autónoma debían elaborar, conjuntamente, un plan de optimización y ahorro del consumo de agua que se aplicaría, especialmente, a la agricultura. Fruto de ello, con fecha 28 de abril de 1999 se firmó una Declaración de intenciones acompañada de un Protocolo para la realización de obras de regadío adaptadas y diseñadas para una mayor optimización de recursos hídricos. Así mismo se reconocía el carácter complementario de las previsiones de gasto contenidas en el proyecto del Plan Nacional de Regadíos, Horizonte 2008, en consonancia y apoyado en alternativas para solucionar los problemas hídricos que afectaban al archipiélago balear.

La importancia de la insularidad de la agricultura y la necesidad de evitar su desaparición, propició que el financiamiento para estas actividades sufragado por las Administraciones Públicas alcanzara hasta el 100% en *les Illes Balears*, a diferencia del resto del Estado, donde sólo llegaba al 50%.

El Plan Nacional de Regadíos, Horizonte 2008, fue aprobado mediante el Real Decreto 329/2002, de 5 de abril y el correspondiente Acuerdo Marco de colaboración entre ambas Administraciones (nacional y autonómica). El PNR fue aprobado el 23 de diciembre de 2002, e incluía en su articulado una superficie de 2.250 ha destinadas a regadíos con aguas regeneradas en *les Illes Balears*. Posteriormente y con objeto de clarificar las condiciones de colaboración técnica y financiera, se firmó un nuevo Convenio de Colaboración entre el MAPA (actual MAPAMA) y la CAIB el 20 de febrero de 2004, el cual incorporaba todas las actuaciones en materia de regadíos ya previstas tanto en el Protocolo mencionado como en los capítulos del PNR dedicados al archipiélago balear.

La Figura 3 recopila las actuaciones ya operativas declaradas de interés general que aprovechan el agua regenerada procedente de las plantas depuradoras y balsas de almacenamiento para el riego.

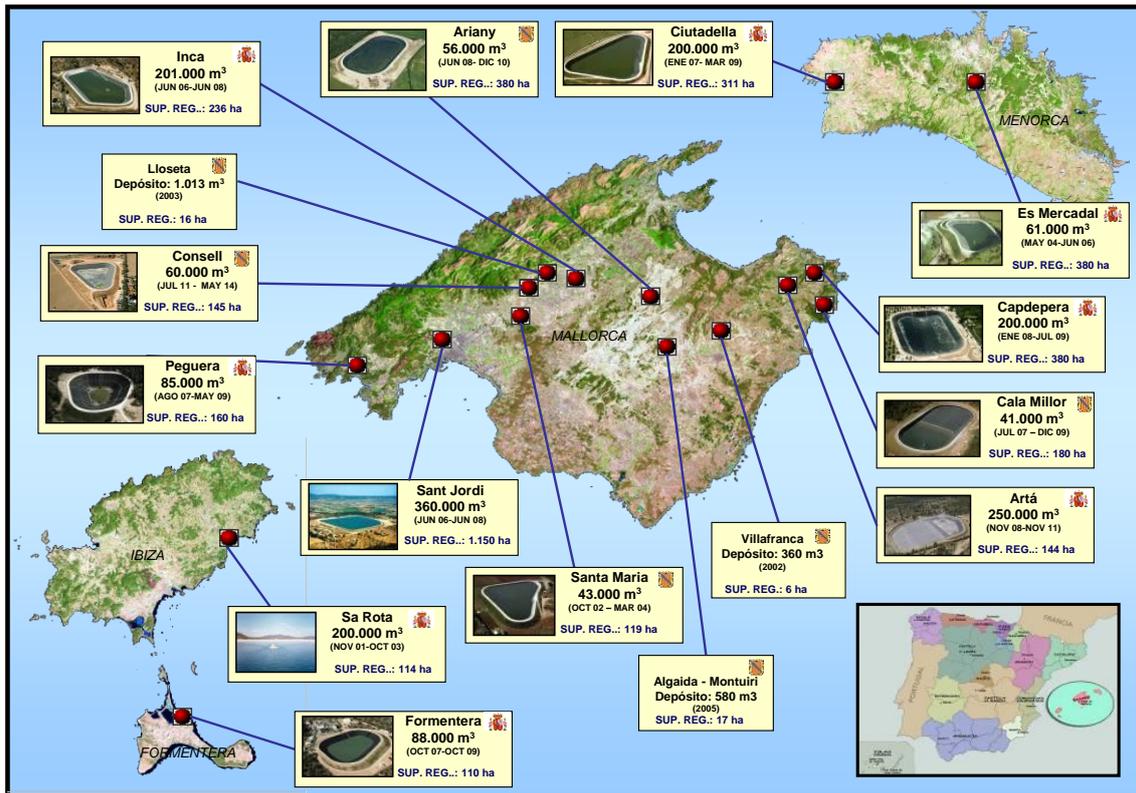


Figura 3: Actuaciones finalizadas que aprovechan el agua regenerada.

La Tabla 2 establece las actuaciones contempladas en una 1ª fase y la Tabla 3 las actuaciones contempladas posteriormente.

Tabla 2: Actuaciones de aprovechamiento de las aguas regeneradas, 1ª fase.

| REGADÍO        | PROMOTOR    | VOLUMEN EDAR (m³) | CONSUMO ANUAL TEÓRICO (m³) |
|----------------|-------------|-------------------|----------------------------|
| SANT JORDI     | MAPA Y CAIB | 33.283.535        | 12.500.000                 |
| SANTA EULALIA  | MAPA        | 3.266.401         | 1.237.217                  |
| <b>TOTALES</b> | -           | <b>36.549.936</b> | <b>13.737.217</b>          |

Tabla 3: Actuaciones de aprovechamiento de las aguas regeneradas del convenio de colaboración entre el MAPA (actual MAPAMA) y la CAIB (Conselleria de Medi Ambient, Agricultura i Pesca). Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por el MAPA y la CAIB.

| REGADÍO              | PROMOTOR | VOLUMEN EDAR (m³) | CONSUMO ANUAL TEÓRICO (m³) |
|----------------------|----------|-------------------|----------------------------|
| SANTA MARIA DEL CAMÍ | CAIB     | 363.463           | 142.800                    |
| INCA                 | MAPA     | 2.669.990         | 969.522                    |
| SON SERVERA          | CAIB     | 1.496.371         | 867.031                    |
| PEGUERA              | MAPA     | 997.034           | 914.276                    |
| CONSELL-ALARÓ        | CAIB     | 449.525           | 384.000                    |
| MARIA-ARIANY-SINEU   | CAIB     | 390.157           | 285.452                    |
| ARTÀ                 | MAPA     | 395.943           | 589.236                    |
| CAPDEPERA            | MAPA     | 1.217.710         | 898.941                    |
| VILLAFRANCA          | CAIB     | 195.399           | 18.452                     |

| REGADÍO          | PROMOTOR | VOLUMEN EDAR (m <sup>3</sup> ) | CONSUMO ANUAL TEÓRICO (m <sup>3</sup> ) |
|------------------|----------|--------------------------------|---|
| ALGAIDA-MONTUIRI | CAIB     | 208.334                        | 75.484                                  |
| LLOSETA          | CAIB     | 262.182                        | 72.548                                  |
| ES MERCADAL      | MAPA     | 285.243                        | 195.000                                 |
| CIUTADELLA       | MAPA     | 3.482.738                      | 1.325.898                               |
| FORMENTERA       | MAPA     | 447.784                        | 263.696                                 |
| <b>TOTALES</b>   | -        | <b>12.861.873</b>              | <b>7.002.336</b>                        |

Todas estas actuaciones fueron diseñadas para cumplir con los criterios de calidad del agua establecidos tanto en el Plan Hidrológico de *les Illes Balears* como en el *RD 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas* en España.

Con esto se demuestra el gran potencial de *les Illes Balears*, con respecto al desarrollo de una agricultura de regadío rentable, mediante la modernización de sus regadíos y el desarrollo de proyectos de reutilización, que le permitan acercarse a cifras similares a la de islas homólogas (Islas Canarias), que tienen más de 2,5 veces su superficie regable respecto de la agraria útil (Santarrufina, 2007).

### 1.3 OBJETIVOS

A pesar de cumplir con toda la normativa vigente, se ha observado que es necesario concienciar a los usuarios de las bondades de la reutilización, al haberse detectado una cierta resiliencia y resistencia al cambio en los propios usuarios finales. Para ello se ha considerado que una de las opciones más serias era la ejecución de estudios prácticos basados en un sustrato científico sólido en los que quede demostrado que la (re)utilización de aguas residuales regeneradas para el riego no representa ninguna alteración ni en el suelo, ni en los cultivos, ni en los acuíferos.

En la actualidad hay una carencia importante de datos reales y contrastados que demuestren la influencia de la utilización de aguas residuales regeneradas para el regadío. El hecho de disponer de estos datos reales y compartirlos convenientemente resulta necesario para concienciar a los agricultores de los beneficios que comporta su uso, despertar el interés general y crear un efecto “en cadena” para proseguir realizando proyectos que eviten que un recurso tan importante como es el agua acabe en el mar sin opciones de reutilización. En este contexto surgió el proyecto de I+D del Grupo Tragsa “*Efectos del riego con agua regenerada en suelos, acuíferos y cultivos*”, recientemente concluido, y que se resume en esta publicación.

El objeto principal del estudio ha sido obtener una serie de datos y resultados que permitan evaluar el efecto del riego con agua regenerada en los cultivos y su posterior afección en los suelos y en los acuíferos, tanto de forma dissociada como con un enfoque integrado, y, en el caso de los cultivos, tanto a nivel de calidad como de rendimientos. A este objetivo hay que sumar otros conectados de tipo medioambiental y económico.

El estudio se ha llevado a cabo en varias zonas de *les Illes Balears*, poniendo en valor la importante inversión realizada por parte de la Administración durante estos últimos años en proyectos y obras ampliamente distribuidas de aprovechamiento de las aguas depuradas regeneradas. Este factor ha sido clave, puesto que estas actuaciones se han llevado a cabo en contextos diferentes, con unas condiciones ambientales y geológicas diversas pero a su vez representativas del ámbito mediterráneo.

#### 1.4 METODOLOGÍA

El proyecto ha estado dividido en 5 líneas de trabajo en las cuales se ha establecido una metodología acorde con los objetivos planteados:

Evaluación de los efectos que tienen la utilización de las aguas regeneradas sobre la fisiología de la **PLANTA**, la producción y la calidad de la cosecha. Se han establecido diferentes zonas de estudio en las cuales se han definido parcelas piloto con diferentes especies: cultivos leñosos de vid, olivos jóvenes y hortícolas. Estas parcelas se dividen a la vez en dos subparcelas, por un lado las gestionadas directamente por los agricultores y, por el otro, las gestionadas por personal de TRAGSA, empresa promotora de este estudio. Cada una de estas subparcelas fueron regadas con distintas dosis y combinaciones de dos fuentes de agua: regenerada y de pozo.

En el caso de los cultivos hortícolas, también se establecieron dos tratamientos adicionales, equivalentes a utilizar una solución nutritiva que alcance, considerando los aportes iniciales de nutrientes de cada tipo de agua, las unidades fertilizantes necesarias que optimizan el desarrollo y la producción de los cultivos estudiados. En todos los tratamientos, se han realizado medidas periódicas de los parámetros de control de la situación hídrica de la planta, los niveles de intercambio gaseoso a nivel foliar, medidas de la dinámica del crecimiento vegetativo, cobertura del dosel (LAI), floración, cuaje y crecimiento del fruto para los diferentes tratamientos considerados. Asimismo, se han practicado análisis foliares para evaluar el estado nutricional de la planta en los diferentes estados fenológicos. Al final de cada ciclo de cultivo se han evaluado tanto la producción final como la calidad (firmeza, color, pH y sólidos solubles, si proceden) de las cosechas obtenidas en las especies consideradas por cada tratamiento.

Estudio y evaluación de la incidencia sobre el **SUELO** del riego con aguas residuales depuradas. Se han identificado y caracterizado diversas unidades edafológicas presentes en cada zona de estudio donde se hace uso de aguas regeneradas. En estas unidades se ha realizado una recogida de muestras cuatrimestralmente entre el verano de 2012 y el invierno de 2014, y llevado a cabo un diagnóstico final del efecto del riego durante un año adicional.

En cada una de las muestras se ha determinado el índice de estabilidad estructural mediante el método de Kemper y Rosenau (1986), partiendo de la tierra tamizada entre 1 y 2 mm, que fue sometida inicialmente a una humectación, para posteriormente comparar la disgregación de los agregados mediante la aplicación de agua con una solución de hexametáfosfato de sodio. Las determinaciones de este

parámetro se han realizado, en todos los casos, por triplicado. La salinidad (prueba previa de salinidad; CE 1:5 y sobre el extracto de pasta saturada) y el pH del suelo (suspensión 1:2,5) se han determinado de acuerdo a los métodos oficiales del MAPA (MAPA, 1994).

Estudio de la evolución de la calidad del agua de riego almacenado en las **BALSAS DE REGULACIÓN**. Para ello se seleccionaron y acondicionaron dos balsas de estudio con características que las hacen diferentes entre sí, una en Inca y la segunda en *Ariany*. En cada una de las balsas se han realizado muestreos periódicos, con una frecuencia variable en función del régimen de uso del agua almacenada, mediante la instalación de un punto de muestreo fijo. Así mismo se ha empleado una embarcación neumática para la medición de parámetros inestables in situ y la realización de perfiles verticales, lejos de la influencia de las orillas. Dichos perfiles fueron realizados mediante una sonda multiparamétrica que aporta información sobre la temperatura, el pH, la conductividad, la salinidad, la concentración de oxígeno y su porcentaje de saturación en el agua. De esta forma se eligieron las profundidades y diseñaron los programas de muestreo, con objeto de alcanzar un grado de conocimiento muy superior al aportado por métodos paralelos, como por ejemplo botella hidrográfica tipo *Van Dorn*. El muestro de alícuotas y su envío a laboratorio ha complementado las mediciones, mediante la determinación de los sólidos en suspensión, la concentración de clorofila A, la DBO<sub>5</sub>, el Carbono Orgánico Disuelto (COD) y el total (COT); así mismo la alcalinidad, la concentración de cloruros y, finalmente, el análisis de nutrientes y metales.

Además, de las diferentes muestras recogidas, se realizó el estudio de las comunidades del zooplancton y de las comunidades fitoplanctónicas mediante el método de *Utermöhl*. En la misma balsa se realizaron medidas de transparencia e incidencia de la luz mediante indicadores de turbidez, tales como el disco de *Secchi* y del perfil de luz mediante luxómetro. Por último, se realizaron análisis trimestrales de la carga bacteriana y de organismos patógenos en toda la columna de agua.

Para estudiar la evolución de la calidad del agua de riego a lo largo del sistema, se realizó el seguimiento de una serie de parámetros físico-químicos y microbiológicos en distintos puntos del mismo; en concreto a la salida de la EDAR, antes de la entrada en la balsa regulación, en la propia balsa, a la salida y a la salida del hidrante o boca de riego. Esta actividad ha permitido la selección del punto de muestreo más idóneo para futuras regulaciones.

Caracterización cualitativa del estado inicial de los **ACUÍFEROS**. Para el estudio del efecto del riego en los acuíferos se ha recopilado, ordenado, ampliado y, sobre todo, mejorado la información ya disponible de carácter hidrogeológico en piezometría y calidad de las aguas. Además se delimitaron los bordes de cada acuífero y definido una columna litoestratigráfica tipo para cada zona de estudio, tanto sobre un sustrato detrítico como calcáreo. Así mismo se han evaluado las transferencias laterales de aguas subterráneas, y cerrado balances zonales. Todo ello con objeto de preparar los datos precisos para la adecuada caracterización y su posterior modelización.

Se han analizado las aguas subterráneas en, al menos, tres captaciones de cada sector seleccionadas en un circuito de interacción desde “aguas arriba”, donde no hay regadío, hacia abajo según el flujo de las aguas subterráneas atravesando las zonas regables, de modo que los pozos seleccionados para muestreo estuvieran alineados con una línea de flujo subterráneo. En el sector de Inca se han establecido dos circuitos, uno para el acuífero superficial y otro para el profundo, al haberse detectado un comportamiento hidráulico multicapa. Los parámetros analizados en campo y laboratorio han sido inestables, macro y microconstituyentes, así como una amplia variedad de trazas.

El estudio de la evolución de los procesos de interacción frente a la tendencia evolutiva teórica en una MODELACIÓN directa ha permitido determinar las variaciones reales con respecto a las teóricas. Para ello se han realizado tanteos con el código PHREEQC del USGS (Parkhurst y Appelo, 1999), para finalizar con un modelo acoplado realizado en COMSOL Multiphysics para distintos horizontes temporales.

A modo de complemento se ha incorporado una serie de directrices relacionadas con los estudios de IMPACTO AMBIENTAL. Criterios a tener en cuenta en la realización de EsIA (Estudios de Impacto ambiental) y EIA (Evaluación de Impacto Ambiental) para proyectos de regadío con aguas regeneradas.

El proyecto contempla, además de las publicaciones, llevar a cabo CAMPAÑAS DE DIFUSIÓN enfocadas a los usuarios finales, que permitan difundir la información alcanzada de manera más cercana.

## 1.5 ESTRUCTURA DE LA PUBLICACIÓN

La publicación expone de manera consecutiva las distintas líneas de acción desarrolladas en *les Illes Balears*, que han quedado distribuidas del siguiente modo:

APARTADO 1. EL REGADÍO CON AGUAS REGENERADAS EN *LES ILLES BALEARS*

APARTADO 2. CULTIVOS

APARTADO 3. SUELOS

APARTADO 4. BALSAS DE REGULACIÓN

APARTADO 5. ACUÍFEROS

APARTADO 6. ESTUDIOS DE IMPACTO AMBIENTAL

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES (INTEGRACIÓN)

ANEXO

## 1.6 BIBLIOGRAFÍA DEL APARTADO INTRODUCTORIO

- Adrover, M., Vadell, J. 2007. El reg amb aigües regenerades. Quaderns d'Investigació n. 8. Conselleria d'Agricultura i Pesca; Govern de *les Illes Balears*.
- Adrover, M., Farrús, E., Moyá, G., Vadell J. 2012. Chemical properties and biological activity in soils of Mallorca following twenty years of treated wastewater irrigation. *Journal of Environmental Management* 95: 188-192.
- Angelakis, A.N and Rose, J.B. 2014. *Evolution of Sanitation and Wastewater Technologies through the Centuries*, ed., 99-146, IWA Publishing, London, 2014.
- Angelakis, A.N., 2010. Wastewater Recycling and Reuse in EU Countries: With Emphasis the Necessity of Establishing EU Legislation. *In: 7<sup>th</sup> International Conf. ORBIT 2010, Workshop on Wastewater Reuse*. Iraklion, Greece, June 29-July 3, 2010. Book of Abstract, p. 229.
- AQUAREC. Salgot, M; Huertas, E. eds. 2006. Integrated concepts for reuse of upgraded wastewater. EVK1-CT-2002-00130 EU funded project. Work Package 2: Guideline for quality standards for water reuse in Europe. University of Barcelona.
- Asano, T. 1998. "Water Reclamation and Reuse". CRC Press LLC
- De Bustamante, I., Cabrera, M.C., Candela, L., Lillo, J. y Palacios, MP. 2010. La reutilización de aguas regeneradas en España: Ejemplos de aplicación en el marco del proyecto Consolider-Tragua. *Aqua-LAC - Vol. 2 - Nº 1 - Mar. 2010. pp. 1- 17*.
- Directiva 91/271/CEE sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas.
- FAO, 2013. Coping with Water Scarcity, An action framework for Agriculture and Food Security. *Water Reports Book 38*. ISBN-13: 978-9251073049. Rome.
- FAO, 2014. Informe Sobre Temas Hídricos. Reutilización del agua en la agricultura ¿Beneficios para todos? Nº 35. ISBN 978-92-5-306578-3. Roma.
- Global Water Intelligent, 2005. Reuse goes for global growth. Vol 6. Issue 6.
- Gómez, M.J., A. Agüera, M.J. Bueno, M.M. Gómez, S. Herrera, I. Muñoz, & A.R. Fernández-Alba. 2009. Caracterización química de las aguas residuales. Metodología analítica y resultados. 4ª Reunión Consolider Tragua, Alicante, 17-19 de junio de 2009.
- Illes Balears. Govern de les Illes Balears. Conselleria d'Agricultura, Medi Ambient i Territori. 2011. Plan Hidrológico de *les Illes Balears* 2015-2021. Memoria.
- Instituto Nacional de Estadística INE, 2016. Notas de Prensa. Encuesta sobre el uso del agua en el sector agrario. Año 2014. <http://www.ine.es/prensa/np993.pdf>
- IGME. 1980. Evaluación de los efectos del empleo de aguas residuales urbanas en el Llano de Palma. Sector de Sant Jordi. Informe interno.
- IRYDA. 1976. Zona regable del Pla de Sant Jordi (Balears). Utilización de aguas residuales con fines de riego. Informe interno.
- IRYDA. 1994. Caracterización de los suelos del Sector II de la zona regable del Pla de Sant Jordi (Mallorca). Informe interno.
- Junta D'Aigües de Balears. 1995. Seguimiento de la incidencia en el acuífero del regadío con aguas residuales depuradas en el Llano de Sant Jordi (Mallorca). Mayo 1994-Abril 1995. Informe interno.
- Junta D'Aigües de Balears. 1997. Seguimiento de la incidencia en el acuífero del regadío con aguas residuales depuradas en el Llano de Sant Jordi (Mallorca). Mayo 1996-Agosto 1997. Informe interno.
- MAGRAMA, 2010. Plan Nacional de Reutilización de Aguas. Versión Preliminar.
- Ministerio de Medio Ambiente. 2007. Real Decreto 1620/2007 por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. 2015. Encuesta sobre Superficies y Rendimientos Cultivos ESYRCE. Encuesta Marco Áreas de España.
- Observatorio de Sostenibilidad. 2016. ODS 6. Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos. AGUA.

- Ortega, E. e Iglesias, R. 2009. Reuse of treated municipal wastewater effluents in Spain: Regulations and most common technologies, including extensive treatments. *Desalination and Water Treatment*. 4 2009 148–160.
- Santarrufina, J.E., Durbán, F., Pérez, P., Ulloa, J.J. 1996 Análisis de la situación actual de suelos, producción vegetal y producción animal de la zona del Pla de Sant Jordi (Mallorca) regada con aguas residuales depuradas.
- Iglesias R., 2009. Water reuse in Spain: data overview and costs estimation of suitable treatment trains. INNOVA-MED Conference “Water Reclamation and Reuse 8 - 9 October 2009, Girona, España.
- Santarrufina, E. 2007. El regadío en *les Illes Balears*. Uso de agua depurada. *Investigaciones Geográficas*, nº 43 2007 pp. 85-96.
- World Health Organization. 2006. WHO guidelines for the safe use of wastewater excreta, and greywater. 3<sup>rd</sup> ed. Vol.2: Wastewater in agriculture. WHO, Geneva.
- World Health Organization. 1989. Health guidelines for the use of wastewater in agriculture and aquaculture. Technical Report Series 778, ISSN 0512-3054.

### 1.6.1 Accesos Web

- ADECAGUA, 2016. <http://www.adecagua.es/nt-1-124/Espana-reutiliza-300-hectometros-cubicos-de-agua-depurada-al-ano,-una-cuarta-parte-de-lo-previsto>
- CENTA, 2018. <http://www.centa.es>
- FAO, 2014. <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/didyouknow/indexesp3.stm>
- Salgot, M., 2016. <http://www.iagua.es/blogs/miquel-salgot/reflexiones-reutilizacion-agua>

## 2 CULTIVOS



***IMPORTANCIA DE LA UTILIZACIÓN DE NUEVOS RECURSOS  
HÍDRICOS EN LA AGRICULTURA***

## APARTADO 2. CULTIVOS

### 2.1 INTRODUCCIÓN

Actualmente, la agricultura representa el mayor consumidor de recursos hídricos en Europa y es un sector económico importante en muchos de sus países. El uso de las aguas regeneradas en la agricultura es un componente importante en las estrategias de conservación de los recursos hídricos, pero los efectos de las aguas regeneradas con diferentes composiciones y en diferentes tipos de suelo y cultivos deben ser estudiados para un manejo sostenible del riego con este tipo de agua. Todos estos factores, apoyan el interés científico de los mismos.

En este contexto, la reutilización de aguas depuradas constituye una práctica cada vez más extendida. Su aplicación ha sido objeto de regulación jurídica mediante la publicación del *Real Decreto 1620/2007*. En esta normativa se establece la necesidad de que el agua a reutilizar cumpla unas normas de calidad mínimas dependiente de su uso. Sin embargo, la sostenibilidad de esta práctica va a depender también de la afección que se produzca al medio (planta, suelo, acuífero). Todos estos años de gestión, normalización y práctica de la reutilización de aguas en España se han traducido en numerosas experiencias exitosas para cada uno de los diferentes usos contemplados y regulados por el R.D. 1620/2007.

Resultado de la amplia experiencia obtenida por los diferentes actores involucrados en la reutilización de agua en España, las tecnologías para la regeneración de aguas depuradas y las prácticas para el mantenimiento de su calidad en el transporte hasta su punto de uso se han desarrollado y perfeccionado de forma muy importante, con un considerable aumento del rendimiento y con una reducción de costes que permite a este recurso competir con otras alternativas. Todo ello se hace imposible sin la constante investigación, desarrollo e innovación de las empresas y Administraciones Públicas del sector del agua en España, que cuenta con instituciones de referencia. Por ello, es necesario que previo a cualquier proyecto de reutilización se incluya la realización de estudios específicos en la zona de aplicación, que permitan evaluar los impactos futuros.

### 2.2 INVESTIGACIÓN EN REUTILIZACIÓN AGRÍCOLA. ANTECEDENTES ESPECÍFICOS

El uso del agua regenerada en la agricultura ha demostrado ser un elemento importante en las estrategias para el uso sostenible de los recursos hídricos, sobre todo superficiales, debido a sus beneficios económicos y ambientales. Los estudios sobre los efectos de las aguas residuales tratadas reutilizadas fueron lanzados inicialmente en países con altas capacidades tecnológicas y un cierto nivel económico, tales como EE.UU (California, Florida, Arizona) e Israel.

Durante la década de los 70, se iniciaron estudios en áreas de bosques, campos de golf o cultivos forrajeros (Bole y Bell, 1978; Burton y Hook, 1979) con el objetivo de aumentar su biomasa. En la década de los 80, se comenzaron los estudios para ver los efectos en diferentes cultivos de la zona. Las aguas residuales tratadas para el riego de árboles frutales fue manejado con éxito en cultivos como el manzano (Nielsen et al., 1989a) o melocotonero (Basiouny, 1984); en algunos otros cultivos leñosos como vid (Nielsen et al., 1989b) o algodón (Feigin et al., 1984), y en algunos cereales como el maíz y la alfalfa (Campbell, 1983). Además, su uso se extendió a especies ornamentales (Hasek, 1986).

Los primeros estudios buscaron asegurar la seguridad microbiológica de los cultivos regados con estas aguas. En los años 1970 y 1980, se llevaron a cabo dos estudios en California para desarrollar un sistema de tratamiento de aguas residuales fiable para producir agua de riego y asegurar la producción de los cultivos agrícolas en consorcio con la protección de la salud pública: el *Estudio de Pomona Virus (Distritos Sanitarios del Condado de Los Ángeles, 1977)* y el *Estudio de Recuperación de Aguas Residuales de Monterrey para su uso agrícola (Engineering-Science, 1987)*. Ambos estudios demostraron la idoneidad de las aguas regeneradas para el riego de los cultivos comerciales de la zona. Algunos estudios más recientes volvieron a demostrar la inocuidad y la aptitud de las aguas regeneradas para el riego agrícola (York et al., 2008).

En cítricos, diversos estudios han mostrado las ventajas y desventajas del uso de las aguas regeneradas (Zekri y Koo, 1993; Zekri y Koo, 1994; Ramos, 1996; Aucejo y col., 1997; Morgan y col., 2008; Reboll et al., 2000; Pedrero y Alarcón, 2009; Lapeña et al., 2002; Pedrero, 2010; Maurer et al., 1995; Meli et al., 2002; Pereira et al., 2011). Algunos de los relacionados con la salinidad-nutrición fueron realizados con ratios iónicos poco realistas (Maas y Grattan, 1999), alejados de las relaciones de salinidad-nutrición de las aguas regeneradas. Solo unos pocos estudios sobre la respuesta de la salinidad al crecimiento de los cítricos, han sido realizados con sales distintas al NaCl. En la Región de Murcia, se han desarrollado estudios a largo plazo sobre el efecto del uso de agua regenerada salina en cítricos (mandarino y pomelo), demostrando que el riego con agua regenerada con esta composición salina “natural”, tiende a acumular sales dentro de la zona radicular, por lo tanto, el uso de estas aguas de riego puede producir problemas de salinidad y acumulación de B en planta y suelo a largo plazo (Mounzer et al., 2013; Pedrero et al., 2013; 2014; Nicolás et al. 2016). Aplicando un monitoreo cuidadoso para evitar la posible reducción de las propiedades agronómicas del suelo y unas buenas prácticas de gestión, la sostenibilidad del uso agua regenerada en la agricultura quedaría garantizada (Pedrero et al., 2015).

Uno de los mayores beneficios asociados al uso de las aguas regeneradas en la agricultura es el valor nutritivo de las mismas, con el consiguiente ahorro en fertilizantes minerales. Diversos estudios han corroborado este beneficio cuantificando dicho ahorro. En el mismo estudio anterior de mandarino y pomelo, el tratamiento de aguas regeneradas cubrió el 24% y el 15% de los requerimientos de  $N_2$  y  $P_2O_5$ , respectivamente, y todas las necesidades de  $K_2O$  (Pedrero et al. 2013).

También en Murcia, se realizaron estudios en cultivos hortícolas bajo condiciones de invernadero (tomate, pimiento y calabacín). De acuerdo con la aplicación de fertilizantes, la mayor concentración de nutrientes en el agua regenerada comparando con las aguas superficiales, representó un ahorro de  $N_2$ ,  $P_2O_5$ ,  $K_2O$  y  $CaO$  del 6, 5, 8 y el 40% respectivamente. Teniendo en cuenta los precios de mercado de los fertilizantes a lo largo de la experiencia, en términos económicos representó un ahorro de unos 160 €  $N\ ha^{-1}$ , 150 €  $P_2O_5\ ha^{-1}$ , 350 €  $K_2O\ ha^{-1}$ , y 450 €  $CaO\ ha^{-1}$ . Tras los análisis realizados, tanto en planta como en fruto, se concluyó que el uso de agua regenerada para el riego de cultivos de tomate, pimiento y calabacín en cultivo hidropónico, está recomendado bajo prácticas agrícolas convencionales (hidroponía, riego por goteo, invernaderos de polietileno, entre otros) y ofrece seguridad microbiológica (Pedrero et al., 2014).

En este contexto los problemas más graves del agua regenerada en la Región de Murcia son la salinidad y las elevadas concentraciones de boro. Cabe destacar que en esta experiencia el agua regenerada no representó peligro para el uso agrícola a corto plazo. Estos ahorros de fertilizantes son referidos por otros autores en estudios de agua regenerada en otros cultivos hortofrutícolas. Así, estudios en melón (*Cucumis melo* L. cv. Galia) en suelo arenoso bajo condiciones de invernadero, demostraron un ahorro de fertilizantes, reduciéndose la aplicación de N y K en un 40,8 y 17,8% respectivamente (Segura et al., 2001, Martínez et al. 2013).

Otro factor a tener en cuenta es la posible acumulación de elementos fitotóxicos en el cultivo, debido a la presencia de los mismos en la composición del agua regenerada. La concentración de metales pesados en las partes comestibles de dichos cultivos y su carga microbiológica (*E. coli* y otros coliformes fecales) de las aguas de riego constituyeron un factor de alto riesgo sanitario (Kalavrouziotis et al., 2008). Kalavrouziotis et al. (2005) llevaron a cabo experiencias en cebolla (*Allium cepa*) y lechuga (*Lactuca sativa*) en invernadero, cultivadas en suelo franco-arcilloso, y observaron acumulación de P en el suelo mientras que el Mn y Zn se acumularon principalmente en las raíces de la lechuga y en las semillas. En otro experimento en brócoli (*Brassica oleracea* var. Itálica) y coles de Bruselas (*Brassica oleracea* var. Gemnifera) bajo las mismas condiciones (invernadero, composición del agua regenerada y suelo franco-arcilloso), aumentó significativamente el contenido de P, Zn y Cd en el suelo.

La importancia de buscar el equilibrio entre un tratamiento que mantenga parte de los nutrientes para su posterior reutilización en la agricultura y que mantenga una desinfección del agua de riego apta para su reutilización, ha sido objeto de múltiples estudios. Por ejemplo, Manios et al. (2006) realizaron estudios en el cultivo de tomate en maceta (*Lycopersicon esculentum* mil Mountain Spring híbrido F1) y pepino (*Cucumis sativus* L) bajo condiciones de invernadero utilizando agua residual tratada en diferentes niveles (primaria, secundaria y terciaria clorada). El agua residual tratada primaria mostró el mayor desarrollo de la planta en ambos cultivos. No obstante, el uso de aguas residuales no regeneradas (tratamiento primario y secundario) en tales cultivos de invernadero no resultó ser completamente seguro.

Se han realizado varios estudios sobre tratamientos simplificados, excluyendo los procesos biológicos para la eliminación de materia orgánica y nitrógeno, para evaluar la recuperación de los elementos nutritivos de las aguas regeneradas y evitar el coste relacionado con la oxidación biológica y la producción de lodos. Estos prototipos han sido testados en campo para evaluar su efectividad en la producción de agua regenerada adecuada para ser reutilizada en la agricultura. En ensayos realizados en olivos, comparándolos con olivos regados con agua superficial, se obtuvieron incrementos de la producción del 50%, mejorando características comerciales del fruto muy importantes (López et al., 2006). A pesar de ello, no todo son ventajas, ya que esta reducción en el proceso de tratamiento biológico también puede acarrear problemas en el suelo, con una disminución de la porosidad y, consecuentemente, de la retención del agua en el suelo y de su conductividad hidráulica (Aiello et al., 2007).

Por último, tan importante como el tratamiento impuesto para regenerar las aguas, es y sigue siendo un desafío en los proyectos de reutilización en la agricultura el tener en cuenta las condiciones locales de cada sitio para la adaptación a la normativa y poder obtener cultivos seguros sin riesgos para la salud. De este modo, proyectos de reutilización agrícola considerados exitosos, han demostrado que es necesario un enfoque integrado de planificación que tenga en cuenta los aspectos tecnológicos de los sistemas de riego, así como los problemas de producción y contaminación. Para ello, diferentes tecnologías de tratamiento y también distintos métodos de riego deben ser considerados en la reutilización. El riego por goteo implica reducir dos unidades logarítmicas en los cultivos en los que existe contacto directo del agua con las partes comestibles (cultivos de porte bajo), y en cuatro unidades logarítmicas en aquellos sin contacto directo con las partes comestibles de la planta (cultivos de mayor porte) (OMS, 2006).

### **2.3 ESTUDIOS AGRONÓMICOS DE UTILIZACIÓN DE AGUAS REGENERADAS EN LA AGRICULTURA DE LES ILLES BALEARS**

En la actualidad hay pocos estudios que demuestren la influencia de la utilización de aguas regeneradas en regadío. La disposición de experiencias de campo es necesaria para concienciar a los agricultores y a grupos ecologistas de los beneficios que comporta su uso y despertar el interés general. Así mismo, para seguir realizando proyectos que eviten verter al mar un recurso tan importante como es el agua regenerada.

Estos estudios agronómicos pretenden aportar datos reales que demuestren que el agua que llega a los hidrantes de los agricultores, no sólo cumple la normativa exigida por el Plan Hidrológico de *les Illes Balears* y el Real Decreto 1620/2007, sino que, además, aporta efectos beneficiosos para los suelos y plantas, reutiliza un bien aprovechable (que de otra forma se vertería al mar) y posiblemente reduce la cantidad necesaria de abonado químico exigible para cada tipo de cultivo.

### 2.3.1 Parcelas acondicionadas para la I+D+i con aguas regeneradas

#### Zona de Inca

La superficie se reparte en una primera zona que se extiende a ambos márgenes de la carretera de Inca a Santa Margalida (PM-344), comenzando en los terrenos colindantes a la EDAR y extendiéndose hasta 2,5 kilómetros en dirección a Santa Margalida, y en una segunda zona comprendida entre esta carretera y la carretera PM-350, ramal de la PM-344 a Muro. La superficie agrícola es de 255 ha, y de ella más del 90% tiene opción a regar con agua EDAR (unas 236,5 ha).

Los sistemas de riego que se usan actualmente son el riego a manta, por aspersión y goteo (en el caso de frutales). La procedencia del agua que se usa es principalmente de la EDAR mediante dos formas: una pequeña red que reparte el agua a ciertas fincas pertenecientes a la comunidad de regantes; y del agua del Torrente de Son Seriol, al que vierte el agua sobrante de la depuradora, y del que extraen el agua para el riego.

#### PARCELA OLIVOS PICUAL (AGUA DE POZO Y REGENERADA)

En *Son Catiu* (Inca), se seleccionó una “parcela piloto” de la variedad Picual de 3 años de edad en 2011 (Figura 4), en la que se dispusieron 5 filas que se regaron con agua de pozo. Las tomas para las dos fuentes de agua se situaron en la misma parcela (análisis de aguas en el apartado 2.3.3).



Figura 4. Detalle de la parcela de olivos jóvenes de la variedad ‘Picual’ al inicio del ensayo (2011).

#### PARCELA HORTÍCOLAS (AGUA DE POZO Y REGENERADA)

Muy cerca de la parcela anterior de *Son Catiu* (Inca), se han realizado experiencias en una parcela piloto (“Can Frontera”) para la plantación de hortícolas como sandía (Figura 5). En esta parcela se dispusieron también dos fuentes de agua, regenerada y subterránea (procedente de un pozo en la misma parcela).



Figura 5. Imagen de la parcela de cultivo de sandía.

### **Zona de Santa María del Camí**

La superficie se reparte en una primera zona que se extiende a ambos márgenes de la carretera de Inca, comenzando en los terrenos colindantes a la depuradora. La superficie del área resultante es de aproximadamente 119 ha, con un número de fincas y de regantes de 92 y 57, respectivamente.

#### **PARCELA VID (AGUA DE POZO Y REGENERADA)**

Junto a la EDAR de *Santa María del Camí*, existe una finca de vides adultas para vinificación propiedad de la “Bodega Angel”, en la que seleccionamos la variedad Cabernet Sauvignon y la autóctona Prenal Blanc como “parcelas piloto”, donde se seleccionaron parcelas regadas con agua regenerada y agua de pozo.

### **Zona de María de la Salut-Ariany**

La zona agrícola se distribuye en el encuentro entre los términos municipales de María de la Salut, Sineu y *Ariany*, quedando limitada al este por la carretera de Petra a Santa Margalida (Ma-3340) y al sur por la carretera Ma-3301. Principalmente se trata de fincas muy parceladas, de pequeño tamaño. El sistema de riego se basa en la explotación de pozos particulares que impulsan el agua a pie de parcela y la reparten por gravedad. La superficie total es de 160 ha. Los cultivos existentes en la zona son mayoritariamente forrajeros, cereal, almendro, hortícolas y, testimonialmente, se encuentra alguna parcela de cítricos y frutales.

#### **PARCELA HORTÍCOLAS (AGUA DE POZO Y REGENERADA)**

En una zona dentro de las instalaciones de la EDAR, realizamos el diseño de una ‘parcela piloto’ de cultivos hortícolas de tomate, pimiento, melón y pepino que se abasteciera con las dos fuentes de agua: regenerada y de pozo (Figura 6). En 2012 se regó sin realizar ninguna práctica de abonado, y en 2013 se realizó una aplicación de

fertilizantes, ajustando las dosis necesarias para cubrir el programa de fertirriego óptimo para cada cultivo.



Figura 6. Imagen de la parcela piloto en Ariany.

A continuación se presenta un resumen de las parcelas experimentales comentadas (Figura 7):



Figura 7. Situación de todas las parcelas experimentales.

### 2.3.2 Metodología y protocolos a realizar en las parcelas piloto

A continuación se detallan los protocolos que se han realizado en las 'parcelas piloto' seleccionadas.

#### Diseño de protocolos de riego con aguas regeneradas.

Se emplearon dos fuentes de agua de riego, la primera procedente de agua de pozo, de buena calidad agronómica, y la segunda procedente de la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) de cada zona de estudio (*María de la Salut-Ariany*, Inca y

*Santa María del Camí*). Cada año de ensayo se establecieron un tratamiento de riego para cada calidad de agua, en el cual se pretendía regar satisfaciendo los requerimientos hídricos del cultivo (100% ETc), aunque dependió del acuerdo alcanzado con el propietario de la explotación. La programación del riego fue semanal a partir de los cálculos de evapotranspiración de referencia (ET0) por la ecuación de Penman-Monteith FAO 56. Los datos climáticos son registrados en estaciones agroclimáticas situadas cerca de las parcelas.

#### Análisis físico-químico y microbiológico de las distintas aguas utilizadas

Durante toda la duración del proyecto se analizó la calidad agronómica del efluente de aguas regeneradas procedentes de la EDAR. Para ello se realizaron medidas físico-químicas y microbiológicas periódicas en la entrada del agua regenerada a la parcela. Paralelamente se analizaron los niveles en macronutrientes (N-P-K) del efluente de agua regenerada, para conocer y ajustar en el caso de los cultivos hortícolas las necesidades de abonado de los cultivos.

Los parámetros de calidad a evaluar en el agua, así como la frecuencia en su muestreo, vienen definidos en el ya presentado *Real Decreto 1620/2007*, en el cual se hace referencia a que los parámetros objeto de estudio estarán determinados por el origen y usos previos del agua regenerada, así como del destino final de esta agua y su modo de empleo. En su Anexo I.A, reproducido como Tabla 4, se establecen los criterios de calidad para la reutilización de las aguas según sus usos. Para el establecimiento de los parámetros considerados como objeto de análisis, así como valores máximos admisibles (V.M.A) en el agua para su uso, se concentra la atención en los dos casos más restrictivos, cultivos hortícolas y frutales. Acudiendo al mismo *Real Decreto 1620/2007* obtendremos los V.M.A., estando el riego de hortícolas encuadrado en la categoría CALIDAD 2.1 y el de frutales en CALIDAD 2.3 del Real Decreto.

#### Efectos de las aguas regeneradas sobre el estado hídrico y producción de los cultivos

Durante toda la duración del proyecto se midieron periódicamente los parámetros de control de la situación hídrica de la planta (potencial hídrico de tallo) y los niveles de intercambio gaseoso a nivel foliar (fotosíntesis y conductancia estomática). Esto en los árboles centrales de cada repetición de los distintos tratamientos de riego y fuentes de agua utilizadas. Asimismo, se realizaron análisis foliares, y en cultivos hortícolas, se evaluó la producción total en las plantas seleccionadas sometidas a cada tratamiento.

Tabla 4: Valor máximo admisible fijado por el RD 1620/2007.

| USO DEL AGUA PREVISTO  | VALOR MÁXIMO ADMISIBLE (VMA) |                  |                       |                   | OTROS   |
|--|------------------------------|------------------|-----------------------|-------------------|---|
|  | NEMATODOS INTESTINALES       | E. COLI          | SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN | TURBIDEZ          |   |
| <b>USOS AGRÍCOLAS</b>  |                              |                  |                       |                   |   |
| <b>CALIDAD 2.1</b><br>a) Riego en cultivos con sistema de aplicación del agua que permita el contacto directo del agua regenerada con las partes comestibles para alimentación humana en fresco  | 1 huevo/10 L                 | 100 UFC/100 mL   | 20 mg/L               | 10 UNT            | Otros contaminantes contenidos en la autorización de vertido aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs.<br><i>Legionella spp.</i> : 1000 UFC/L:<br>(si existe riegos de aerosolización)   |
| <b>CALIDAD 2.2</b><br>a) Riego de productos para el consumo humano con sistemas de aplicación de agua que no evita el contacto directo del agua regenerada con las partes comestibles pero el consumo no es en fresco sino con un tratamiento industrial posterior.<br>b) Riego de pastos para consumo de animales productores de leche o carne.<br>c) Acuicultura.  | 10 huevo/10 L                | 1000 UFC/100 mL  | 35 mg/L               | No se fija límite | Otros contaminantes contenidos en la autorización de vertido aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs.<br><i>Taenia saginata</i> y <i>Taenia solium</i> : 1 huevo/L<br>(si se riegan pastos para consumo de animales productores de carne) |
| <b>CALIDAD 2.3</b><br>a) Riego localizado de cultivos leñosos que impida el contacto del agua regenerada con los frutos consumidos en la alimentación humana.<br>b) Riego de cultivo de flores ornamentales, viveros, invernaderos sin contacto directo del agua regenerada con las producciones,<br>c) Riego de cultivos industriales no alimentarios, viveros, forrajes ensilados y semillas oleaginosas | 10 huevo/10 L                | 10000 UFC/100 mL | 35 mg/L               | No se fija límite | Otros contaminantes contenidos en la autorización de vertido aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs.   |

Fuente: RD 1620/2007

### 2.3.3 Características físico-químicas de las agua de la EDAR en las distintas zonas

A continuación se indican las distintas zonas analizadas y la media de los valores obtenidos cada año para el período 2011-2015.

#### Zona de Inca

El valor medio de los diferentes años mostró niveles de pH y CE muy similares tanto en el agua de pozo como en el agua procedente de la EDAR. La turbidez de las aguas

regeneradas durante el período comprendido entre 2011 y 2013 superaron los límites marcados por el RD 1620/2007 para el caso del riego de cultivos con aplicación directa del agua regenerada sobre la parte comestible en fresco (10 UNT). Para el resto de cultivos y casos no se establece límite (Tabla 5).

En cuanto a los cationes, hay que destacar el alto contenido en potasio de las aguas regeneradas, los cuales están en torno a una media anual de 30 ppm (frente a unos 5 ppm de las aguas de pozo). Este hecho supone una aportación de potasio muy importante a los cultivos, la cual podría cubrir las necesidades de este elemento durante su ciclo de desarrollo, en función de la especie cultivada (Tabla 5).

Tabla 5: Media anual de los principales parámetros físico-químicos del agua regenerada (R) y de pozo (P) en la zona de Inca (2011-2015).

| PARÁMETROS                     | 2011  |       | 2012  |       | 2013  |       | 2014  |       | 2015  |       |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                | P     | R     | P     | R     | P     | R     | P     | R     | P     | R     |
| pH                             | 6,8   | 6,6   | 7,7   | 8,0   | 7,5   | 7,2   | 7,6   | 7,4   | 7,5   | 7,1   |
| Conductividad eléctrica (dS/m) | 1,4   | 1,3   | 1,2   | 1,4   | 1,2   | 1,5   | 1,3   | 1,5   | 1,3   | 1,5   |
| Turbidez (UNT)                 | 9,3   | 16,0  | 5,8   | 18,6  | 0,6   | 10,3  | 0,7   | 1,8   | 0,6   | 5,1   |
| Boro (ppm)                     | 0,2   | 0,2   | 0,1   | 0,3   | 0,1   | 0,3   | 0,1   | 0,2   | 0,1   | 0,2   |
| Sodio (ppm)                    | 183,4 | 179,7 | 84,2  | 204,8 | 177,0 | 184,9 | 80,1  | 185,0 | 71,0  | 166,8 |
| Calcio (ppm)                   | 85,1  | 60,2  | 123,4 | 56,6  | 119,6 | 71,8  | 114,2 | 53,6  | 128,5 | 59,2  |
| Magnesio (ppm)                 | 26,3  | 13,3  | 42,0  | 31,3  | 37,8  | 31,3  | 35,7  | 27,2  | 36,2  | 29,4  |
| Potasio (ppm)                  | 4,9   | 27,9  | 6,3   | 29,6  | 4,0   | 31,0  | 6,2   | 28,7  | 3,1   | 33,4  |
| Cloruros (ppm)                 | 280,5 | 280,0 | 122,6 | 260,3 | 212,0 | 304,6 | 138,1 | 273,5 | 112,4 | 256,8 |
| Sulfatos (ppm)                 | 170,4 | 177,0 | 113,9 | 168,9 | 165,0 | 173,8 | 566,9 | 650,0 | 98,8  | 132,1 |
| Nitratos (ppm)                 | 28,7  | <1,0  | 26,9  | <1,0  | 26,2  | 2,1   | 31,1  | <1,0  | 32,0  | 1,0   |
| Fosfatos (ppm)                 | <0,1  | 2,1   | <0,1  | 2,2   | <0,1  | 6,1   | <0,1  | 2,9   | <0,1  | 6,8   |

En cuanto al elemento calcio, hay que destacar que las aguas regeneradas presentaron menores niveles, por lo que estas aguas son menos duras que las procedentes de pozo. Así, los niveles de este elemento estuvieron en torno a 60 ppm frente al doble de concentración de las aguas de pozo. En este sentido, los niveles de Mg de las aguas regeneradas fueron algo más bajos que en las aguas de pozo.

En cuanto a los aniones, hay que destacar la elevada concentración de nitratos en el agua de pozo, con unos niveles en torno a 30 ppm frente a las bajas concentraciones presentes en las aguas regeneradas.

En cuanto a los fosfatos, hay que destacar que éstos estuvieron presentes en abundancia en el agua regenerada, con valores medios en los 5 años de unas 4 ppm, lo cual suponen un riesgo de eutrofización de las aguas una vez que éstas fueran embalsadas, aunque también un importante aporte nutricional para los cultivos.

### Zona de *Santa María del Camí*

El valor medio de los diferentes años mostró niveles de pH similares entre las dos fuentes de agua, excepto en 2015, en el que las aguas de pozo mostraron niveles de basicidad más elevada (8,1). En cuanto a la CE las aguas de pozo se movieron en niveles medios inferiores o iguales a 1 dS/m frente a los niveles más elevados de las aguas regeneradas (1,5-2 dS/m). La turbidez de las aguas regeneradas durante los dos primeros años (2011 y 2012) superaron los límites marcados por el RD 1620/2007 para el caso del riego de cultivos con aplicación directa del agua regenerada sobre la parte comestible en fresco (10 UNT). (Tabla 6).

Tabla 6: Media anual de los principales parámetros físico-químicos del agua regenerada (R) y de pozo (P) en la zona de *Santa María del Camí* (2011-2015).

| PARÁMETROS                     | 2011 |       | 2012 |       | 2013 |       | 2014  |       | 2015 |       |
|--------------------------------|------|-------|------|-------|------|-------|-------|-------|------|-------|
|                                | P    | R     | P    | R     | P    | R     | P     | R     | P    | R     |
| pH                             | NA   | 7,6   | 7,9  | 7,5   | 7,7  | 7,6   | 7,7   | 7,3   | 8,1  | 7,3   |
| Conductividad eléctrica (dS/m) | NA   | 2     | 0,7  | 1,3   | 0,8  | 1,5   | 1,0   | 1,7   | 0,8  | 1,6   |
| Turbidez (UNT)                 | NA   | 17    | 5,8  | 28,6  | 1,2  | 5,6   | 0,6   | 7,5   | 0,5  | 4,6   |
| Boro (ppm)                     | NA   | 0,28  | 0,1  | 0,2   | 0,1  | 0,2   | 0,1   | 0,2   | 0,1  | 0,3   |
| Sodio (ppm)                    | NA   | 142,2 | 50,1 | 138,4 | 54,1 | 168,6 | 48,6  | 175,1 | 44,6 | 175,0 |
| Calcio (ppm)                   | NA   | 88,3  | 75,1 | 102,2 | 80,9 | 95,8  | 73,0  | 85,9  | 76,1 | 67,1  |
| Magnesio (ppm)                 | NA   | 25,4  | 25,9 | 32,2  | 26,9 | 28,0  | 22,7  | 26,3  | 22,3 | 29,3  |
| Potasio (ppm)                  | NA   | 30,1  | 3,2  | 23,3  | 3,8  | 30,3  | 3,3   | 34,7  | 4,1  | 35,4  |
| Cloruros (ppm)                 | NA   | 179,2 | 75,2 | 180,3 | 82,6 | 212,9 | 85,2  | 235,6 | 68,6 | 269,5 |
| Sulfatos (ppm)                 | NA   | 61,6  | 30,3 | 147,8 | 27,4 | 108,5 | 659,5 | 422,3 | 29,3 | 86,7  |
| Nitratos (ppm)                 | NA   | 1,6   | 40,2 | 16,8  | 44,3 | 51,3  | 42,4  | <1,0  | 35,0 | 1,0   |
| Fosfatos (ppm)                 | NA   | 39,4  | <0,1 | 11,4  | <0,1 | 12,5  | <0,1  | 26,6  | <0,1 | 19,6  |

NA = datos no disponibles

En cuanto a los cationes, hay que destacar el alto contenido en potasio de las aguas regeneradas, los cuales están en niveles similares a los de Inca (30 ppm) frente a los de menos de 4 ppm de las aguas de pozo.

Al contrario de lo ocurrido en la zona de Inca, las aguas regeneradas presentaron mayores niveles de Ca, excepto en 2015, por lo que estas aguas son más duras que las procedentes de pozo. Los niveles de magnesio de las aguas regeneradas fueron bastante similares en ambas fuentes de agua.

En cuanto a los aniones, hay que destacar la elevada concentración de nitratos en el agua de pozo, con unos niveles en torno a 40 ppm frente a las bajas concentraciones registradas en las aguas regeneradas.

En cuanto a los fosfatos, hay que destacar que éstos estuvieron presentes en abundancia en las aguas regeneradas, con valores medios en los 5 años de más de

20 ppm, lo cual suponen un riesgo muy elevado de eutrofización de las aguas, pero un importante aporte nutricional para los cultivos. (Tabla 6).

### **Zona de *María de la Salut-Ariany***

El valor medio de los diferentes años mostró niveles de CE ligeramente superiores en el agua regenerada que en el agua de pozo, siendo los valores de pH significativamente altos en el agua regenerada, sobre todo en 2012 (9,0), frente a los del agua de pozo (7,4).

La turbidez de ambas fuentes de agua fue baja, excepto en 2012 en el que se superaron los límites marcados por el RD 1620/2007 para el caso del riego de cultivos con aplicación directa del agua regenerada sobre la parte comestible en fresco (10 UNT) en ambas fuentes de agua.

En cuanto a los cationes, hay que destacar que en esta zona se alcanzaron las mayores concentraciones en potasio en las aguas regeneradas, los cuales estuvieron cercanos a 40 ppm frente a los de aproximadamente 10 ppm de las aguas de pozo. (Tabla 7).

Como ocurre en las aguas regeneradas de Inca, éstas presentaron menores niveles de Ca que las aguas de pozo, alcanzándose niveles medios muy elevados de más de 130 ppm. Los niveles de magnesio de las aguas regeneradas fueron también más elevados que en las aguas de pozo.

En cuanto a los aniones, hay que destacar la mayor concentración de nitratos en el agua de pozo, con unos valores medios en torno a 25 ppm frente a las casi 9 ppm registradas en las aguas regeneradas. Por el contrario, los niveles de fosfatos sólo fueron significativos en las aguas regeneradas con valores medios en los 5 años de más de 7 ppm. (Tabla 7).

### **Zona de *Consell***

Los valores medios de pH y CE fueron similares en ambas fuentes de agua, siendo los niveles de turbidez algo más elevados en las aguas procedentes de la EDAR. Del resto de constituyentes, hay que destacar los mayores niveles de calcio del agua de pozo frente a la regenerada (de casi el doble), y los menores de potasio, aunque en esta zona el agua de pozo presenta unos niveles de potasio bastante elevados, llegando a alcanzar hasta casi 13 ppm. Por último, cabe resaltar los elevados niveles de fosfatos de las aguas regeneradas en 2015 (16,6 ppm), del mismo orden de magnitud a los encontrados en las aguas regeneradas de la zona de *Santa María del Camí*. Esto es indicativo de una fuente nutritiva importante para los cultivos, pero un riesgo de eutrofización elevado cuando estas aguas regeneradas sean embalsadas. (Tabla 8).

Tabla 7: Media anual de los principales parámetros físico-químicos del agua regenerada (R) y de pozo (P) en la zona de *Ariany-Maria de la Salut* (2011-2015).

| PARÁMETROS                            | 2011 |       | 2012  |       | 2013  |       | 2014  |       | 2015  |       |
|---------------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                       | P    | R     | P     | R     | P     | R     | P     | R     | P     | R     |
| <b>pH</b>                             | NA   | 8,2   | 7,4   | 9,0   | 7,6   | 7,9   | 7,2   | 7,8   | 7,4   | 7,6   |
| <b>Conductividad eléctrica (dS/m)</b> | NA   | 1,9   | 1,6   | 2,0   | 2,0   | 2,2   | 2,0   | 2,0   | 1,7   | 2,0   |
| <b>Turbidez (UNT)</b>                 | NA   | 2,4   | 11,8  | 13,2  | 1,5   | 2,7   | 0,8   | 1,6   | 1,1   | 2,8   |
| <b>Boro (ppm)</b>                     | NA   | 0,3   | 0,3   | 0,4   | 0,4   | 0,3   | 0,3   | 0,2   | 0,2   | 0,2   |
| <b>Sodio (ppm)</b>                    | NA   | 247,9 | 160,4 | 310,6 | 237,7 | 257,6 | 212,7 | 239,3 | 136,7 | 234,8 |
| <b>Calcio (ppm)</b>                   | NA   | 106,8 | 130,4 | 70,3  | 122,8 | 112,7 | 126,6 | 99,1  | 144,9 | 90,2  |
| <b>Magnesio (ppm)</b>                 | NA   | 29,7  | 56,0  | 41,5  | 49,3  | 34,7  | 45,5  | 30,2  | 34,6  | 31,5  |
| <b>Potasio (ppm)</b>                  | NA   | 35,5  | 9,8   | 44,6  | 12,1  | 42,2  | 12,8  | 37,2  | 6,3   | 35,7  |
| <b>Cloruros (ppm)</b>                 | NA   | 318,5 | 221,7 | 401,1 | 194,0 | 345,7 | 356,7 | 341,1 | 210,5 | 361,6 |
| <b>Sulfatos (ppm)</b>                 | NA   | 121,6 | 204,8 | 170,0 | 84,6  | 141,2 | 687,2 | 615,4 | 132,0 | 119,4 |
| <b>Nitratos (ppm)</b>                 | NA   | 8,8   | 46,1  | 8,0   | 18,2  | 17,3  | 17,6  | 4,6   | 15,0  | 5,0   |
| <b>Fosfatos (ppm)</b>                 | NA   | 4,6   | <0,1  | 1,9   | <0,1  | 8,8   | <0,1  | 13,6  | <0,1  | 8,0   |

NA = datos no disponibles

Tabla 8: Media anual de los principales parámetros físico-químicos del agua regenerada (R) y de pozo (P) en la zona de *Consell* (2014-2015).

| PARÁMETROS                            | 2014 |       | 2015  |       |
|---------------------------------------|------|-------|-------|-------|
|                                       | P    | R     | P     | R     |
| <b>pH</b>                             | NA   | 7,9   | 7,3   | 7,3   |
| <b>Conductividad eléctrica (dS/m)</b> | NA   | 1,3   | 1,5   | 1,5   |
| <b>Turbidez (UNT)</b>                 | NA   | 1,7   | 0,7   | 3,0   |
| <b>Boro (ppm)</b>                     | NA   | 0,1   | 0,2   | 0,2   |
| <b>Sodio (ppm)</b>                    | NA   | 137,2 | 96,7  | 141,9 |
| <b>Calcio (ppm)</b>                   | NA   | 82,4  | 146,1 | 85,2  |
| <b>Magnesio (ppm)</b>                 | NA   | 20,8  | 26,5  | 25,5  |
| <b>Potasio (ppm)</b>                  | NA   | 23,5  | 12,9  | 26,2  |
| <b>Cloruros (ppm)</b>                 | NA   | 190,8 | 148,8 | 218,4 |
| <b>Sulfatos (ppm)</b>                 | NA   | 670,1 | 173,9 | 85,08 |
| <b>Nitratos (ppm)</b>                 | NA   | <1,0  | 18,5  | 18,5  |
| <b>Fosfatos (ppm)</b>                 | NA   | 7,2   | <0,1  | 16,6  |

NA = datos no disponibles

## 2.4 INFLUENCIA DE LAS AGUAS REGENERADAS SOBRE EL ESTADO HÍDRICO Y NUTRICIONAL DE LOS CULTIVOS. EVALUACIÓN DE RENDIMIENTO EN CULTIVOS HORTÍCOLAS

Durante toda la duración del proyecto se han realizado ensayos en diferentes cultivos hortícolas y leñosos situados en parcelas comerciales (olivo en Inca y vid en *Santa Maria del Camí*) y en otras diseñadas para experimentación como parcelas 'piloto' (hortícolas en Inca y *Maria de la Salut-Ariany*), que se han detallado en el apartado precedente. A continuación se comentarán las acciones en cultivos leñosos y posteriormente en los hortícolas distribuidos en las distintas zonas.

### 2.4.1 Parcela olivos jóvenes de la variedad 'Picual' (agua de pozo y regenerada)

#### Evolución del estado hídrico y niveles de intercambio gaseoso del cultivo

##### Años 2012-2014

En cuanto a las medidas del estado hídrico de la planta, las plantas regadas con agua regenerada presentaron mejor estado hídrico en el primer y tercer año de medida (2012 y 2014), al presentar valores más altos de potencial hídrico de tallo ( $\psi_t$ ), los cuales oscilaron en valores medios entre -1,2 y -1,8 MPa de media frente a los -1,1 y -2,4 MPa de las plantas regadas con aguas de pozo, respectivamente (Tabla 9).

Por el contrario, los niveles de intercambio gaseoso únicamente mostraron diferencias significativas en el último año de medidas, tanto en el parámetro de fotosíntesis neta como en el de conductancia estomática, siendo las plantas regadas con aguas regeneradas los que presentaron mayores niveles, alcanzando incrementos del entorno del 35% frente a las regadas con aguas de pozo. Sin embargo, los valores de eficiencia en el uso del agua fueron similares en ambas calidades de agua en los tres años de experimentación (Tabla 9).

Tabla 9: Media anual de potencial hídrico de tallo ( $\psi_t$ , MPa), fotosíntesis neta ( $F_n$ ,  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), conductancia estomática ( $g_s$ ,  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) y eficiencia en el uso del agua (EUA,  $\mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ ) en hojas de olivo regados con agua de pozo (P) y agua regenerada (R).

| PARÁMETROS  | 2012    |         | 2013    |         | 2014    |         |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|   | P       | R       | P       | R       | P       | R       |
| $\psi_t$ (MPa)  | -2,3 a  | -1,8 b  | -1,1 a  | -1,2 a  | -2,4 a  | -1,6 b  |
| $F_n$ ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )                  | 6,3 a   | 6,5 a   | 15,7 a  | 16,7 a  | 15,9 a  | 21,5 b  |
| $g_s$ ( $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )                    | 39,6 a  | 41,9 a  | 129,5 a | 139,6 a | 121,1 a | 183,8 b |
| EUA ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ ) | 158,0 a | 154,1 a | 121,3 a | 119,3 a | 131,3 a | 116,7 a |

Nota: Los valores seguidos de letras diferentes dentro de las filas representan las diferencias significativas para cada año en el parámetro correspondiente de acuerdo al test de rango múltiple de Duncan ( $P=0,05$ ). Estos valores son la media de 18 medidas.

## Evolución del estado nutricional del cultivo

### Años 2012-2014

Hay que destacar que en los 3 años se alcanzaron niveles normales de casi todos los nutrientes foliares en las plantas de ambas fuentes de agua (pozo y regenerada), exceptuando el primer año en el que no se alcanzaron los niveles de suficiencia para el P foliar (0,1%), ni tampoco en el primer y tercer año para el K foliar, ya que sus niveles estuvieron por debajo del umbral crítico establecido en el 0,8%. En cuanto a los micronutrientes, el B siempre se encontró por debajo del umbral fijado de 20 ppm en las plantas de ambas fuentes de agua (Tabla 10).

Tabla 10: Media anual de las concentraciones foliares en macro- y micro-nutrientes en olivo regados con agua de pozo (P) y agua regenerada (R).

| PARÁMETROS             | 2012  |       | 2013  |       | 2014  |       |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                        | P     | R     | P     | R     | P     | R     |
| <b>Nitrógeno (%)</b>   | 1,71  | 1,69  | 1,95  | 2,14  | 2,09  | 2,00  |
| <b>Fósforo (%)</b>     | 0,06  | 0,07  | 0,13  | 0,12  | 0,10  | 0,10  |
| <b>Potasio (%)</b>     | 0,44  | 0,45  | 0,83  | 0,87  | 0,48  | 0,59  |
| <b>Calcio (%)</b>      | 1,47  | 2,01  | 1,69  | 1,71  | 1,89  | 2,06  |
| <b>Magnesio (%)</b>    | 0,16  | 0,17  | 0,18  | 0,17  | 0,15  | 0,15  |
| <b>Hierro (ppm)</b>    | 96,7  | 118,1 | 82,0  | 88,0  | 118,2 | 107,7 |
| <b>Cinc (ppm)</b>      | 21,9  | 26,6  | 24,5  | 24,8  | 18,6  | 23,2  |
| <b>Manganeso (ppm)</b> | 47,6  | 69,5  | 54,6  | 50,7  | 47,3  | 53,2  |
| <b>Cobre (ppm)</b>     | 112,2 | 190,1 | 165,5 | 146,2 | 128,6 | 120,1 |
| <b>Boro (ppm)</b>      | 14,3  | 18,2  | 18,4  | 17,7  | 15,4  | 15,2  |

Como aspecto diferencial entre ambas fuentes de agua, hay que destacar que los niveles de Ca foliar siempre fueron superiores en los olivos regados con agua regenerada, así como el K, de manera significativa en el último año muestreado, aspecto que se justifica por la mayor concentración de estos elementos en el agua regenerada. Respecto a los micronutrientes, hay que destacar que el Zn y Mn foliar es mayor en los olivos regados con agua regenerada.

### 2.4.2 Parcela vid (agua de pozo y regenerada)

#### Evolución del estado hídrico y niveles de intercambio gaseoso del cultivo

### Años 2012-2014

Se pudo ver un comportamiento diferencial en función de la variedad estudiada. Así, las vides de la variedad ‘Cabernet Sauvignon’ tuvieron un mejor estado hídrico cuando fueron regadas con agua regenerada que cuando fueron regadas con agua de pozo, y significativamente el último año de experimentación (Tabla 12). Por el contrario, las

vides de la variedad autóctona 'Prensal Blanc' presentaron un mejor estado hídrico cuando fueron regadas con agua de pozo, siendo significativa esta diferencia en el segundo año de ensayo (Tabla 11).

Tabla 11: Media anual de potencial hídrico de tallo ( $\psi_t$ , MPa), fotosíntesis neta ( $F_n$ ,  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), conductancia estomática ( $g_s$ ,  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) y eficiencia en el uso del agua (EUA,  $\mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ ) en hojas de vid de la variedad 'Prensal Blanc' regadas con agua de pozo (P) y agua regenerada (R).

| PARÁMETROS  | 2012    |         | 2013    |        | 2014    |         |
|---|---------|---------|---------|--------|---------|---------|
|   | P       | R       | P       | R      | P       | R       |
| $\psi_t$ (MPa)  | -1,2 a  | -1,0 b  | -1,1 a  | -1,4 b | -1,2 a  | -1,2 a  |
| $F_n$ ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )                  | 13,1 a  | 9,0 b   | 11,7 a  | 8,5 b  | 9,7 a   | 7,6 b   |
| $g_s$ ( $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )                    | 109,3 a | 73,5 b  | 123,2 a | 90,4 b | 81,5 a  | 64,0 b  |
| EUA ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ ) | 119,4 a | 122,5 a | 94,6 a  | 93,5 a | 118,4 a | 118,8 a |

NOTA: Los valores seguidos de letras diferentes dentro de las filas representan las diferencias significativas para cada año en el parámetro correspondiente de acuerdo al test de rango múltiple de Duncan ( $P=0.05$ ). Estos valores son la media de 18 medidas.

Del mismo modo, los niveles de intercambio gaseoso mostraron un patrón de comportamiento muy similar al estado hídrico. Así, las vides de la variedad 'Cabernet Sauvignon' tuvieron significativamente mayores tasas de intercambio gaseoso cuando fueron regadas con agua regenerada, alcanzando incrementos del 23,4% y del 47,7% en fotosíntesis y conductancia estomática, respectivamente, respecto a las regadas con aguas de pozo (Tabla 12). Por el contrario, las vides de la variedad 'Prensal Blanc' presentaron significativamente mayores tasas de intercambio gaseoso cuando fueron regadas con aguas de pozo, ya que las regadas con agua regenerada tuvieron descensos de estas tasas en el entorno del 26,5% en ambos parámetros (Tabla 11). Sin embargo, los valores de eficiencia en el uso del agua fueron similares estadísticamente en ambas calidades de agua y variedades de vid en los tres años de experimentación (Tablas 11 y 12).

Tabla 12: Media anual de potencial hídrico de tallo ( $\psi_t$ , MPa), fotosíntesis neta ( $F_n$ ,  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), conductancia estomática ( $g_s$ ,  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) y eficiencia en el uso del agua (EUA,  $\mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ ) en hojas de vid de la variedad 'Cabernet Sauvignon' regadas con agua de pozo (P) y agua regenerada (R).

| PARÁMETROS  | 2012    |         | 2013    |         | 2014    |         |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|   | P       | R       | P       | R       | P       | R       |
| $\psi_t$ (MPa)  | -1,0 a  | -1,1 a  | -1,2 a  | -1,1 a  | -1,2 a  | -1,1 b  |
| $F_n$ ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )                  | 10,9 a  | 12,4 b  | 9,9 a   | 13,2 b  | 8,7 a   | 10,7 b  |
| $g_s$ ( $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )                    | 95,4 a  | 111,4 b | 95,8 a  | 164,3 b | 70,8 a  | 109,7 b |
| EUA ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ ) | 113,7 a | 111,3 a | 103,4 a | 80,3 a  | 122,3 a | 97,1 a  |

NOTA: Los valores seguidos de letras diferentes dentro de las filas representan las diferencias significativas para cada año en el parámetro correspondiente de acuerdo al test de rango múltiple de Duncan ( $P=0,05$ ). Estos valores son la media de 18 medidas.

## Evolución del estado nutricional del cultivo

### Años 2012-2014

En los tres años de experimentación para ambas variedades de vid ('Prensal Blanc' y 'Cabernet Sauvignon') no se alcanzaron de media los niveles normales en P y K foliar en las vides regadas con ambas fuentes de agua (Tabla 13 y 14), ya que se situaron por debajo de sus umbrales de suficiencia, fijados en 0,2 y 1,2%, respectivamente, excepto en el segundo año en la variedad 'Cabernet Sauvignon' regada con agua de pozo, que alcanzó niveles foliares de K del 1,26% (Tabla 14). Además, el macronutriente Mg se situó, en ambas variedades de vid, por debajo del umbral de suficiencia fijado en el 0,3%, principalmente en el segundo año de experimentación. Los niveles de micronutrientes se situaron en valores dentro del rango de suficiencia en los tres años en ambas variedades, excepto en el caso relativo a los niveles foliares de Zn, que se situaron por debajo del umbral fijado de 25 ppm, principalmente en el primer y tercer año del ensayo (Tablas 13 y 14).

En cuanto a la influencia del tipo de agua en los constituyentes foliares, hay que decir que la tendencia general en ambas variedades fue la de mostrar mayores niveles foliares de nitrógeno, calcio, magnesio y micronutrientes en las plantas regadas con agua regenerada y menores en fósforo y potasio.

Tabla 13: Media anual de las concentraciones foliares en macro- y micro-nutrientes en vides de la variedad 'Prensal Blanc' con agua de pozo (P) y agua regenerada (R).

| PARÁMETROS             | 2012  |       | 2013  |       | 2014  |       |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                        | P     | R     | P     | R     | P     | R     |
| <b>Nitrógeno (%)</b>   | 2,47  | 2,07  | 2,24  | 2,34  | 2,15  | 2,25  |
| <b>Fósforo (%)</b>     | 0,11  | 0,10  | 0,14  | 0,13  | 0,11  | 0,10  |
| <b>Potasio (%)</b>     | 0,58  | 0,55  | 0,93  | 1,01  | 0,77  | 0,65  |
| <b>Calcio (%)</b>      | 1,93  | 2,04  | 2,54  | 2,61  | 2,78  | 2,77  |
| <b>Magnesio (%)</b>    | 0,30  | 0,31  | 0,24  | 0,29  | 0,29  | 0,33  |
| <b>Hierro (ppm)</b>    | 227,2 | 240,6 | 228,7 | 289,1 | 187,1 | 245,4 |
| <b>Cinc (ppm)</b>      | 12,8  | 13,0  | 32,4  | 23,4  | 21,6  | 22,6  |
| <b>Manganeso (ppm)</b> | 121,3 | 106,1 | 248,5 | 200,1 | 117,0 | 133,9 |
| <b>Boro (ppm)</b>      | 61,8  | 69,8  | 62,3  | 53,7  | 48,9  | 48,9  |

Tabla 14: Media anual de las concentraciones foliares en macro- y micro-nutrientes en vides de la variedad 'Cabernet Sauvignon' con agua de pozo (P) y agua regenerada (R).

| PARÁMETROS             | 2012  |       | 2013  |       | 2014  |       |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                        | P     | R     | P     | R     | P     | R     |
| <b>Nitrógeno (%)</b>   | 2,28  | 2,46  | 2,35  | 2,46  | 2,35  | 2,30  |
| <b>Fósforo (%)</b>     | 0,11  | 0,10  | 0,19  | 0,13  | 0,13  | 0,11  |
| <b>Potasio (%)</b>     | 0,85  | 0,36  | 1,26  | 0,86  | 0,97  | 0,91  |
| <b>Calcio (%)</b>      | 1,67  | 2,39  | 2,45  | 2,74  | 2,63  | 2,39  |
| <b>Magnesio (%)</b>    | 0,30  | 0,35  | 0,25  | 0,25  | 0,33  | 0,29  |
| <b>Hierro (ppm)</b>    | 235,3 | 228,7 | 237,3 | 255,0 | 217,9 | 203,2 |
| <b>Cinc (ppm)</b>      | 18,5  | 14,5  | 29,7  | 51,5  | 15,3  | 16,8  |
| <b>Manganeso (ppm)</b> | 128,0 | 169,3 | 239,4 | 263,8 | 141,0 | 162,6 |
| <b>Boro (ppm)</b>      | 47,4  | 41,3  | 46,8  | 39,8  | 40,9  | 39,4  |

### 2.4.3 Parcela hortícolas (agua de pozo y regenerada)

#### Evolución del estado hídrico y niveles de intercambio gaseoso del cultivo

Los niveles de intercambio gaseoso en las plantas de sandía regadas con agua regenerada presentaron un incremento significativo de los niveles de  $F_n$  y  $g_s$  a los 60 días después de la plantación (DDP), indicando un mejor comportamiento fisiológico en las plantas regadas con este tipo de agua (Tabla 15). Hay que indicar que al comienzo de las medidas (finales de julio), los niveles de  $F_n$  fueron ligeramente inferiores en las plantas regadas con agua regenerada, aunque no de manera significativa.

Tabla 15: Niveles de fotosíntesis neta ( $F_n$ ,  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), conductancia estomática ( $g_s$ ,  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) y eficiencia en el uso del agua (EUA,  $\mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ ) en hojas de sandía regadas con agua de pozo (P) y agua regenerada (R) 30 y 60 días después de la plantación (DDP).

| Fecha  | Tratamiento | $F_n$  | $g_s$   | EUA    |
|--------|-------------|--------|---------|--------|
| 30 DDP | P           | 36,7 a | 553,7 a | 66,3 a |
|        | R           | 33,3 a | 559,0 a | 59,7 a |
| 60 DDP | P           | 13,2 a | 210,8 a | 62,4 a |
|        | R           | 16,0 b | 305,7 b | 52,4 a |

Nota: Los valores seguidos de letras diferentes dentro de las columnas representan las diferencias significativas de acuerdo al test de rango múltiple de Duncan ( $P=0,05$ ). Estos valores son la media de diez medidas.

## Evolución del estado nutricional del cultivo

A los 30 DDP, los niveles de los macroelementos N, P, K se situaron por debajo de sus umbrales de suficiencia, fijados en 4,5%, 0,3% y 4%, respectivamente. Sin embargo, los niveles de Ca excedieron su rango normal, y tanto el Mg como el resto de microelementos estuvieron dentro del rango foliar de suficiencia (Tabla 16). Hay que destacar que los niveles de N y Ca foliar no siguieron el patrón de su concentración en el agua de riego a los 30 DDP. De forma general, el contenido foliar de bioelementos fue superior en las plantas regadas con agua regenerada, a excepción del K y del Mn, los cuales mostraron niveles foliares ligeramente inferiores en este tipo de agua.

Tabla 16: Análisis de elementos foliares en sandía regadas con agua de pozo (P) y regenerada (R) en la zona de Inca a los 30 y 60 días después de la plantación (DDP).

| PARÁMETROS             | 30 DDP |       | 60 DDP |       |
|------------------------|--------|-------|--------|-------|
|                        | P      | R     | P      | R     |
| <b>Nitrógeno (%)</b>   | 3,30   | 3,90  | 1,85   | 2,74  |
| <b>Fósforo (%)</b>     | 0,17   | 0,20  | 0,11   | 0,16  |
| <b>Potasio (%)</b>     | 1,7    | 1,6   | 0,7    | 1,2   |
| <b>Calcio (%)</b>      | 4,8    | 5,68  | 6,7    | 5,8   |
| <b>Magnesio (%)</b>    | 0,83   | 0,89  | 0,91   | 0,59  |
| <b>Hierro (ppm)</b>    | 100,9  | 126,8 | 392,5  | 349,9 |
| <b>Cinc (ppm)</b>      | 31,3   | 35,5  | 13,2   | 14,9  |
| <b>Manganeso (ppm)</b> | 90,6   | 81,4  | 109,7  | 81,9  |
| <b>Cobre (ppm)</b>     | 6,5    | 9,8   | 7,6    | 8,3   |
| <b>Boro (ppm)</b>      | 39,5   | 40,7  | 73,9   | 45,3  |

A los 60 DDP los niveles de los macroelementos N, P, K continuaron por debajo de sus umbrales de suficiencia, al igual que el caso del microelemento Zn (umbral mínimo de 20 ppm). De forma general, el contenido foliar de los principales elementos fue superior en las plantas regadas con agua regenerada (N, P, K, Zn y Cu), y menor para el caso de los elementos Ca, Mg, y los microelementos Fe, Mn y B en las plantas regadas con aguas regeneradas. Los principales elementos, N, P, K, Ca y Mg siguieron su patrón de concentración en el agua de riego, excepto nuevamente para el N foliar, cuyo contenido, a pesar de ser menor en el agua regenerada fue, por el contrario, mayor a nivel foliar en las plantas regadas con esta fuente de agua.

## Rendimiento del cultivo

La producción de este cultivo regado con agua regenerada se incrementó de manera importante, situándose en un 12% más con respecto al cultivo regado con agua de pozo. Las causas de este incremento pueden explicarse por la mayor actividad fisiológica de las plantas regadas con esta fuente de agua, sobre todo al final del ensayo (60 DDP), aspecto también favorecido por la menor alcalinidad de estas aguas

al principio del ensayo con respecto al agua regenerada procedente de *Maria de la Salut-Ariany* (Figura 8).

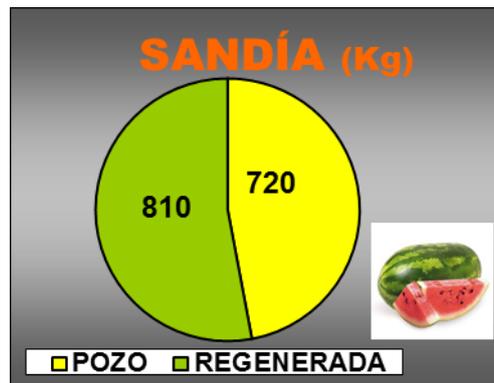


Figura 8. Producción del cultivo de sandía regado con ambas fuentes de agua (n= 200 plantas).

#### 2.4.4 Parcela hortícolas (agua de pozo y regenerada)

En la zona de *Maria de la Salut-Ariany* se llevó a cabo un primer ensayo en 2012, en el que se aplicaron las dos fuentes de agua (pozo y regenerada) en los cultivos de tomate, pimiento, pepino y melón sin que existiera un tratamiento adicional con aporte de unidades fertilizantes en ambas fuentes de agua hasta cubrir sus necesidades nutricionales. Se evaluaron los rendimientos de los cultivos, así como el comportamiento fisiológico y los constituyentes foliares de los cultivos durante distintos momentos de su ciclo de cultivo.

##### Pimiento

##### EVOLUCIÓN DEL ESTADO HÍDRICO

Las plantas de pimiento regadas con aguas regeneradas presentaron un mejor estado hídrico a partir de finales de julio, con valores medios de potencial hídrico de tallo ( $\psi_t$ ) significativamente superiores en unos 0,2 MPa con respecto al tratamiento regado con agua de pozo (Tabla 17).

Tabla 17: Valores de potencial hídrico de tallo ( $\psi_t$ , MPa) en hojas de plantas de pimiento regadas con agua de pozo (P) y agua regenerada (R) a los 30, 45 y 80 días después de la plantación (DDP).

| Fecha  | P           | R           |
|--------|-------------|-------------|
| 30 DDP | -0,38±0,11a | -0,40±0,06a |
| 45 DDP | -0,58±0,03a | -0,40±0,11b |
| 80 DDP | -1,01±0,06a | -0,84±0,11b |

Los valores de  $\psi_t$  seguidos de letras diferentes dentro de las columnas representan las diferencias significativas de acuerdo al test de rango múltiple de Duncan ( $P=0,05$ ). Estos valores son la media de seis medidas.

## NIVELES DE INTERCAMBIO GASEOSO

Tal y como ha sido mostrado en el apartado anterior, la mejor situación hídrica de las plantas de pimiento regadas con agua regenerada va ligada a unos menores niveles de transpiración de estas plantas, ya que tanto a los 30 como a los 80 DDP, los niveles de conductancia estomática ( $g_s$ ) fueron inferiores significativamente en las plantas de este tratamiento de calidad del agua. Hay que resaltar que a los 80 DDP, los niveles de fotosíntesis neta ( $F_n$ ) también descendieron significativamente, lo que indicaría un peor comportamiento fisiológico de estas plantas regadas con agua regenerada. Por último, los niveles de eficiencia en el uso del agua ( $EUA = F_n/g_s$ ) fueron algo superiores en el tratamiento regado con agua regenerada, aunque este hecho sólo fue significativo a los 30 DDP (Tabla 18).

Tabla 18: Niveles de fotosíntesis neta ( $F_n$ ,  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), conductancia estomática ( $g_s$ ,  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) y eficiencia en el uso del agua ( $EUA$ ,  $\mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ ) en hojas de pimiento regados con agua de pozo (P) y agua regenerada (R) a los 30, 45 y 80 días después de la plantación (DDP).

| Fecha  | Tratamiento | $F_n$  | $g_s$   | EUA     |
|--------|-------------|--------|---------|---------|
| 30 DDP | P           | 28,4 a | 390,6 a | 72,6 a  |
|        | R           | 25,1 a | 289,9 b | 86,6 b  |
| 45 DDP | P           | 17,7 a | 151,0 a | 117,0 a |
|        | R           | 17,1 a | 152,8 a | 112,0 a |
| 80 DDP | P           | 22,6 a | 248,5 a | 91,2 a  |
|        | R           | 17,7 b | 186,2 b | 95,3 a  |

Nota: Los valores seguidos de letras diferentes dentro de las columnas representan las diferencias significativas de acuerdo al test de rango múltiple de Duncan ( $P=0,05$ ). Estos valores son la media de diez medidas.

## ANÁLISIS DEL ESTADO NUTRICIONAL

A los 15 DDP, los niveles de N foliar en plantas de pimiento regadas con aguas regeneradas presentaron mayores niveles a pesar de que estas aguas contienen menores niveles de nitratos con respecto a las aguas de pozo (Tabla 19). Los niveles foliares de P fueron superiores en las plantas regadas con agua de pozo, siendo estos niveles inferiores al 0,3% que indican deficiencia en este elemento. En nuestro caso, los niveles se encuentran en 0,23%, lo que indican una deficiencia de P foliar que pudiera ser, en este momento de su desarrollo, un posible indicador de una menor floración cuando son regadas con aguas regeneradas. En cuanto al potasio (K) foliar, las plantas regadas con aguas regeneradas presentaron un mayor contenido foliar de este elemento, como lo justifica las altas concentraciones del mismo presentes en el agua regenerada, alcanzando el umbral de suficiencia en este tipo de agua (> 2,9 %).

Los niveles de calcio y magnesio se encuentran en el rango normal de concentración. Los niveles de micronutrientes indicaron niveles de deficiencia para el hierro (Fe) y cinc (Zn). Así, los niveles de Fe foliar se consideran deficientes por debajo de 200 ppm, y los valores en ambos tipos de agua oscilaron alrededor de la mitad (100 ppm). También, en el caso del Zn, los pimientos regados con agua regenerada presentaron una pequeña deficiencia en este elemento (33,7 ppm), ya que los niveles son inferiores a su umbral de suficiencia (40 ppm).

Tabla 19: Análisis de elementos foliares en plantas de pimiento regados con agua de pozo (P) y agua regenerada (R) durante 2012 a los 15, 30, 45 y 80 días después de la plantación (DDP).

| PARÁMETROS             | 15 DDP |       | 30 DDP |       | 45 DDP |       | 80 DDP |        |
|------------------------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|--------|
|                        | P      | R     | P      | R     | P      | R     | P      | R      |
| <b>Nitrógeno (%)</b>   | 2,52   | 3,31  | 3,21   | 4,06  | 3,74   | 4,3   | 3,52   | 3,47   |
| <b>Fósforo (%)</b>     | 0,33   | 0,23  | 0,39   | 0,18  | 0,33   | 0,25  | 0,33   | 0,30   |
| <b>Potasio (%)</b>     | 3,55   | 3,85  | 3,76   | 3,21  | 4,9    | 4,47  | 3,77   | 4,01   |
| <b>Calcio (%)</b>      | 2,35   | 2,93  | 2,21   | 1,85  | 3,64   | 2,99  | 2,47   | 2,96   |
| <b>Magnesio (%)</b>    | 0,62   | 0,73  | 0,57   | 0,52  | 0,8    | 0,72  | 0,53   | 0,56   |
| <b>Hierro (ppm)</b>    | 102,4  | 105,7 | 120,9  | 86,9  | 144,7  | 112,3 | 182,33 | 217,02 |
| <b>Cinc (ppm)</b>      | 72,5   | 33,7  | 56     | 38,1  | 58,9   | 57,9  | 58,64  | 56,23  |
| <b>Manganeso (ppm)</b> | 105,5  | 151,9 | 91,6   | 100,6 | 134,6  | 141,9 | 114,45 | 134,3  |
| <b>Cobre (ppm)</b>     | 21,9   | 15,8  | 21,3   | 13,9  | 47,2   | 36,1  | 28,49  | 29,41  |
| <b>Boro (ppm)</b>      | 47,3   | 56,2  | 43,3   | 35,6  | 64,5   | 60,5  | 64,67  | 66,61  |

A los 30 y 45 DDP (Tabla 19), los niveles de N foliar fueron similares, siendo las plantas regadas con agua regenerada las que tuvieron un mayor contenido en N, que puede considerarse en el rango alto, ya que supera el 4%. Los niveles de P fueron también similares en estos momentos destacando los menores niveles de P foliar en las plantas regadas con agua regenerada, a pesar de que ésta presenta un mayor contenido de P, situándose en este caso siempre por debajo del nivel de suficiencia, fijado en el 0,3%.

En cuanto al potasio foliar, las plantas regadas con agua de pozo tuvieron un mayor contenido foliar de K, a pesar del menor contenido de este elemento en el agua, siendo los niveles foliares más elevados a los 45 DDP, dentro del rango considerado alto (>4,5%). El contenido foliar de Ca y Mg se situó en el rango normal (30 DDP) o elevado (45 DDP) siendo superior en las plantas regadas con agua de pozo en ambos momentos muestreados. Los niveles de micronutrientes se situaron en valores dentro del rango de suficiencia siendo mayor el contenido foliar en las plantas regadas con agua de pozo respecto a las que fueron regadas con agua regenerada.

A los 80 DDP (Tabla 19), los niveles de N, P, K difirieron muy poco entre tipos de agua. Respecto al Ca y Mg, se hallaron en el rango normal a elevado siendo los niveles foliares superiores en las plantas de pimiento regadas con agua regenerada.

Los niveles de micronutrientes se situaron en valores dentro del rango de suficiencia, y fueron mayores en las plantas regadas con agua regenerada, excepto para el caso del cinc.

## PRODUCCIÓN DEL CULTIVO

La producción en el cultivo del pimiento regado con agua regenerada experimentó la mayor bajada de todos los cultivos, y se situó cerca de un 20% respecto al cultivo regado con agua de pozo. Aunque las plantas de esta especie tuvieron un mejor estado hídrico cuando fueron regadas con aguas regeneradas, los menores y significativos niveles de fotosíntesis neta (al final del ensayo) y de conductancia estomática (al inicio y final del ensayo) indican una menor actividad fisiológica de esta especie favorecido por los elevados valores de pH del agua regenerada (9,0), que bloquean la asimilación de elementos por la planta, causantes de la reducción de producción final en esta especie. Además, hay que recordar los niveles registrados de P foliar en las plantas de pimiento regadas con agua regenerada a comienzos del ciclo de cultivo (junio), los cuales estuvieron por debajo de su umbral de suficiencia, pudiendo afectar a la floración de estas plantas regadas con esta fuente de agua, y por tanto, a su rendimiento (Figura 9).

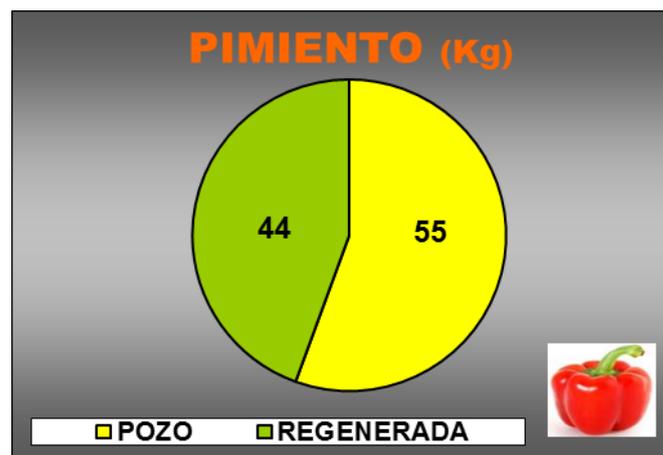


Figura 9. Producción del cultivo de pimiento regado con ambas fuentes de agua (n= 40 plantas).

## Tomate

### EVOLUCIÓN DEL ESTADO HÍDRICO

Las plantas de tomate regadas con aguas regeneradas presentaron un mejor estado hídrico, aunque estas diferencias aparecieron desde el inicio de las medidas (principios de julio), con valores medios de potencial hídrico de tallo ( $\psi_t$ ) significativamente superiores en unos 0,2 MPa con respecto al tratamiento regado con agua de pozo (Tabla 20).

Tabla 20: Valores de potencial hídrico de tallo ( $\psi_t$ , MPa) en hojas de plantas de tomate regadas con agua de pozo (P) y agua regenerada (R) a los 30 y 45 días después de la plantación (DDP).

| Fecha  | P           | R           |
|--------|-------------|-------------|
| 30 DDP | -0,65±0,02a | -0,48±0,12b |
| 45 DDP | -0,66±0,06a | -0,44±0,08b |

Nota: Los valores de  $\psi_t$  seguidos de letras diferentes dentro de las columnas representan las diferencias significativas de acuerdo al test de rango múltiple de Duncan ( $P=0,05$ ). Estos valores son la media de seis medidas.

## NIVELES DE INTERCAMBIO GASEOSO

El mejor estado hídrico de las plantas de tomate regadas con agua regenerada se vio muy poco reflejado en los niveles de intercambio gaseoso, ya que no existieron diferencias significativas en los diferentes parámetros del mismo, exceptuando los niveles de fotosíntesis neta ( $F_n$ ), que se incrementaron significativamente a los 45 DDP (Tabla 21). Este hecho puede indicar una mejor adaptación de estas plantas al riego con agua regenerada, una vez que el cultivo se encuentre en una fase de crecimiento más avanzada.

Tabla 21: Niveles de fotosíntesis neta ( $F_n$ ,  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), conductancia estomática ( $g_s$ ,  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) y eficiencia en el uso del agua (EUA,  $\mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ ) en hojas de tomate regados con agua de pozo (P) y agua regenerada (R) a los 30 y 45 días después de la plantación (DDP).

| Fecha  | Tratamiento | $F_n$  | $g_s$   | EUA    |
|--------|-------------|--------|---------|--------|
| 30 DDP | P           | 25,3 a | 333,9 a | 75,7 a |
|        | R           | 26,5 a | 363,0 a | 73,1 a |
| 45 DDP | P           | 15,9 a | 183,2 a | 86,9 a |
|        | R           | 20,3 b | 216,9 a | 93,6 a |

Nota: Los valores seguidos de letras diferentes dentro de las columnas representan las diferencias significativas de acuerdo al test de rango múltiple de Duncan ( $P=0,05$ ). Estos valores son la media de diez medidas.

## ANÁLISIS DEL ESTADO NUTRICIONAL

A los 15 DDP (Tabla 22), los niveles de N foliar en plantas regadas con aguas regeneradas presentaron mayores niveles a pesar de que estas aguas contienen menores concentraciones de nitratos con respecto a las aguas de pozo. Los niveles foliares de P fueron inferiores en las plantas regadas con agua de pozo, no alcanzando el umbral de suficiencia ya que están algo por debajo del 0,25%, que marca el límite de suficiencia para este elemento en tomate. En cuanto al potasio foliar, las plantas regadas con aguas regeneradas presentaron un mayor contenido

foliar de este elemento, como lo justifica las altas concentraciones del mismo presentes en el agua regenerada, alcanzando el umbral de suficiencia en este tipo de agua (> 2,9 %). Los niveles de calcio y magnesio se encuentran en el rango normal de concentración aunque hay que destacar los bajos niveles de Ca foliar, los cuales podría favorecer la aparición de “Blossom-End Rot”. Los niveles de micronutrientes indicaron niveles de suficiencia para todos ellos, excepto para el Cu foliar, cuyos niveles se situaron por debajo del umbral de suficiencia marcado en 50 ppm.

Los niveles foliares de nitrógeno mostraron un cambio de tendencia a los 45 DDP (Tabla 22), ya que el agua regenerada, que a los 30 DDP mostraba menores niveles de N foliar, incrementó de manera significativa su contenido hasta aproximarse al nivel de suficiencia en esta especie, establecido en el 4% (3,90 %). Sin embargo, el tratamiento regado con agua de pozo, a pesar de contener ésta un mayor contenido en nitratos, mostró a los 45 DDP una bajada significativa de su contenido en N foliar, muy por debajo del nivel de suficiencia del 4% (hasta el 3,1%). Los niveles de P fueron también similares tanto a los 30 DDP como a los 45 DDP destacando los mayores niveles encontrados en las plantas regadas con agua regenerada, si bien se situaron por debajo del nivel de suficiencia del 0,25%. En cuanto al potasio foliar, las plantas regadas con agua regenerada presentaron, en ambos momentos, mayor contenido foliar de K, el cual no llegó a alcanzar el nivel de suficiencia, fijado en el 2,9%. El contenido foliar de Ca y Mg se situó en el rango normal (30 DDP) o elevado (45 DDP) siendo superior en las plantas regadas con agua de pozo en ambos momentos muestreados. Los niveles de micronutrientes, en general, se situaron en valores dentro del rango de suficiencia, excepto, en un único caso, el relativo a los niveles de Cu en tomate regados con ambas fuentes de agua, que se encontraron por debajo del umbral fijado en 50 ppm. De forma general, subrayar que se presentaron un mayor contenido foliar en micronutrientes (Fe, Zn, Mn y Cu) en las plantas regadas con agua de pozo respecto a las que fueron regadas con agua regenerada.

A los 80 DDP (Tabla 22), el nivel de senescencia de las plantas de tomate era importante. Así, los niveles de N, P, K difirieron muy poco entre tipos de agua. Respecto al Ca y Mg, se mueven en el rango normal a elevado siendo los niveles foliares superiores en las plantas de tomate regadas con agua regenerada. Los niveles de micronutrientes se situaron en valores dentro del rango de suficiencia, y fueron mayores en las plantas regadas con agua de pozo, excepto para el caso del manganeso y el boro.

Tabla 22: Análisis de elementos foliares en plantas de tomate regados con agua de pozo (P) y agua regenerada (R) a los 15, 30, 45 y 80 días después de la plantación (DDP).

| PARÁMETROS             | 15 DDP |       | 30 DDP |       | 45 DDP |       | 80 DDP |       |
|------------------------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
|                        | P      | R     | P      | R     | P      | R     | P      | R     |
| <b>Nitrógeno (%)</b>   | 3,23   | 4,7   | 3,68   | 3,16  | 3,1    | 3,9   | 5,4    | 5,2   |
| <b>Fósforo (%)</b>     | 0,23   | 0,39  | 0,16   | 0,18  | 0,15   | 0,18  | 0,38   | 0,36  |
| <b>Potasio (%)</b>     | 1,67   | 2,94  | 1,62   | 1,83  | 1,53   | 2,07  | 2,76   | 2,75  |
| <b>Calcio (%)</b>      | 5,81   | 3,01  | 2,88   | 2,52  | 4,58   | 4     | 2,04   | 2,37  |
| <b>Magnesio (%)</b>    | 0,64   | 0,4   | 0,37   | 0,37  | 0,61   | 0,46  | 0,35   | 0,37  |
| <b>Hierro (ppm)</b>    | 258,2  | 205,2 | 131,6  | 122,7 | 176    | 152,5 | 182,7  | 133,5 |
| <b>Cinc (ppm)</b>      | 22,9   | 39,6  | 21,0   | 26,4  | 24,8   | 23,2  | 48,32  | 43,78 |
| <b>Manganeso (ppm)</b> | 173,7  | 116,9 | 90,0   | 75,6  | 140,5  | 115   | 76,5   | 99,9  |
| <b>Cobre (ppm)</b>     | 28,0   | 34,0  | 21,6   | 23,0  | 33,1   | 29,2  | 26,55  | 24,5  |
| <b>Boro (ppm)</b>      | 75,4   | 57,4  | 55,0   | 47,9  | 76,1   | 82,3  | 55,9   | 63,2  |

## PRODUCCIÓN DEL CULTIVO

La producción de tomate fue diferente en función de la variedad cultivada. Así, en el tomate variedad 'Narciso', se produjo un descenso de los rendimientos de un 11%, mientras que en la variedad local autóctona 'Ramallet' se incrementó la producción un 5% cuando el cultivo fue regado con aguas regeneradas. En este sentido, hay que decir que esta variedad, a diferencia de otras, tiene dos cualidades que despiertan un gran interés desde el punto de vista agronómico. La primera tiene que ver con el proceso de maduración del fruto, que hace que se conserve de manera natural de un año al otro sin perder sus propiedades organolépticas. La segunda es su gran resistencia a la sequía, que permite casi ser un cultivo de secano, aspecto que parece estar estrechamente relacionado con la durabilidad del fruto. El mejor estado hídrico de las plantas de tomate regadas con agua regenerada y el incremento de la fotosíntesis neta a mitad del ciclo de cultivo (45 DDP), indica una buena adaptación de esta especie al riego con agua regenerada, aún mayor, cuando se evalúa el nivel productivo de la variedad autóctona 'Ramallet' (Figura 10).

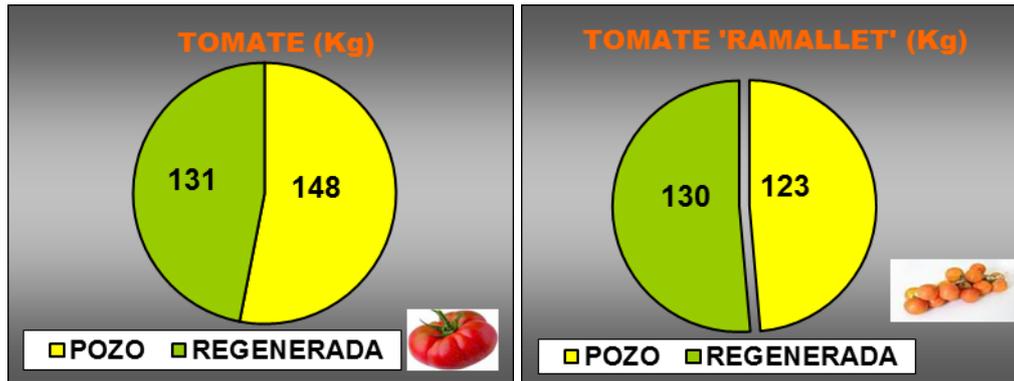


Figura 10. Producción del cultivo de tomate en ambas variedades regado con ambas fuentes de agua (n= 40 plantas).

## Pepino

### NIVELES DE INTERCAMBIO GASEOSO

Los niveles de intercambio gaseoso en las plantas de pepino regadas con agua regenerada fueron similares a los mostrados por estas plantas regadas con agua de pozo (Tabla 23), indicando un comportamiento similar a nivel fisiológico en las plantas de ambos tipos de aguas. Únicamente cabe destacar que, al principio de las medidas, existió una tendencia en las plantas regadas con agua regenerada a tener menores niveles de  $F_n$  y  $g_s$  que las plantas regadas con aguas de pozo, aunque no de manera significativa.

Tabla 23: Niveles de fotosíntesis neta ( $F_n$ ,  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), conductancia estomática ( $g_s$ ,  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) y eficiencia en el uso del agua (EUA,  $\mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ ) en hojas de pepino regados con agua de pozo (P) y agua regenerada (R) a los 30 y 45 días después de la plantación (DDP).

| Fecha  | Tratamiento | $F_n$  | $g_s$   | EUA    |
|--------|-------------|--------|---------|--------|
| 30 DDP | P           | 32,4 a | 492,8 a | 65,8 a |
|        | R           | 27,4 a | 447,7 a | 61,2 a |
| 45 DDP | P           | 19,1 a | 226,3 a | 84,3 a |
|        | R           | 19,6 a | 204,8 a | 95,6 a |

Nota: Los valores seguidos de letras diferentes dentro de las columnas representan las diferencias significativas de acuerdo al test de rango múltiple de Duncan ( $P=0,05$ ). Estos valores son la media de diez medidas.

### ANÁLISIS DEL ESTADO NUTRICIONAL

A los 15 DDP (Tabla 24), las plantas de pepino presentaron menores niveles de N cuando fueron regadas con agua regenerada, siendo los niveles normales en ambos tipos de agua para esta fase inicial del crecimiento vegetativo. Los niveles foliares de P

en ambas fuentes de agua fueron muy parecidos, situándose por debajo del nivel de suficiencia del 0,3%, independientemente del tipo de agua empleada. En cuanto al potasio foliar, las plantas regadas con aguas regeneradas presentaron menores niveles de este elemento que las regadas con aguas de pozo, aún así se situaron por debajo del 4%, por lo que existió una deficiencia en este elemento independientemente del tipo de agua utilizada. Los niveles de calcio y magnesio se situaron en el rango normal de concentración. Las concentraciones foliares de micronutrientes indicaron niveles de suficiencia para todos ellos, siendo superiores en las plantas regadas con aguas regeneradas.

A los 30 y 45 DDP (Tabla 24), los niveles foliares de nitrógeno fueron similares, siendo las plantas regadas con agua regenerada las que mostraron un menor nivel de N foliar, que se situó, en todos los casos, muy por debajo del nivel de suficiencia, que se fija en el 4,5%. Los niveles foliares de P mostraron un incremento a los 45 DDP, con valores similares en ambos tipos de agua e inferiores al del umbral de suficiencia del 0,3%. En cuanto al potasio foliar, las plantas regadas con agua de pozo presentaron un mayor contenido en K foliar con valores similares a los 30 y 45 DDP, los cuales siempre se situaron por debajo de su umbral de suficiencia (4,0%). Los niveles de Ca y Mg foliar se situaron en el rango normal (30 DDP) o elevado (45 DDP) en ambos tipos de agua, presentando las plantas regadas con agua regenerada mayores niveles foliares de ambos elementos. Los niveles foliares de micronutrientes se situaron dentro del rango de suficiencia, siendo mayores en el caso de las plantas regadas con agua regenerada en todos los elementos, excepto el Cu.

A los 80 DDP (Tabla 24), el nivel de senescencia de las plantas de pepino era importante. Así, los niveles de N, P, K difirieron muy poco entre tipos de agua, siendo incrementados notablemente en las plantas regadas con aguas regeneradas (0,38 ppm de P foliar frente a los 0,25 ppm de las plantas regadas con agua de pozo), posiblemente provocado por su mayor contenido en esta fuente de agua. Respecto a los niveles foliares de suficiencia en estos elementos, hay que destacar que no se alcanzaron para ninguno de los tres elementos: N, P, y K, ya que no registraron valores superiores a 4,5%, 0,3% y alrededor del 4% para el K, respectivamente, excepto para las plantas regadas con agua regeneradas que superaron el umbral de suficiencia fijado en el 0,3% en P a nivel foliar. Respecto al Ca y Mg, se situaron en el rango normal a elevado siendo los niveles foliares ligeramente inferiores en las plantas regadas con agua regenerada. Los niveles de micronutrientes estuvieron en valores dentro del rango de suficiencia, y fueron mayores en las plantas regadas con agua de pozo, excepto para el caso del Zn (Tabla 24).

Tabla 24: Análisis de elementos foliares en plantas de pepino regados con agua de pozo (P) y agua regenerada (R) a los 15, 30, 45 y 80 días después de la plantación (DDP).

| PARÁMETROS             | 15 DDP |       | 30 DDP |       | 45 DDP |       | 80 DDP |       |
|------------------------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
|                        | P      | R     | P      | R     | P      | R     | P      | R     |
| <b>Nitrógeno (%)</b>   | 3,71   | 3,12  | 3,14   | 1,81  | 2,62   | 2,04  | 2,37   | 2,33  |
| <b>Fósforo (%)</b>     | 0,2    | 0,22  | 0,16   | 0,13  | 0,23   | 0,23  | 0,25   | 0,38  |
| <b>Potasio (%)</b>     | 1,87   | 1,39  | 1,21   | 0,74  | 1,3    | 1,04  | 1,12   | 1,06  |
| <b>Calcio (%)</b>      | 4,0    | 4,6   | 2,5    | 3,9   | 5,9    | 6,3   | 4,5    | 4,4   |
| <b>Magnesio (%)</b>    | 0,64   | 0,69  | 0,54   | 0,72  | 1,19   | 1,31  | 1,00   | 0,93  |
| <b>Hierro (ppm)</b>    | 206,1  | 240,3 | 178,5  | 373,6 | 302,8  | 398,3 | 669,3  | 539,2 |
| <b>Cinc (ppm)</b>      | 32,5   | 39,1  | 31,8   | 37,2  | 48,5   | 56,9  | 40,2   | 66,8  |
| <b>Manganeso (ppm)</b> | 136,3  | 148,3 | 88,4   | 118   | 164,2  | 170,4 | 137,9  | 133,6 |
| <b>Cobre (ppm)</b>     | 11     | 10,2  | 6,5    | 5,6   | 10,7   | 9,6   | 11,1   | 10,3  |
| <b>Boro (ppm)</b>      | 37,2   | 38,5  | 29,1   | 34    | 35,7   | 32,6  | 78,4   | 77,6  |

## PRODUCCIÓN DEL CULTIVO

La producción en el cultivo del pepino regado con agua regenerada también experimentó una importante bajada de rendimiento (Figura 11), siendo ésta un 15% menor respecto al cultivo regado con agua de pozo. En este sentido, hay que indicar que la justificación no puede venir indicada por la menor actividad fisiológica de las plantas, ya que éstas fueron del mismo orden en las plantas regadas con ambas fuentes de agua. Por ello, deben buscarse otras causas de la disminución del rendimiento, como la alta sensibilidad de las plantas de esta especie a la absorción de nutrientes procedentes de las aguas regeneradas a pH muy alcalinos, como el del agua regenerada (alrededor de 9) o a la falta de N en las fases iniciales de su desarrollo.

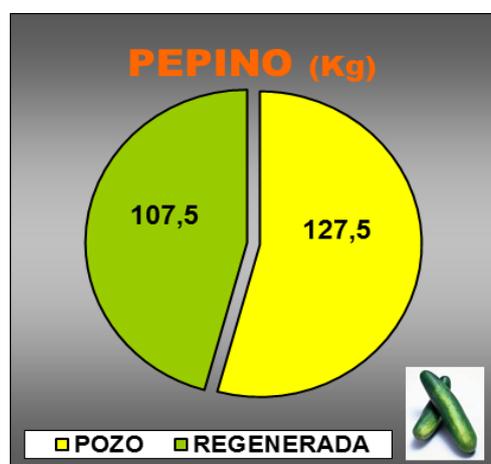


Figura 11. Producción del cultivo de pepino regado con ambas fuentes de agua (n = 80 plantas).

## Melón

### NIVELES DE INTERCAMBIO GASEOSO

Los niveles de intercambio gaseoso en las plantas de melón regadas con agua regenerada experimentaron un incremento significativo en todos los parámetros de intercambio gaseoso ( $F_n$ ,  $g_s$  y EUA), indicando claramente un mejor comportamiento fisiológico de estas plantas cuando son regadas con este tipo de agua (Tabla 25). Otro hecho que avala este resultado fue que las plantas de este tratamiento presentaron un mejor estado sanitario, ya que la incidencia de una enfermedad fúngica como el 'oidio' se retrasó de manera evidente en las plantas de melón regadas con agua regenerada.

### ANÁLISIS DEL ESTADO NUTRICIONAL

A los 15 DDP (Tabla 26), las plantas de melón presentaron niveles foliares de nitrógeno similares y en el rango de la normalidad en ambos tipos de agua. Los niveles foliares de P en ambas fuentes de agua fueron muy parecidos, situándose por debajo del nivel de suficiencia del 0,3%, independientemente del tipo de agua empleada. En cuanto al potasio foliar, las plantas regadas con aguas regeneradas presentaron un mayor contenido foliar de este elemento pero se situaron por debajo del 4%, por lo que existió una deficiencia en este elemento independientemente del tipo de agua utilizada. Los niveles de calcio y magnesio se encuentran en el rango normal de concentración. Las concentraciones foliares de micronutrientes indicaron niveles de suficiencia para todos ellos, siendo superiores en las plantas regadas con aguas regeneradas, a excepción del Mn.

Tabla 25: Niveles de fotosíntesis neta ( $F_n$ ,  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), conductancia estomática ( $g_s$ ,  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) y eficiencia en el uso del agua (EUA,  $\mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ ) en hojas de melón regados con agua de pozo (P) y agua regenerada (R) a los 30 y 45 días después de la plantación (DDP).

| Fecha  | Tratamiento | $F_n$  | $g_s$   | EUA     |
|--------|-------------|--------|---------|---------|
| 30 DDP | P           | 31,2 a | 370,1 a | 84,4 a  |
|        | R           | 42,1 b | 573,2 b | 73,4 a  |
| 45 DDP | P           | 13,3 a | 140,6 a | 94,9 a  |
|        | R           | 24,4 b | 211,6 b | 115,4 b |

Nota: Los valores seguidos de letras diferentes dentro de las columnas representan las diferencias significativas de acuerdo al test de rango múltiple de Duncan ( $P=0,05$ ). Estos valores son la media de diez medidas.

Los niveles foliares de nitrógeno mostraron un cambio de tendencia a los 45 DDP (Tabla 26), ya que el agua regenerada, que a los 30 DDP mostraba mayores niveles de N foliar, disminuyó 15 días después respecto a las plantas regadas con agua de pozo. Aún así, los niveles de N foliar se mantuvieron muy por debajo del nivel de suficiencia (4,5%) en las plantas regadas con ambos tipos de aguas. Los niveles

foliares de P mostraron un incremento muy significativo en las plantas regadas con agua de pozo, el cual a los 45 DDP llegó a alcanzar el umbral de suficiencia en este elemento. Hay que destacar que en este momento, los niveles de P foliar en las plantas regadas con agua regenerada se situó muy por debajo del obtenido en las plantas regadas con agua de pozo (0,36 y 0,22%, respectivamente). En cuanto al potasio foliar, las plantas regadas con agua regenerada presentaron un nivel inferior de K foliar a los 45 DDP. El contenido foliar de Ca y Mg se situó en el rango normal (30 DDP) o elevado (45 DDP) siendo superior en las plantas regadas con agua de pozo en ambos momentos muestreados. Los niveles de micronutrientes, en general, se situaron en valores dentro del rango de suficiencia. De forma general, subrayar que, en ambos momentos se presentaron un mayor contenido foliar en micronutrientes en las plantas regadas con agua de pozo respecto a las que fueron regadas con agua regenerada.

A los 80 DDP (Tabla 26), el nivel de senescencia de las plantas de melón era importante. Así, los niveles de N, P, K difirieron muy poco entre tipos de agua, siendo mayores para el N en las plantas regadas con agua regenerada y mayores para el P y K en las plantas regadas con agua de pozo. Respecto al Ca y Mg, se mueven en el rango normal a elevado siendo los niveles foliares superiores en las plantas regadas con agua de pozo para el caso del Ca. Los niveles de micronutrientes se situaron en valores dentro del rango de suficiencia, y fueron mayores en las plantas regadas con agua de pozo.

Tabla 26: Análisis de elementos foliares en plantas de melón regados con agua de pozo (P) y agua regenerada (R) a los 15, 30, 45 y 80 días después de la plantación (DDP).

| PARÁMETROS             | 15 DDP |       | 30 DDP |       | 45 DDP |       | 80 DDP |       |
|------------------------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
|                        | P      | R     | P      | R     | P      | R     | P      | R     |
| <b>Nitrógeno (%)</b>   | 3,46   | 3,47  | 2,89   | 3,36  | 3,37   | 2,9   | 3,89   | 4,04  |
| <b>Fósforo (%)</b>     | 0,19   | 0,19  | 0,18   | 0,18  | 0,36   | 0,22  | 0,26   | 0,21  |
| <b>Potasio (%)</b>     | 1,86   | 2,18  | 2,21   | 2,20  | 2,92   | 1,95  | 2,26   | 1,90  |
| <b>Calcio (%)</b>      | 8,18   | 7,93  | 5,99   | 5,72  | 6,17   | 5,1   | 4,6    | 4,21  |
| <b>Magnesio (%)</b>    | 0,73   | 0,64  | 0,69   | 0,56  | 0,8    | 0,55  | 0,7    | 0,73  |
| <b>Hierro (ppm)</b>    | 204,6  | 223,0 | 252,1  | 214,8 | 185,9  | 123,2 | 252,3  | 143,1 |
| <b>Cinc (ppm)</b>      | 22,2   | 23,3  | 24,4   | 18,9  | 32,0   | 23,7  | 33,3   | 27,0  |
| <b>Manganeso (ppm)</b> | 115,3  | 114,8 | 85,0   | 80,0  | 76,4   | 70,8  | 94,2   | 95,3  |
| <b>Cobre (ppm)</b>     | 10,4   | 12,7  | 7,2    | 7,5   | 14,1   | 9,8   | 12,4   | 10,9  |
| <b>Boro (ppm)</b>      | 42,2   | 53,6  | 55,3   | 50,6  | 71,8   | 48,2  | 57,6   | 48,6  |

## PRODUCCIÓN DEL CULTIVO

La producción en el cultivo del melón regado con ambas fuentes de agua fue bastante similar, aunque se incrementó un 7% en las plantas regadas con agua de pozo al final del ensayo. Las causas de este incremento también son similares a las del cultivo del

pepino, aunque hay que destacar que la actividad fisiológica de las plantas de melón regadas con agua regenerada presentó un incremento significativo de los niveles de fotosíntesis neta y conductancia estomática en los dos momentos del ensayo. Además la incidencia de una enfermedad como el 'oidio', fue menor en las plantas regadas con esta fuente de agua no convencional (Figura 12).

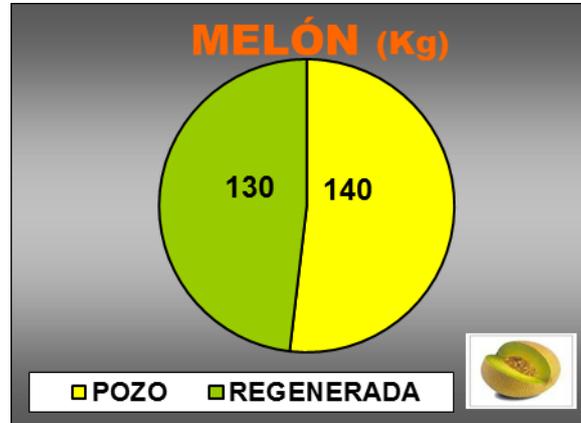


Figura 12. Producción del cultivo de melón regado con ambas fuentes de agua (n = 80 plantas).

#### 2.4.5 Parcela hortícolas (agua de pozo y regenerada con y sin fertilizantes)

Este segundo ensayo se realizó también en la zona de *Maria de la Salut-Ariany* en 2013, con la inclusión de nuevos tratamientos a los que se aportaron las unidades nutricionales necesarias para completar el ciclo vegetativo y productivo de los cultivos de tomate, pimiento y pepino con ambas fuentes de agua. Finalmente, se evaluaron los rendimientos de los cultivos, así como el comportamiento fisiológico y constituyentes foliares de los cultivos durante distintos momentos de su ciclo de cultivo.

#### Pimiento

##### EVOLUCIÓN DEL ESTADO HÍDRICO

Las plantas de pimiento regadas con aguas regeneradas presentaron un mejor estado hídrico a partir de los 30 DDP, con valores medios de potencial hídrico de tallo ( $\psi_t$ ) significativamente superiores en unos 0,35 MPa con respecto al tratamiento regado con agua de pozo, independientemente de haber recibido la aplicación de solución nutritiva (Tabla 27). A finales de agosto, el estado hídrico fue similar en todos los tratamientos de agua y nutrición ensayados.

Tabla 27: Valores de potencial hídrico de tallo ( $\psi_t$ , MPa) en hojas de plantas de pimiento regadas con agua de pozo sin fertilización adicional (P) y con fertilización adicional (P+F), y regadas con agua regenerada sin fertilización adicional (R) y con fertilización adicional (R+F) a los 30 y 60 días después de la plantación (DDP).

| Fecha  | P           | P+F         | R           | R+F         |
|--------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 30 DDP | -1,02±0,07a | -1,11±0,08a | -0,77±0,06b | -0,67±0,05b |
| 60 DDP | -0,55±0,6a  | -0,65±0,6a  | -0,65±0,5a  | -0,64±0,06a |

Nota: Los valores de  $\psi_t$  seguidos de letras diferentes dentro de las columnas representan las diferencias significativas de acuerdo al test de rango múltiple de Duncan ( $P=0,05$ ). Estos valores son la media de seis medidas.

### NIVELES DE INTERCAMBIO GASEOSO

La mejor situación hídrica de las plantas de pimiento regadas con agua regenerada a los 30 DDP fue consecuencia de unos mayores niveles de intercambio gaseoso (fotosíntesis y conductancia estomática). Así, en este período, las plantas regadas con agua regenerada tuvieron mayores niveles de fotosíntesis neta, siendo el tratamiento fertilizado de este tipo de agua, el que presentó las mayores tasas de asimilación de  $\text{CO}_2$  y de conductancia estomática. Sin embargo, a los 60 DDP esta tendencia no fue mostrada, justificado por una similar situación hídrica entre los cuatro tratamientos de agua con/sin fertilización adicional. Durante este período, la tasa de fotosíntesis neta se redujo significativamente, únicamente en el tratamiento de agua regenerada sin aporte de solución nutritiva siendo, también, los niveles de conductancia estomática más bajos en los tratamientos regados con agua regenerada, independientemente de la aportación de fertilizantes. Por último, las plantas fertilizadas, independientemente del tipo de agua utilizado, mostraron los menores niveles de eficiencia en el uso del agua a los 30 DDP y los mayores a los 60 DDP (Tabla 28).

Tabla 28: Niveles de fotosíntesis neta ( $F_n$ ,  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), conductancia estomática ( $g_s$ ,  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) y eficiencia en el uso del agua (EUA,  $\mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ ) en hojas de plantas de pimiento regadas con agua de pozo sin fertilización adicional (P) y con fertilización adicional (P+F), y regadas con agua regenerada sin fertilización adicional (R) y con fertilización adicional (R+F) a los 30 y 60 días después de la plantación (DDP).

| Fecha  | Tratamiento | $F_n$   | $g_s$   | EUA     |
|--------|-------------|---------|---------|---------|
| 30 DDP | P           | 19,4 a  | 270,6 a | 71,6 a  |
|        | P+F         | 22,5 a  | 383,2 b | 58,7 b  |
|        | R           | 26,8 ab | 343,9 b | 77,9 a  |
|        | R+F         | 30,6 a  | 480,5 c | 63,7 b  |
| 60 DDP | P           | 24,8 a  | 374,1 a | 66,4 a  |
|        | P+F         | 25,2 a  | 353,7 a | 71,3 ab |
|        | R           | 18,8 b  | 299,8 b | 62,8 a  |
|        | R+F         | 22,6 ab | 287,7 b | 78,4 b  |

Nota: Los valores seguidos de letras diferentes dentro de las columnas representan las diferencias significativas de acuerdo al test de rango múltiple de Duncan ( $P=0,05$ ) para cada fecha. Estos valores son la media de diez medidas.

## ANÁLISIS DEL ESTADO NUTRICIONAL

Los niveles foliares de N de las plantas de pimiento regadas con agua de pozo se situaron en un rango normal (aunque fueron más altos en el caso de fertilizar, alcanzando hasta el 3,6%), y los de las regadas con aguas regeneradas fueron elevados (si son fertilizadas, llegan hasta el 5%) a los 30 DDP. Además, los niveles de P foliar no alcanzaron el nivel de suficiencia (0,3%) en ninguno de los tratamientos de agua sin fertilizar (más aún en las plantas regadas con agua de pozo). Sin embargo, los niveles de K foliar fueron elevados, incluso mayores en las plantas regadas con aguas regeneradas (con aplicación de fertilizantes llegan hasta el 6%). Los niveles de Ca y Fe son normales en todos los tratamientos considerados. Por último, los niveles del macronutriente Mg y los micronutrientes Zn, Mn y Cu fueron muy elevados en ambas fuentes de agua con y sin aplicación de fertilizantes (en el caso del B también ocurre en agua de pozo) (Tabla 29).

Los niveles de N en las plantas de pimiento regadas con agua de pozo continuaron en un rango normal a los 60 DDP, aunque fueron más bajos que a los 30 DDP (en el caso de las plantas regadas con aguas de pozo ya se encuentran ligeramente por debajo del umbral de suficiencia del 3% y los fertilizados y regados con aguas regeneradas alcanzaron el 4%). El único elemento que se encuentra por debajo de los niveles de suficiencia fue el P, aunque únicamente en los tratamientos regados sin aportación de fertilizantes (0,27% en ambos casos, por debajo del nivel crítico del 0,3%). El resto de elementos se encuentran en un nivel normal (Ca, y micronutrientes Fe, Mn y B) o alto (caso de los macronutrientes K, Mg y micronutrientes Zn y Cu) en ambas fuentes de agua, sin o con aplicación de fertilizantes (en este último caso los niveles suelen ser superiores en Zn y Cu) (Tabla 29).

Tabla 29: Análisis de elementos foliares en plantas de pimiento regados con agua de pozo (P) y agua regenerada (R), sin y con aplicación de fertilizantes (F) a los 30 y 60 días después de la plantación (DDP).

| PARÁMETROS      | 30 DDP |       |       |       | 60 DDP |       |       |       |
|-----------------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
|                 | P      | P+F   | R     | R + F | P      | P+F   | R     | R + F |
| Nitrógeno (%)   | 3,19   | 3,6   | 4,14  | 5,00  | 2,97   | 3,39  | 3,37  | 4,00  |
| Fósforo (%)     | 0,23   | 0,40  | 0,28  | 0,33  | 0,27   | 0,46  | 0,27  | 0,35  |
| Potasio (%)     | 4,5    | 4,7   | 5,1   | 6,0   | 4,9    | 4,9   | 5,1   | 4,7   |
| Calcio (%)      | 2,7    | 2,7   | 2,1   | 2,1   | 2,1    | 2,0   | 1,9   | 2,1   |
| Magnesio (%)    | 0,89   | 0,99  | 0,80  | 0,82  | 0,54   | 0,49  | 0,53  | 0,54  |
| Hierro (ppm)    | 133,1  | 144,2 | 130,2 | 132,8 | 108,3  | 116,7 | 134,8 | 129,8 |
| Cinc (ppm)      | 78,1   | 101,8 | 60,2  | 65,0  | 87,0   | 92,9  | 66,6  | 80,5  |
| Manganeso (ppm) | 222,1  | 278,8 | 176,5 | 199,5 | 109,3  | 104,2 | 101,2 | 118,0 |
| Cobre (ppm)     | 32,5   | 27,7  | 31,5  | 41,2  | 23,2   | 24,9  | 22,4  | 24,9  |
| Boro (ppm)      | 68,5   | 73,9  | 56,7  | 52,2  | 48,3   | 51,0  | 50,2  | 49,6  |

## PRODUCCIÓN DEL CULTIVO DE PIMIENTO

La utilización de agua regenerada incrementó la producción un 34,3% respecto a la aplicación de agua de pozo. Cuando se aplicó solución nutritiva, diferente en cada fuente de agua pero con las mismas unidades fertilizantes para ambas fuentes de agua, esta diferencia siguió siendo del mismo orden, incrementándose la producción en el caso de agua regenerada en un 35,8% (Figura 13). Por tanto, el agua regenerada incrementa la producción en igual proporción, corrigiendo o no el manejo del cultivo con la aplicación de solución nutritiva. Aún así, para asegurar un mayor rendimiento se recomienda la aplicación de una solución nutritiva, ya que comparando con la aplicación de agua de pozo sin solución nutritiva, se pueden incrementar los rendimientos un 80,2%. En la Figura 14 se puede ver el detalle de las plantas de pimiento para cada calidad de agua y aplicación o no de solución nutritiva.

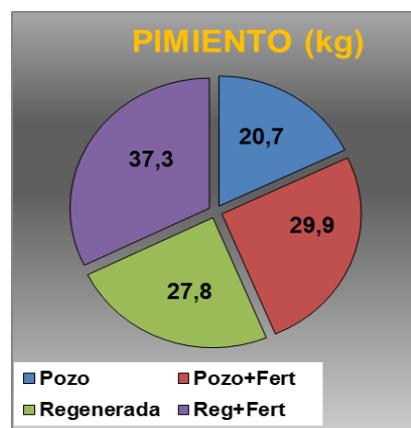


Figura 13. Producción del cultivo de pimiento regado con ambas fuentes de agua con y sin adición de fertilizantes (n = 20 plantas).

Hay que recordar que el año anterior, la producción en el cultivo del pimiento regado con agua regenerada, sin aplicación de solución nutritiva, experimentó la mayor bajada de todos los cultivos, y se situó cerca de un 20% respecto al cultivo regado con agua de pozo, debido a la alcalinidad tan elevada ( $\text{pH} > 9$ ) del agua regenerada en las primeras fases del desarrollo del cultivo.



Figura 14. Detalle del desarrollo de las plantas de pimiento.

## Tomate

### EVOLUCIÓN DEL ESTADO HÍDRICO

Las plantas de tomate regadas con aguas regeneradas presentaron un mejor estado hídrico, con valores medios de potencial hídrico de tallo ( $\psi_t$ ) significativamente

superiores en unos 0,1 MPa con respecto al tratamiento regado con agua de pozo, independientemente de haber recibido la aplicación de solución nutritiva (Tabla 30).

Tabla 30: Valores de potencial hídrico de tallo ( $\psi_t$ , MPa) en hojas de plantas de tomate regadas con agua de pozo sin fertilización adicional (P) y con fertilización adicional (P+F), y regadas con agua regenerada sin fertilización adicional (R) y con fertilización adicional (R+F) a los 30 días después de la plantación (DDP).

| Fecha  | P           | P+F         | R           | R+F         |
|--------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 30 DDP | -0,43±0,03a | -0,46±0,02a | -0,33±0,03b | -0,35±0,03b |

Nota: Los valores de  $\psi_t$  seguidos de letras diferentes dentro de las columnas representan las diferencias significativas de acuerdo al test de rango múltiple de Duncan ( $P=0,05$ ). Estos valores son la media de seis medidas.

## NIVELES DE INTERCAMBIO GASEOSO

El mejor estado hídrico de las plantas de tomate regadas con agua regenerada se vio reflejado en los niveles de intercambio gaseoso, ya que existieron diferencias significativas en los diferentes parámetros del mismo (fotosíntesis neta y conductancia estomática), independientemente de la aplicación de fertilizantes, con respecto a las plantas regadas con agua de pozo (Tabla 31). Este hecho indica una mejor adaptación de estas plantas al riego con agua regenerada. Finalmente, la eficiencia en el uso del agua se incrementó en el tratamiento regado con agua de pozo sin aportación adicional de fertilizantes, como resultado de sus bajos niveles de transpiración (conductancia estomática).

Tabla 31: Niveles de fotosíntesis neta ( $F_n$ ,  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), conductancia estomática ( $g_s$ ,  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) y eficiencia en el uso del agua (EUA,  $\mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ ) en hojas de plantas de tomate regadas con agua de pozo sin fertilización adicional (P) y con fertilización adicional (P+F), y regadas con agua regenerada sin fertilización adicional (R) y con fertilización adicional (R+F) a los 30 días después de la plantación (DDP).

| Fecha    | Tratamiento | $F_n$  | $g_s$   | EUA    |
|----------|-------------|--------|---------|--------|
| 24 Julio | P           | 21,9 a | 290,2 a | 75,4 a |
|          | P+F         | 23,9 a | 386,4 a | 61,8 b |
|          | R           | 30,6 b | 506,0 b | 60,5 b |
|          | R+F         | 30,8 b | 519,0 b | 59,3 b |

Nota: Los valores seguidos de letras diferentes dentro de las columnas representan las diferencias significativas de acuerdo al test de rango múltiple de Duncan ( $P=0,05$ ). Estos valores son la media de diez medidas.

## ANÁLISIS DEL ESTADO NUTRICIONAL

En las plantas regadas con agua de pozo y sin aplicación de solución nutritiva no se alcanzaron los umbrales de suficiencia, para el caso del N foliar (umbral del 4%, frente a un valor alcanzado de 2,88%), al igual que para el caso de los niveles foliares de K (umbral del 2,9%, frente a un valor alcanzado de 2,06%) (Tabla 32). El resto de

elementos, en los distintos tratamientos de agua y aplicación de solución nutritiva, estuvieron dentro del rango de suficiencia, si bien hay que destacar los claros incrementos de N y K foliar cuando se aplicó una solución nutritiva en los tomates regados con agua de pozo, así como el óptimo equilibrio nutricional encontrado en las hojas de tomate del tratamiento de agua regenerada con aplicación de fertilizantes. En las siguientes imágenes se puede ver el crecimiento vegetativo de los tomates en los distintos tratamientos de calidad de agua con y sin solución nutritiva, en el momento en el que la analítica foliar fue realizada (Figura 15).



Figura 15. Detalle del desarrollo de las plantas de tomate a los 30 DDP.

Tabla 32: Análisis de elementos foliares en plantas de tomate regados con agua de pozo (P) y agua regenerada (R), sin y con aplicación de fertilizantes (F) a los 30 días después de la plantación (DDP).

| PARÁMETROS      | P     | P+F   | R     | R + F |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|
| Nitrógeno (%)   | 2,88  | 4,21  | 4,51  | 4,93  |
| Fósforo (%)     | 0,32  | 0,39  | 0,41  | 0,38  |
| Potasio (%)     | 2,06  | 3,51  | 3,59  | 3,69  |
| Calcio (%)      | 6,10  | 4,37  | 3,06  | 3,69  |
| Magnesio (%)    | 0,96  | 0,73  | 0,59  | 0,59  |
| Hierro (ppm)    | 309,4 | 204,1 | 175,9 | 169,4 |
| Cinc (ppm)      | 54,4  | 45,0  | 54,6  | 42,2  |
| Manganeso (ppm) | 252,3 | 172,8 | 129,6 | 143,3 |
| Cobre (ppm)     | 50,2  | 28,9  | 33,1  | 25,9  |
| Boro (ppm)      | 64,7  | 54,0  | 55,7  | 52,3  |

## Pepino

### NIVELES DE INTERCAMBIO GASEOSO

Los niveles de intercambio gaseoso en las plantas de pepino regadas con agua regenerada fueron diferentes en función del momento analizado. A los 30 DDP, todos los tratamientos tuvieron los mismos niveles de conductancia estomática y eficiencia en el uso del agua, sin embargo, el tratamiento regado con agua de pozo sin aplicación adicional de fertilizantes, presentó los menores niveles de fotosíntesis neta. A los 60 DDP, esta tendencia fue algo diferente, y las tasas de asimilación neta fueron similares en todos los tratamientos ensayados, mientras que los de conductancia estomática fueron más bajos en los tratamientos regados con agua regenerada, aunque este descenso sólo fue significativo en el caso del tratamiento de agua regenerada sin aplicación de solución nutritiva. Por ello, los niveles de eficiencia en el uso del agua fueron incrementados en los tratamientos regados con agua regenerada debido a la reducción y ajuste de los niveles de conductancia estomática registrados en este período (Tabla 33).

Tabla 33: Niveles de fotosíntesis neta ( $F_n$ ,  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), conductancia estomática ( $g_s$ ,  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) y eficiencia en el uso del agua (EUA,  $\mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ ) en hojas de plantas de pepino regadas con agua de pozo sin fertilización adicional (P) y con fertilización adicional (P+F), y regadas con agua regenerada sin fertilización adicional (R) y con fertilización adicional (R+F) a los 30 y 60 días después de la plantación (DDP).

| Fecha  | Tratamiento | $F_n$  | $g_s$   | EUA     |
|--------|-------------|--------|---------|---------|
| 30 DDP | P           | 30,6 a | 501,8 a | 61,0 a  |
|        | P+F         | 33,6 b | 561,7 a | 59,8a   |
|        | R           | 33,4 b | 536,3 a | 62,3 a  |
|        | R+F         | 34,9 b | 549,8 a | 63,5 a  |
| 60 DDP | P           | 22,6 a | 370,9 a | 61,0 a  |
|        | P+F         | 23,3 a | 392,7 a | 59,4 a  |
|        | R           | 22,8 a | 318,2 b | 71,5 b  |
|        | R+F         | 22,8 a | 335,5ab | 68,1 ab |

Nota: Los valores seguidos de letras diferentes dentro de las columnas representan las diferencias significativas de acuerdo al test de rango múltiple de Duncan ( $P=0,05$ ) para cada fecha. Estos valores son la media de diez medidas.

### ANÁLISIS DEL ESTADO NUTRICIONAL

A los 30 DDP (Tabla 34), los niveles de N foliar en las plantas de pepino regadas con agua de pozo y las regadas con agua regenerada sin fertilizar no alcanzaron el umbral de suficiencia fijado en el 4,5% (sólo las plantas regadas con agua regenerada y fertilizadas, con un 4,71%). Para el caso del K foliar, ningún tratamiento alcanzó los niveles de suficiencia del 3,9%, a pesar de que el tratamiento regado con agua regenerada y aplicación de fertilizantes fue el que se acercó más a este límite, con un 3,58 %. El resto de elementos, macro y micronutrientes, se mantuvieron en niveles normales (Tabla 34).

A los 60 DDP los niveles de los macronutrientes N, P y K descendieron muy por debajo de los registrados en el mes anterior hasta situarse todos ellos y en todos los tratamientos (fuente de agua y fertilizadas o no) por debajo del umbral de suficiencia, cifrado en 4,5%, 0,34% y 3,9% para N, P y K, respectivamente. Hay que decir que el resto de elementos se situaron en niveles normales en todos los tratamientos (con y sin fertilización), a excepción de los niveles de Ca y Mg en las plantas regadas con agua regeneradas, que fueron altos (más aún si se aplican fertilizantes).

Tabla 34: Análisis de elementos foliares en plantas de pepino regados con agua de pozo (P) y agua regenerada (R), sin y con aplicación de fertilizantes (F) a los 30 y 60 días después de la plantación (DDP).

| PARÁMETROS             | 30 DDP |       |       |       | 60 DDP |       |       |       |
|------------------------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
|                        | P      | P+F   | R     | R + F | P      | P+F   | R     | R + F |
| <b>Nitrógeno (%)</b>   | 3,54   | 4,23  | 3,95  | 4,71  | 2,82   | 2,89  | 2,85  | 2,88  |
| <b>Fósforo (%)</b>     | 0,34   | 0,42  | 0,38  | 0,45  | 0,33   | 0,31  | 0,25  | 0,26  |
| <b>Potasio (%)</b>     | 2,87   | 3,29  | 3,24  | 3,58  | 2,13   | 2,32  | 2,09  | 1,78  |
| <b>Calcio (%)</b>      | 5,43   | 3,69  | 4,14  | 3,52  | 3,96   | 3,37  | 4,69  | 5,42  |
| <b>Magnesio (%)</b>    | 0,96   | 0,81  | 0,84  | 0,70  | 0,76   | 0,79  | 1,06  | 1,13  |
| <b>Hierro (ppm)</b>    | 177,3  | 142,6 | 154,7 | 144,5 | 155,0  | 153,5 | 273,9 | 183,9 |
| <b>Cinc (ppm)</b>      | 45,7   | 41,5  | 41,7  | 38,3  | 46,3   | 40,4  | 53,6  | 51,6  |
| <b>Manganeso (ppm)</b> | 140,3  | 111,9 | 127,0 | 111,6 | 147,7  | 115,1 | 210,5 | 225,5 |
| <b>Cobre (ppm)</b>     | 9,9    | 11,8  | 10,5  | 12,1  | 8,9    | 7,8   | 8,6   | 9,3   |
| <b>Boro (ppm)</b>      | 60,8   | 48,5  | 47,5  | 40,4  | 47,3   | 38,0  | 60,6  | 65,4  |

## PRODUCCIÓN DEL CULTIVO DE PEPINO

En este cultivo, la aplicación de agua regenerada redujo la producción un 23,3% respecto a la aplicación de agua de pozo sin fertilizantes. Sin embargo, cuando se aplicó la solución nutritiva, diferente en cada fuente de agua pero con las mismas unidades fertilizantes finales, se produjo un incremento de la producción en el caso de agua regenerada del 30,9% (Figura 16). Por tanto, el agua regenerada sólo aumentó la producción con la aplicación de solución nutritiva. Este hecho indica que para asegurar un mayor rendimiento con la aplicación de agua regenerada es necesaria la aplicación de una solución nutritiva, ya que comparando con la aplicación de agua de pozo sin solución nutritiva, se pueden incrementar los rendimientos un 83,4%. En la Figura 17 se puede ver el detalle de las plantas de pepino para cada calidad de agua y aplicación o no de solución nutritiva.

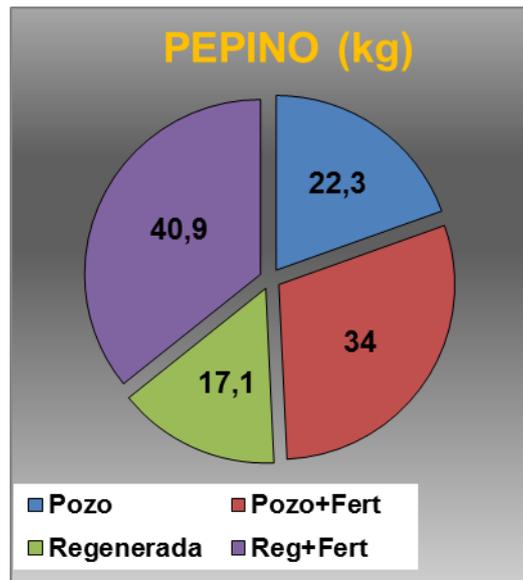


Figura 16. Producción del cultivo de pepino regado con ambas fuentes de agua con y sin adición de fertilizantes (n = 40 plantas).

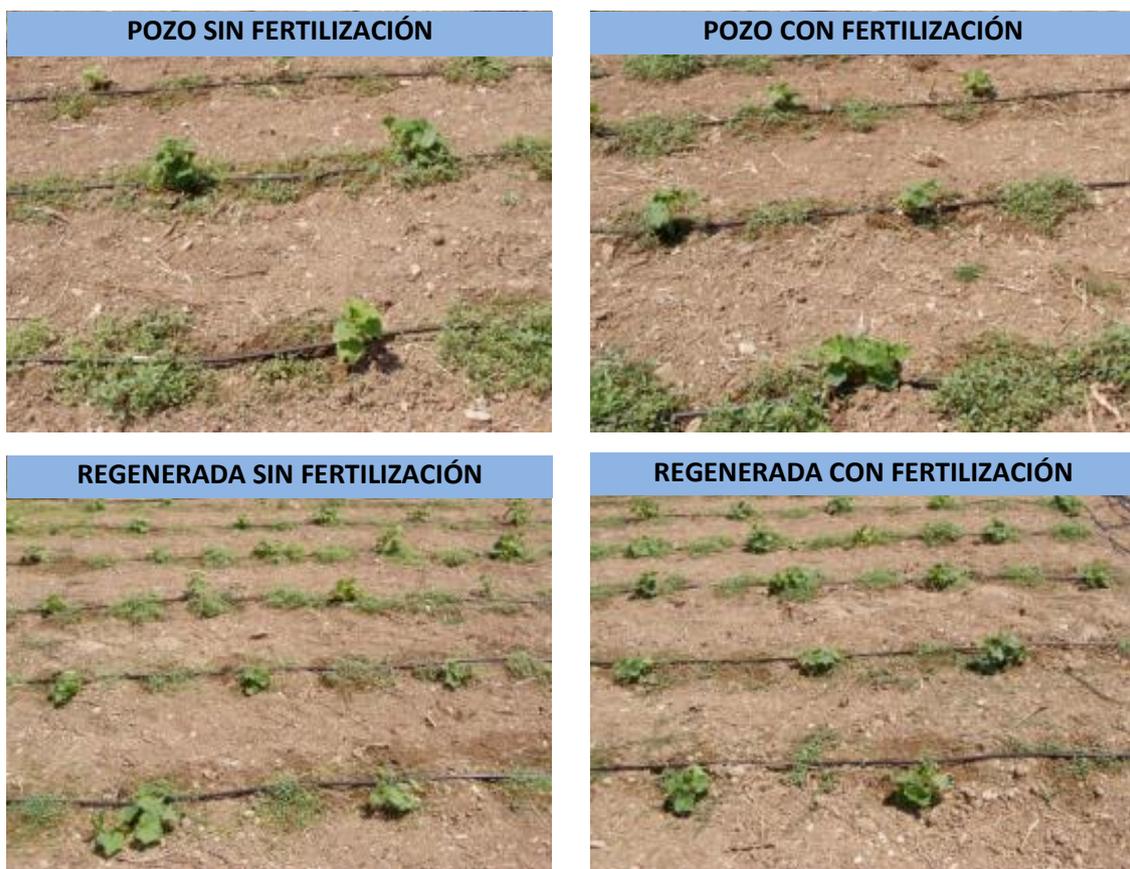


Figura 17. Detalle del desarrollo de las plantas de pepino en la fase inicial de desarrollo.

Hay que recordar que el penúltimo año la producción del cultivo del pepino regado con agua regenerada, sin aplicación de solución nutritiva, también experimentó una importante bajada de rendimiento, siendo ésta un 15% menor respecto al cultivo regado con agua de pozo.

## 2.5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DE REUTILIZACIÓN DE AGUAS REGENERADAS EN MALLORCA

### 2.5.1 Conclusiones definitivas

- 1) En vid, se observó un comportamiento fisiológico diferente en función de la variedad estudiada. Así, las vides de la variedad 'Cabernet Sauvignon' tuvieron un mejor estado hídrico y niveles más altos de intercambio gaseoso cuando fueron regadas con aguas regeneradas. Por el contrario las vides de la variedad autóctona 'Prensal Blanc' presentaron mayores niveles de intercambio gaseoso cuando fueron regadas con agua de pozo asociado a su mejor estado hídrico. Por ello, 'Cabernet Sauvignon' parece adaptarse mejor que la variedad autóctona 'Prensal Blanc' al riego con agua regenerada. Además, existieron deficiencias en algunos macroelementos como el P y K ya que no se alcanzaron los umbrales de suficiencia de estos elementos en las variedades y tipos de agua utilizadas.
- 2) El estado hídrico de los olivos regados con aguas regeneradas fue mejor que el de las plantas regadas con agua de pozo, así como las tasas de intercambio gaseoso (fotosíntesis y conductancia estomática). Además, existieron deficiencias foliares de potasio ya que no se alcanzó su umbral de suficiencia independientemente de la fuente de agua empleada.
- 3) De forma general, las aguas regeneradas de la zona centro de Mallorca presentan una buena calidad agronómica, con bajos niveles de salinidad y elevada carga nutricional, principalmente en lo referente a los niveles de fósforo y potasio. Respecto al contenido en nitratos, éstos fueron bastante inferiores a los registrados en las aguas de pozo. Además las aguas regeneradas cumplieron todos los años los requisitos normativos exigidos por el RD 1620/2007 para el riego de cultivos frutales.
- 4) Los cultivos hortícolas presentaron un mejor estado fisiológico cuando fueron regados con aguas regeneradas, ya que tanto su estado hídrico como las tasas de intercambio gaseoso fueron incrementados con esta fuente de agua, a excepción del cultivo de pepino que mostró un comportamiento similar en ambas fuentes de agua.
- 5) El rendimiento de los cultivos hortícolas fue, como normal general, mayor en los regados con agua regenerada. En pimiento se lograron, sin aplicación de fertilización adicional, incrementos del 34,3% respecto a la aplicación de agua de pozo. Cuando se aplicó fertilización, esta diferencia siguió siendo del mismo orden, incrementándose la producción en el caso de agua regenerada un 35,8%. En pepino, sin aplicar fertilizantes adicionales, se redujo la producción un 23,3% respecto a la aplicación de agua de pozo frente al incremento de la producción en el caso de agua regenerada en un 30,9% con fertilización. En ensayos sin fertilización adicional, se consiguieron incrementos del 5% en la producción de la variedad autóctona de tomate, así como también en sandía con aumentos productivos del 12%. Sin embargo, cultivos como pepino y melón redujeron ligeramente la producción bajo esta fuente de agua sin aportes de fertilizantes.

## 2.5.2 Recomendaciones

- 1) Las aguas regeneradas representan un aporte adicional muy importante de nutrientes a los cultivos y un riesgo bajo de salinización de los cultivos y suelos, pero un riesgo elevado de eutrofización una vez que son embalsadas.
- 2) Las aguas regeneradas pueden suponer una importante mejora productiva para los cultivos pero para maximizarla sería recomendable un ajuste de las unidades nutricionales totales del cultivo correspondiente y, en algunos casos, correcciones de pH de las mismas en algunas fases del año.
- 3) Sería necesario realizar un seguimiento periódico de las características físico-químicas y microbiológicas de las aguas regeneradas tal y como también exige el marco normativo (RD 1620/2007), tanto por su cumplimiento como por la necesidad de realizar ajustes frecuentes en los programas de fertilización, a fin de optimizar el uso eficiente de fertilizantes y maximizar el desarrollo tanto vegetativo como productivo de los distintos cultivos.

## 2.6 BIBLIOGRAFÍA

- Aiello, R., Luigi Cirelli, G., Consoli, S., 2007. Effects of reclaimed wastewater irrigation on soil and tomato fruits: A case study in Sicily (Italy). *Agricultural Water Management* 93: 65-72
- Aucejo, A., Ferrer, J., Gabaldón, C., Marzal, P., Seco, A. 1997. Toxicity in citrus plantations in Villareal, Spain. *Water Air Soil Pollut* 94: 349–360
- Basiouny, F. M., 1984. The use of municipal treated effluent for peach tree irrigation. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society* 97: 345-347.
- Bole, J.B., Bell, R. G. 1978. Land application of municipal sewage wastewater: Yield and chemical composition of forage crops. *Journal of Environmental Quality* 7: 222-226.
- Burton, T. M. and Hook, J. E., 1979: "A mass balance study of application of municipal wastewater to forest in Michigan", *Journal of Environmental Quality*. 8: 589-596.
- Campbell, W. F., 1983. Alfalfa, sweet corn, and wheat responses to long-term application of municipal wastewater to cropland. *J. Environ Quality*, 12: 234-249.
- Cirelli, G.L. Consoli, S. Licciardello, F. Aiello, R. Giuffrida, F. Leonardi C., 2012. Treated municipal wastewater reuse in vegetable production. *Agricultural Water Management* 104: 163– 170
- Feigin, A., Vaisman, I., and Bielorai, H., 1984. Drip irrigation of cotton with treated municipal effluents: II Nutrient availability in soil. *Journal of Environmental Quality*,13: 234-238.
- Hasek, R. F., 1986. Water conservation and recycling in ornamentals production. *Hortsci*. 21(1): 35-38.
- Iglesias, R., Ortega, E. 2008. Present and future of wastewater reuse in Spain. *Desalination* 218: 105-119.
- Kalavrouziotis, I.K., Robolas, P. Koukoulakis, P.H., Papadopoulos, A.H. 2008. Effects of municipal reclaimed wastewater on the macro- and micro elements status of soil and of Brassica oleracea var. Italica, and B. oleracea var. Gemmifera. *Agricultural Water Management* 95: 419-426.

- Kalavrouziotis, I.K., Kanatas, P.I., Papadopoulos, H., Bladenopoulou, S., Koukoulakis, P.H., Leotsinides, M.N. 2005. Effects of municipal reclaimed wastewater on the macro and microelements status of soil and plants. *Fresenius Environmental Bulletin* 14, n 11.
- Lapeña, L., Escorín, V., Cerezo, M., Flors, V., García, P. 2002. Riego con agua residual urbana depurada en la Plana de Castellon: Un estudio de diez años. Dpto. Ciencias Experimentales ESTCE. Área de Fisiología Vegetal. Universitat Jaume I de Castellón.
- López, A., Pollice, A., Lonigro, A., Masi, S., Palese, A.M., Cirelli, G.L., Toscano, A., Passino R. 2006. Agricultural wastewater reuse in southern Italy. *Desalination* 187: 323–334
- Maas, E.V., Grattan, S.R. 1999. Crop yields as affected by salinity. In R.W. Skaggs and J. van Schilfgaarde (eds) *Agricultural Drainage*. Agron. Monograph 38. ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI pp. 55-108.
- Manios, T., Papagrigoriou, I., Daskalakis, G., Sabathianakis, I., Terzakis, S., Maniadakis, K., Markakis, G. 2006. Evaluated of primary and secondary treated and disinfected wastewater irrigation of tomato and cucumber plants under greenhouse conditions, regarding growth and safety considerations. *Water Environment Research* 78: 797-804.
- Martínez, S., Suay, R., Moreno, J., Segura, M.L. 2013. Reuse of tertiary municipal wastewater effluent for irrigation of Cucumis melo L. *Irrigation Science* 31: 661-672.
- Maurer, M.A., Davies, F.S., Graetz, D.A. 1995. Reclaimed wastewater irrigation and fertilization of mature 'Redblush' grapefruit trees on spodosols in Florida. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 120:394–402.
- Meli, S., Porto, M., Belligno, A., Bufo, S., Mazzatura, A., Scopa, A. 2002. Influence of irrigation with lagooned urban wastewater on chemical and microbiological soil parameters in a citrus orchard under Mediterranean condition. *Science of the Total Environment* 285:69–77.
- Morgan, K.T., Wheaton, A., Parsons, L.R., Castle, W.S. 2008. Effects of Reclaimed Municipal Waste Water on Horticultural Characteristics, Fruit Quality, and Soil and Leaf Mineral Concentration of Citrus. *HortScience* 43:459–464.
- Mounzer, O., Pedrero, F., Nortes, P.A., Bayona, J.M., Nicolás, E., Alarcón, J.J. 2013. Transient soil salinity under the combined effect of reclaimedwater and regulated deficit drip irrigation of Mandarin trees. *Agricultural Water Management* 120: 23–29.
- Neilsen, G.H., Stevenson, D.S., Fitzpatrick, J.J., Brownlee, C.H. 1989a. Nutrition and yield of young apple trees irrigated with municipal waste water. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 114: 377-383.
- Neilsen, G.H., Stevenson, D.S., Fitzpatrick, J.J. 1989b. The effect of municipal wastewater irrigation and rate of N fertilization on petiole composition, yield, and quality of Okanalgran Riesling grapes. *Canadian Journal of Plant Science* 69:1285-1294.
- Nicolás, E., Alarcón, J.J., Mounzer, O., Pedrero, F., Nortes, P.A., Alcobendas, R., Romero-Trigueros C., Bayona, J.M., Maestre-Valero, J.F. 2016. Long-term physiological and agronomic responses of mandarin trees to irrigation with saline reclaimed water. *Agricultural Water Management* 166: 1-8. (Corrigendum 169: 193).
- Pedrero, F. 2010. Sustainable irrigation management with reclaimed water. Doctoral Thesis. Departamento de Riego. Centro de Edafología y Biología aplicada al Segura. CEBAS-CSIC, Murcia, España. 143 pp.
- Pedrero, F., Alarcón, J.J. 2009. Effects of treated wastewater irrigation on lemon trees. *Desalination*. 246: 631-639.
- Pedrero, F., Alarcón, J.J., García, A.J., Nortes, P.A., Abellán, M. 2014. From agricultural wastewater use to Intelligent Reclaim Irrigation System (IRIS) in the

- Region of Murcia. IWA Regional Symposium on Water, Wastewater and Environment: Traditions and Culture. Patras (Greece).
- Pedrero, F., Maestre, J.F., Mounzer, O., Alarcón, J.J., Nicolás, E. 2014. Physiological and agronomic mandarin trees performance under saline reclaimed water combined with regulated deficit irrigation. *Agricultural Water Management* 146: 228-237.
  - Pedrero, F., Maestre-Valero, J.F., Mounzer, O., Nortes, P.A., Alcobendas, R., Romero-Trigueros, C., Bayona, J.M., Alarcón, J.J., Nicolás, E. 2015. Response of Young 'Star Ruby' grapefruit trees to regulated deficit irrigation with saline reclaimed water. *Agricultural Water Management* 158: 51-60.
  - Pedrero, F., Mounzer, O., Alarcón, J.J., Bayona, J.M., Nicolás, E. 2013. The viability of irrigating mandarin trees with saline reclaimed water in a semi-arid Mediterranean region: a preliminary assessment. *Irrigation Science* 31: 759-768.
  - Pereira, B.F.F., He, Z.L., Stoffella, P.J., Melfi, A.J. 2011. Reclaimed wastewater: Effects on citrus nutrition. *Agricultural Water Management* 98: 1828-1833.
  - Ramos, C. 1996. El riego con aguas residuales. Aprovechamiento del agua depurada en la Comunidad Valenciana. *Sanejament d'Aigües-Generalitat Valenciana*. pp. 49-63.
  - Reboll, V., Cerezo, M., Roig, A., Flors, V., Lapeña, V., García-Agustín, P. 2000. Influence of wastewater vs groundwater on young Citrus trees. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 80: 1441-1446.
  - Segura, M.L., Moreno, R., Martínez, S., Pérez, J., Moreno, J. 2001. Effects of wastewater irrigation on melon growth under greenhouse conditions. *Acta Horticulturae* 559: 345-352.
  - SGOP. 1991. Estudio de la situación actual de las aguas subterráneas del Polígono II del Pla de Sant Jordi. Informe interno.
  - WHO (World Health Organization). 2006. Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. *Wastewater Use in Agriculture*, Vol. 2, Geneva (Italy).
  - Zekri, M., Koo, R.C.J. 1993. A reclaimed water citrus irrigation project. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society* 106: 30-35.
  - Zekri, M., Koo, R.C.J. 1994. Treated municipal wastewater for citrus irrigation. *Journal of Plant Physiology* 17: 693-708.

## ACCESOS WEB

<https://www.caib.es/sites/sitibsa/ca/ideib-81258/>

### 3 SUELOS



### ***INCIDENCIA DEL RIEGO CON AGUAS RESIDUALES REGENERADAS SOBRE EL SUELO***

## APARTADO 3. SUELOS

### 3.1 INTRODUCCIÓN

El suministro de agua mediante el riego es una acción, generalmente, positiva que facilita el crecimiento vegetal, ya sea de cultivos agrícolas, ornamentales o incluso vegetación natural.

En zonas áridas o semiáridas, donde el agua es un recurso escaso, las aguas residuales regeneradas suponen un potencial que permite sustituir aguas de más calidad y aumentar las superficies de cultivos de regadío. También, en zonas donde se ha producido un deterioro de la calidad de agua de riego por salinización, como es el caso de *les Illes Balears*, el aprovechamiento de las aguas regeneradas permite mantener la actividad agrícola de regadío y recuperar recursos hídricos subterráneos.

Los efectos del riego dependerán de las características del agua utilizada, más específicamente de los elementos minerales, sustancias orgánicas y organismos que puedan incluir. De esta forma, pueden afectar a las características funcionales del suelo, al crecimiento vegetal, a los organismos edáficos o trasladarse a través de la cadena trófica a niveles superiores.

La concentración de elementos contaminantes o potencialmente negativos para el suelo dependerán de la naturaleza del agua tratada y de la eficacia del proceso de regeneración (Toze, 2006). En *les Illes Balears*, los niveles de elementos contaminantes asociados a las aguas regeneradas son generalmente bajos (Adrover et al., 2007) y si el proceso de depuración es correcto, la población de organismos patógenos queda atenuada.

La salinidad del agua de riego constituye un parámetro difícil de evitar, ya que combina la salinidad propia con la del uso doméstico o municipal, especialmente si las aguas ya han sido reutilizadas.

Las ventajas del uso en agricultura de las aguas regeneradas superan, en la mayoría de los casos, los inconvenientes identificados. Al hecho de usarlas como recurso hídrico hay que incluir la aportación de nitrógeno, fósforo y otros elementos que suponen un beneficio desde un punto de vista agronómico. Del mismo modo que existe consenso en valorar positivamente el efecto del riego con aguas regeneradas sobre la fertilidad del suelo, son muchas las referencias que constatan los efectos negativos de las sales y el sodio sobre esta. En algunos casos el efecto negativo de la salinización se mantiene a medio plazo (Xu et al., 2010), siendo necesaria una vigilancia periódica. En el apartado de salinidad del suelo se va a desarrollar con más detalle este factor.

## **3.2 METODOLOGÍA, CONDICIONES AMBIENTALES Y SU CARACTERIZACIÓN**

### **3.2.1 Caracterización edáfica**

Al poner un suelo en regadío es necesario conocer sus características físicas y químicas que determinan, además de la aptitud agrícola, su adecuación a las exigencias del riego.

La textura del suelo, el contenido de materia orgánica y la estructuración del suelo son unos primeros indicadores de la porosidad del suelo. Las texturas más finas, con dominio de arcillas y limos son las que tienen una mayor capacidad de retención de agua. La materia orgánica es otro factor que contribuye a la retención de agua. Mantener la estructura del suelo, sobretodo en el horizonte superior, es un factor favorecedor de su porosidad, parámetro clave para asegurar una buena circulación de los fluidos (aire y agua).

Cuando el suelo está bien estructurado y la distribución de la porosidad es adecuada, se mantiene el equilibrio entre los macroporos, que aseguran la circulación del aire y el agua, junto con los microporos, que aseguran la retención de agua para disponer de una reserva propia. La administración del riego se facilita al asegurar la infiltración y reducir los problemas de encharcamiento que conducen a una aireación deficiente, que traen consigo problemas de asfixia radicular.

La capacidad de retención de agua, establecida a partir de la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente, constituye la referencia para establecer dosis de riego ajustadas a las particularidades de cada suelo.

La composición química del suelo también es importante para asegurar el suministro de nutrientes, afectando también a las propiedades fisicoquímicas. Los carbonatos de calcio constituyen un constituyente muy importante con algunas connotaciones negativas, pero otras muy positivas. Los carbonatos de calcio y magnesio, propios de suelos desarrollados sobre rocas calizas, afectan a la química del suelo creando unas condiciones de pH básico que limita la disponibilidad de algunos elementos minerales necesarios para el crecimiento vegetal. Al mismo tiempo, se facilita la disponibilidad de calcio y magnesio para las plantas. La presencia de calcio y magnesio en el suelo también tienen un efecto protector muy importante ante la incorporación de sodio a través del agua de riego.

El sodio es un elemento asociado a la salinidad de las aguas de riego y, las aguas residuales se caracterizan por tener contenidos por lo menos más elevados en este ión que el de las aguas de suministro urbano. Este elemento tiene un efecto dispersante sobre el suelo, que puede afectar a la estabilidad de sus agregados. El efecto es negativo si se produce un dominio de este elemento en la solución del suelo. El calcio y el magnesio tienen un efecto que contrarresta el provocado por el sodio, por lo que la presencia de carbonatos constituye un elemento protector para la estabilidad de los agregados del suelo.

Otros parámetros como el pH o la salinidad del suelo son importantes para una buena gestión del riego. El pH es un indicador de la distribución de los iones en el suelo y es un factor clave sobre la química de nutrientes y metales pesados. En general, suelos con pH ácidos presentan una mayor solubilidad de los elementos químicos, facilitando la asimilación para las plantas. En el caso de metales pesados, su movilidad se traduce en un riesgo de que se incorporen a la cadena trófica proporcionalmente.

Los suelos sobre rocas margosas (Figura 18 A) se caracterizan por una alta capacidad de retención de agua, baja infiltración y alto contenido de carbonatos, requiriendo riegos ajustados para evitar encharcamientos. Cuando la textura del suelo es gruesa o hay una alta proporción de elementos gruesos (B) se facilita una mayor porosidad del suelo, facilitando el desarrollo de las raíces y la infiltración de agua. En los suelos rojos mediterráneos (C y D) la fertilidad química es elevada y los altos contenidos de arcillas en profundidad contribuyen a la retención de agua. En general están bien estructurados y el riego no ofrece problemas. Las costras calizas (E) pueden suponer una fuerte limitación para el desarrollo radicular y, en ocasiones para la infiltración del agua de riego. Cuando la costra caliza supone una limitación para el desarrollo radicular y no presenta una alta consistencia, se puede aumentar el volumen de suelo explorable por las raíces mediante labores profundas de subsolado (F). En estas condiciones la capacidad de retención de agua del suelo es considerable y es recomendable ajustar el riego para evitar problemas de saturación en los horizontes inferiores.

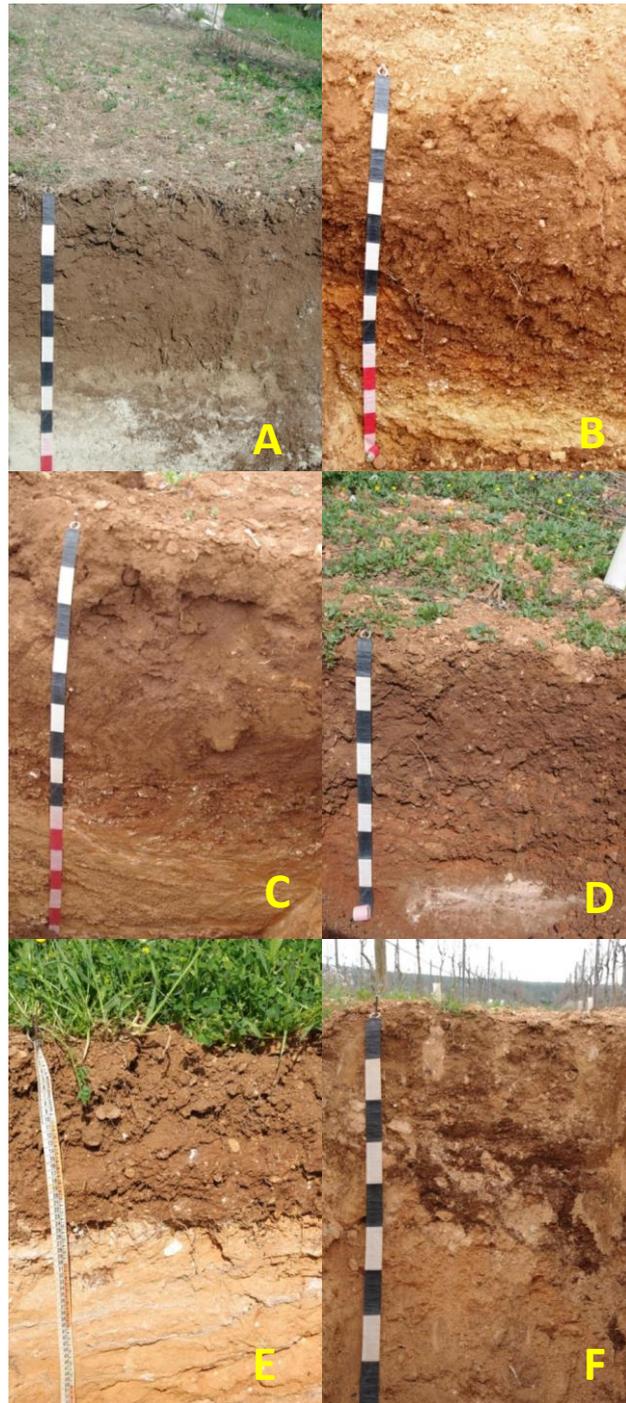


Figura 18. La adecuación de los suelos al cultivo y riego con aguas regeneradas varía en función de sus características. La abertura de calicatas permite diagnosticar con detalle las particularidades del suelo que condicionarán el desarrollo radicular, la infiltración y la retención de agua.

Nota: En la fotografía E la escala de la cinta está en cm. En el resto de fotografías los segmentos de la cinta miden 10 cm.

### 3.2.2 Caracterización climática

La planificación del riego requiere conocer la demanda hídrica a lo largo del tiempo. Las necesidades hídricas de la vegetación o los cultivos están indicadas a partir de la evapotranspiración potencial (ETP).

El periodo de riego de forma habitual se extiende, en *les Illes Balears*, desde mediados de primavera hasta principios de otoño, el cual se puede modificar en función del régimen de precipitaciones concreto de cada año. En la Figura 19 se representa un diagrama ombrotérmico típico de *les Illes Balears*. En la segunda parte del otoño y en invierno el agua de lluvia es, en la mayoría de años, suficiente para las necesidades hídricas de las plantas. En algunos momentos las lluvias superan la capacidad de retención de agua del suelo, infiltrándose el agua y alimentando los acuíferos. En este proceso de infiltración arrastra diferentes elementos minerales, entre ellos las sales, provocando un lavado que mantiene las concentraciones de sales en niveles, habitualmente, bajos.

Tras este apartado introductorio, los restantes pretenden evaluar los efectos del riego con aguas residuales regeneradas sobre la fertilidad de los suelos.

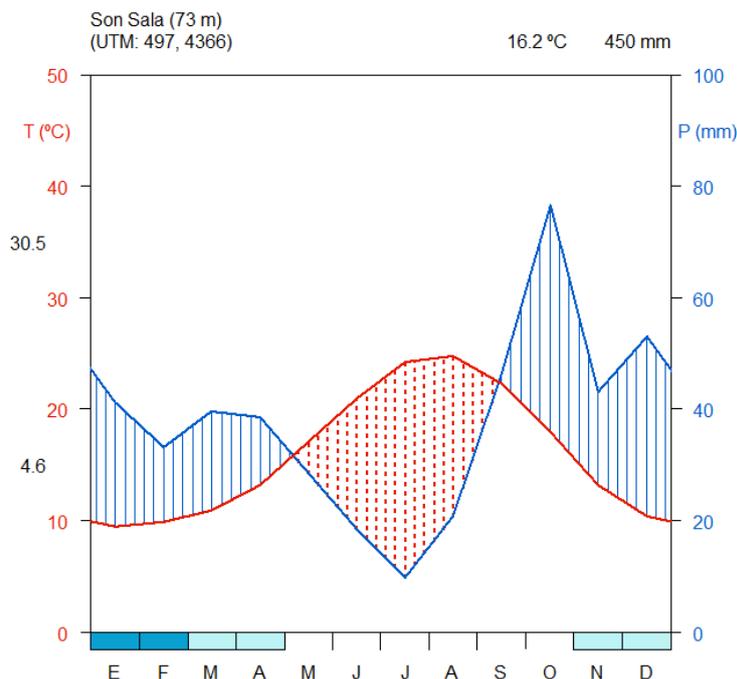


Figura 19. Diagrama ombrotérmico característico de *les Illes Balears*. En otoño e invierno, con temperaturas bajas, se concentran la mayor parte de las precipitaciones. En primavera y en verano, con alta demanda hídrica y escasas precipitaciones el riego constituye un complemento básico para asegurar una disponibilidad hídrica suficiente.

### 3.3 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DEL SUELO

#### 3.3.1 Salinidad del suelo

La salinización del suelo es un problema común cuando se riega con agua que lleva incorporadas sales. El contenido de sales de la solución del suelo siempre será superior al del agua de riego, con el riesgo de que se produzca un incremento progresivo a lo largo del tiempo por acumulación, afectando negativamente a las propiedades del suelo y al crecimiento de los cultivos.

La concentración de sales de las aguas regeneradas varía en función de la procedencia, siendo siempre superiores al agua de consumo doméstico. Oster y Rhoades (1984) indican que la concentración salina de las aguas residuales se sitúa entre 200 y 500 mg L<sup>-1</sup>, por encima de las concentraciones observadas en las aguas de abastecimiento público. La sal común (cloruro sódico) constituye el factor de salinización más característico y, en el caso de *les Illes Balears*, procede del uso doméstico de aguas subterráneas afectadas por la intrusión marina, sales residuales presentes después del tratamiento en plantas de desalinización, por las aportaciones de los sistemas domésticos de descalcificación y otros vertidos.

En cuanto a aspectos metodológicos, las determinaciones analíticas que permiten cuantificar la salinidad del suelo son básicamente dos: la conductividad eléctrica de una suspensión suelo: agua 1:5 (identificada como prueba previa de salinidad) o del extracto de pasta saturada.

En el primer caso, consiste en realizar una suspensión de suelo y agua en la proporción indicada, agitarlo durante un tiempo para asegurar la completa disolución de las sales, posterior decantación de las partículas sólidas mediante filtrado o centrifugación y determinación del contenido de sales de la disolución acuosa a partir de la conductividad eléctrica.

El extracto de pasta saturada se desarrolla mediante una metodología similar, de procedimiento más laborioso. La muestra de suelo se humecta con la cantidad de agua mínima que permita elaborar una masa de barro completamente húmeda pero sin que se derrame el agua. Una vez obtenida la masa (pasta saturada), se deja reposar un tiempo para asegurar que se alcance el equilibrio iónico y finalmente se procede a la decantación de un volumen de agua que permita la cuantificación de la salinidad y, eventualmente, otras determinaciones analíticas.

Existe una relación directa entre la conductividad eléctrica y el contenido de sales. Se puede calcular, de forma aproximada, el contenido de sales de una disolución a partir de la fórmula:

$$\text{Concentración sales disueltas} = \text{CE } dS m^{-1} \times 0,64 \frac{g}{dS m^{-1}}$$

Donde:

CE: conductividad eléctrica  
g: gramos (concentración)

Para atenuar los efectos de la salinidad sobre el suelo es importante regar con un volumen de agua superior a la requerida para alcanzar la capacidad de campo del suelo con el objetivo de favorecer la percolación de parte de las sales (Corwin et al., 2007; Letey et al., 2011). La eliminación relativa de sales será tanto mayor cuanto más agua percole. Al agua de riego "extra" que se aplica para arrastrar parte de las sales se conoce como "fracción de lavado".

### 3.3.2 Fracción de lavado

La fracción de lavado fue definida originalmente como el valor más bajo de la dosis de riego que podría ser permitido manteniendo una salinidad del suelo sin que llegase a ser excesiva para el crecimiento óptimo de las plantas.

Uno de los procedimientos más utilizados para establecer la fracción de lavado (FL) es el propuesto por Ayers y Westcot (1985), expresado en la siguiente fórmula:

$$FL = \frac{CEa}{5 \times CE_s - CEa}$$

Siendo CEa la conductividad eléctrica del agua de riego y CE<sub>s</sub>: conductividad eléctrica del suelo en la cual el cultivo ve reducido su producción potencial máxima en un 10%.

El coeficiente obtenido se aplica sobre la dosis de riego a aplicar para alcanzar la capacidad de campo del suelo en el entorno radicular.

El uso de acolchados, que reduzcan la evaporación directa desde el suelo, constituye una práctica útil, ya que reducen las necesidades de agua y, además, evitan las acumulaciones de sales en la superficie del suelo.

El efecto beneficioso para los cultivos de la eliminación de sales en el suelo tiene algunas consecuencias ambientales negativas que es importante considerar. Primeramente la aplicación de una fracción extra de agua (fracción de lavado) supone aumentar el consumo de un recurso limitado como es el agua, si bien hay que considerar que la calidad agronómica del agua, expresada en este caso a través de la salinidad, tiene esta limitación. El segundo aspecto afecta a la reserva de agua subterránea. Las sales lavadas en el suelo son incorporadas al agua subterránea, suponiendo un deterioro de este recurso. Por otro lado, al favorecer la percolación se incrementan las pérdidas de elementos minerales, suponiendo una reducción de la fertilidad del suelo.

Las lluvias otoñales y de invierno contribuyen a eliminar las sales del suelo, recuperando, en años normales con suficiente percolación natural, los niveles mínimos de salinidad del suelo. Este proceso permite recuperar el suelo, aparentemente, a la situación de partida antes de iniciar el riego (Figura 20 y Tabla 35).

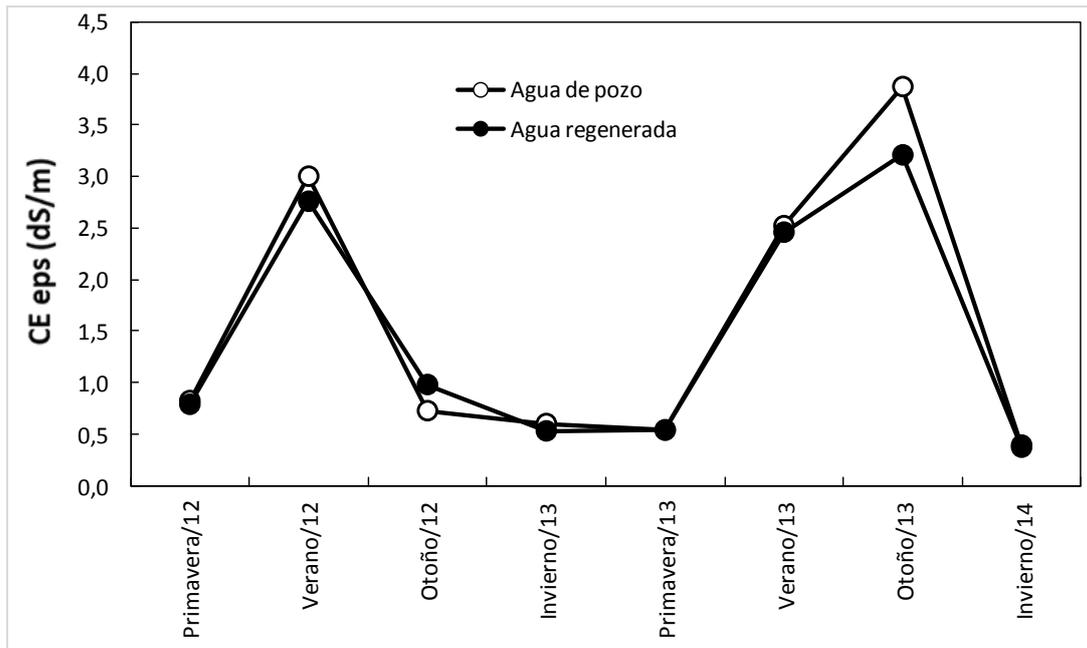


Figura 20. Evolución de la salinidad del suelo (conductividad eléctrica del extracto de pasta saturada; CE eps, dS/m, 25 °C) a lo largo del año en la capa arable de un suelo regado con agua regenerada y con agua de pozo (agua subterránea) en Maria de la Salut (Mallorca). El periodo de riego se extiende desde mediados de la primavera hasta el inicio del otoño. A partir de mediados de otoño hasta el inicio de la primavera las lluvias provocan el lavado de las sales acumuladas con el riego estival.

Tabla 35: Conductividad eléctrica del extracto de pasta saturada (CE eps, dS/m, 25 °C) de suelos regados con aguas de pozo y regeneradas en cultivos de viña de vinificación en Santa María del Camí. Valores medios acompañados de la desviación típica, obtenidos a partir de cuatro (capa superior) o dos (capa inferior) muestras compuestas entre el verano de 2012 y el invierno de 2014.

| Profundidad (cm) | Agua de riego | CE eps (dS/m; 25 °C) |             |
|------------------|---------------|----------------------|-------------|
|                  |               | Verano               | Invierno    |
| 0-20             | pozo          | 1,09 ± 0,57          | 0,39 ± 0,10 |
| 20-40            | pozo          | 0,63 ± 0,09          | 0,37 ± 0,04 |
| 0-20             | regenerada    | 1,12 ± 0,16          | 0,36 ± 0,10 |
| 20-40            | regenerada    | 1,19 ± 0,34          | 0,34 ± 0,18 |

El incremento de la salinidad que se produce en el periodo de riego, reflejado en la Figura 20 y en la Tabla 35, es atribuible a la concentración de sales presentes tanto en el agua regenerada como la de pozo. El cloruro sódico es la sal predominante, quedando patente a través de la Figura 21 y la Tabla 36 donde se indican dos ejemplos de este hecho.

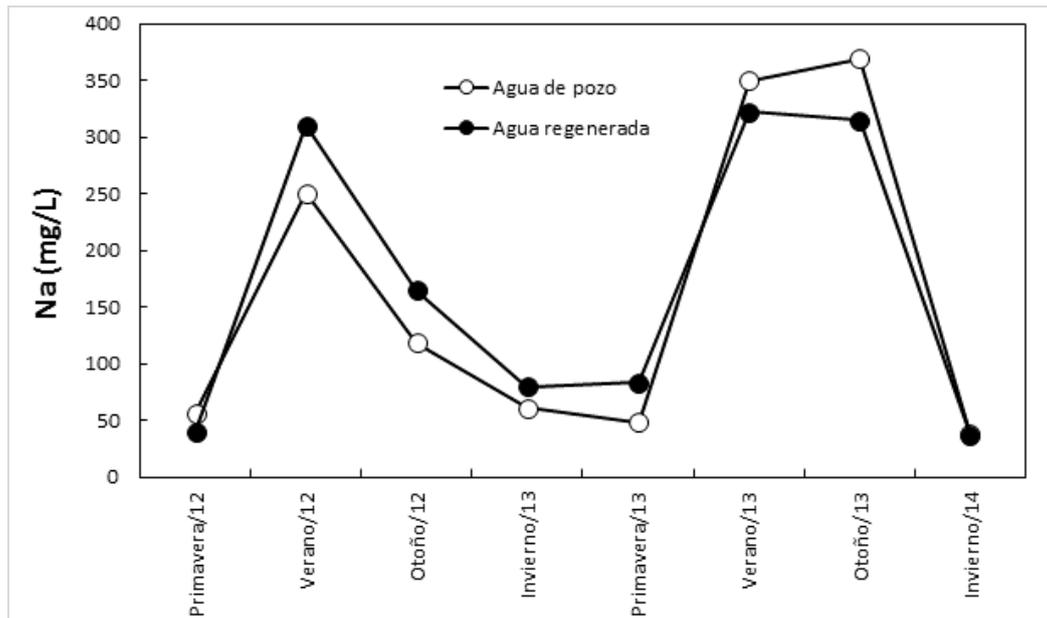


Figura 21. Evolución del contenido de sodio (Na) del extracto de pasta saturada en dos tratamientos: parcelas regadas con aguas regeneradas y parcelas regadas con agua de pozo (agua subterránea) en Maria de la Salut (Mallorca). Esta figura complementa a la Figura 21.

Tabla 36: Concentración de sodio (Na) del extracto de pasta saturada (eps) en suelos regados con aguas de pozo y regeneradas en cultivos de viña de vinificación en Santa María del Camí. Valores medios acompañados de la desviación típica, obtenidos a partir de cuatro (capa superior) o dos (capa inferior) muestras compuestas entre el verano de 2012 y el invierno de 2014. Estos resultados complementan los indicados en la Tabla 35.

| Profundidad (cm) | Agua de riego | Na eps (mg/L) |             |
|------------------|---------------|---------------|-------------|
|                  |               | Verano        | Invierno    |
| 0-20             | pozo          | 71,4 ± 34,8   | 23,3 ± 9,1  |
| 20-40            | pozo          | 65,8 ± 7,0    | 33,3 ± 1,3  |
| 0-20             | regenerada    | 119,3 ± 4,5   | 25,5 ± 15,7 |
| 20-40            | regenerada    | 144,3 ± 56,7  | 27,4 ± 38,7 |

Por otra parte, existe una fuerte relación entre la conductividad eléctrica y el contenido de sodio medidos sobre el extracto de pasta saturada. En la Figura 22 se representa esta relación a partir de las muestras medidas en distintas parcelas regadas con aguas regeneradas y de pozo de Mallorca.

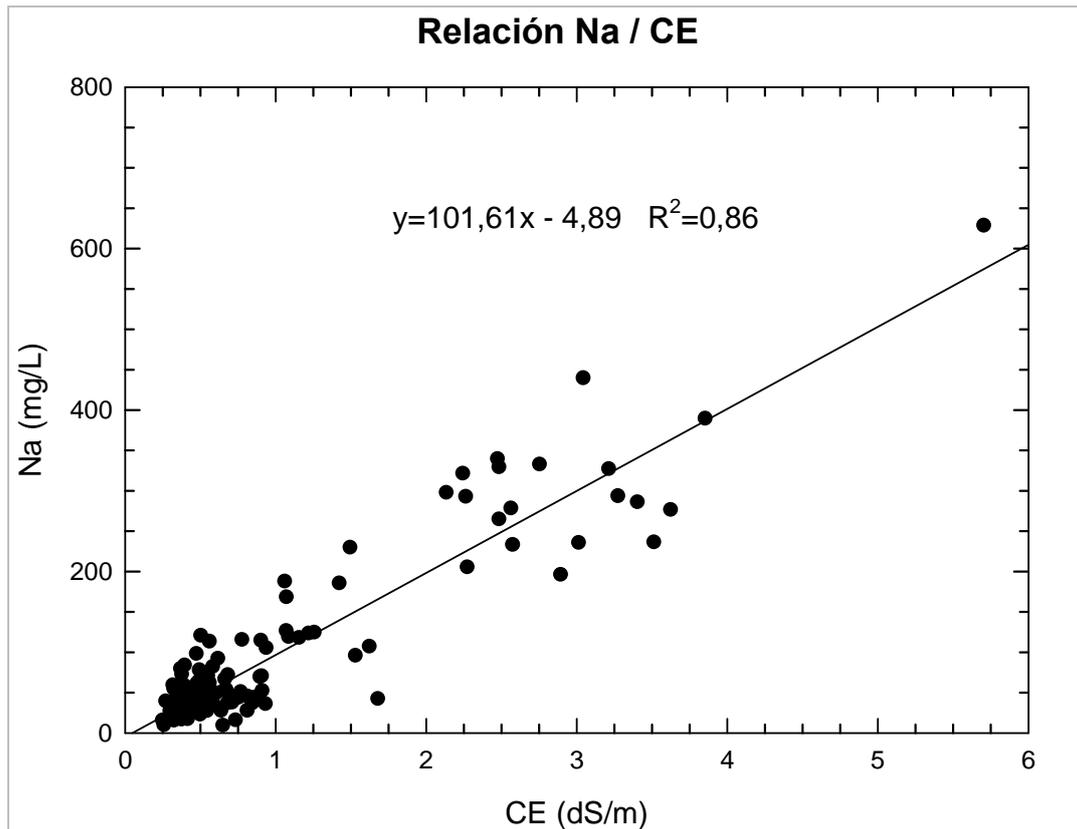


Figura 22. Relación entre la conductividad eléctrica del extracto de pasta saturada (CE) y el contenido de sodio (Na) en parcelas regadas con aguas regeneradas y aguas de pozo (aguas subterráneas) medidas en diferentes épocas del año. Las muestras corresponden a la Isla de Mallorca.

En cuanto a la salinidad, las recomendaciones básicas en el manejo del agua de riego regenerada son:

- 1) Conocer las características del agua regenerada de riego, especialmente la salinidad.
- 2) Elegir, o aplicar a, cultivos tolerantes al contenido de sales que se incorporen al suelo.
- 3) Evitar la acumulación de sales en el suelo, usando acolchados en los casos que sea factible y aplicando fracciones de lavado, mínimas, cuando la concentración de sales del suelo pueda comprometer el desarrollo de los cultivos.
- 4) Gestionar el agua regenerada, teniendo en cuenta que es un recurso escaso y el uso inadecuado repercute en el deterioro de la calidad del suelo y del agua del acuífero.

### 3.3.3 Sodiedad. Dispersión de arcillas y de los agregados del suelo

El sodio constituye es un elemento conflictivo en los suelos agrícolas. Para la mayoría de plantas cultivadas constituye un elemento no necesario si bien para otras es reconocida su función beneficiosa (Roy et al., 2006). En conjunto, los efectos perjudiciales superan a los beneficios que pueda ocasionar, al ser los requerimientos,

cuando es necesario, a nivel de micronutrientes. En cambio, cuando su disponibilidad es elevada puede ser asimilado en cantidades importantes, suplantando al potasio y generando problemas de toxicidad.

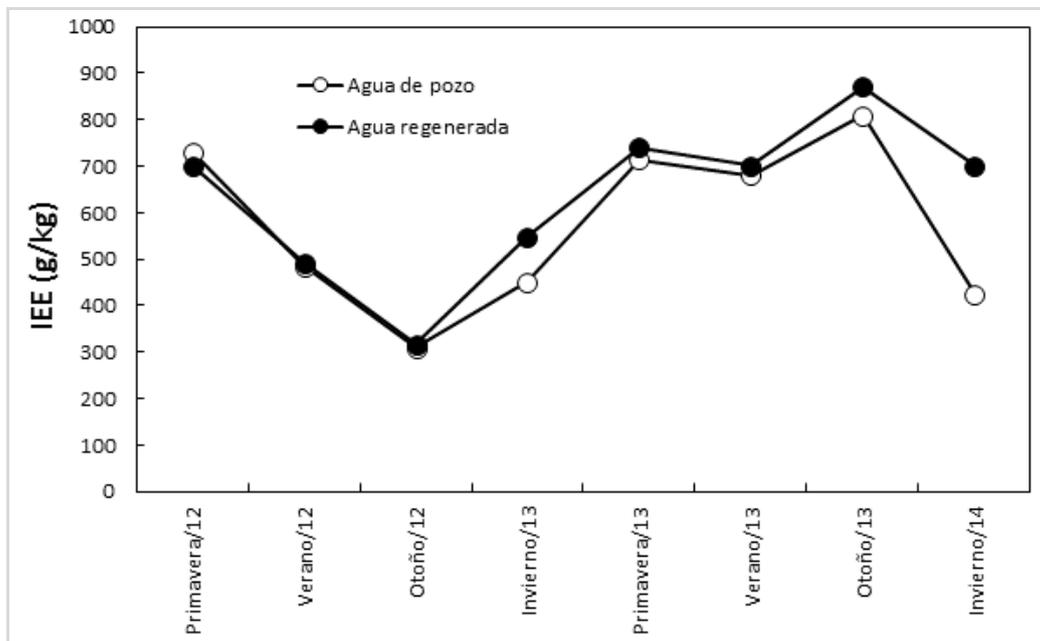


Figura 23. Evolución del índice de estabilidad estructural (IEE) a lo largo del año. Las variaciones a lo largo del año son notorias, en función del estado de los agregados en el momento del muestreo. En general la tendencia de las muestras regadas con aguas regeneradas es similar a la obtenida en las parcelas regadas con agua de pozo (agua subterránea). Este seguimiento se realizó en las parcelas experimentales del Huerto Piloto Ariany.

A nivel físico, también genera problemas, al ser un ion dispersante de las arcillas, provocando la desestructuración de los agregados del suelo y facilitando la lixiviación de las arcillas (Hamilton et al., 2007).

La desestructuración de los agregados provoca una disminución de la porosidad, especialmente de los macroporos, lo cual dificulta la circulación del agua y el aire, afectando de forma negativa al suministro de oxígeno al sistema radicular. Al mismo tiempo, al disminuir la porosidad, las tasas de infiltración del agua disminuyen por lo que el suelo es más vulnerable ante los procesos de erosión hídrica.

La presencia de calcio y magnesio son factores que frenan los efectos negativos del sodio. Al ser iones divalentes y, además, con aptitud estructurante, contrarrestan los efectos perjudiciales del sodio. Por este motivo, los suelos calcáreos, en los cuales el calcio es un elemento abundante, la presencia de sodio adquiere menor relevancia.

La materia orgánica es un factor básico en la estructuración del suelo (Tisdall y Oades, 1982). Su presencia, favorece la unión de las partículas minerales, dando cohesión a los agregados y facilitando el mantenimiento del espacio poroso, sobre todo los macroporos que facilitan la circulación de aire y agua.

Para evaluar los riesgos que puede provocar el sodio sobre el suelo se recurre habitualmente a dos índices, el porcentaje de sodio intercambiable y la relación de adsorción de sodio (Porta et al., 2003).

El porcentaje de sodio intercambiable (PSI) es un índice utilizado para investigar la estabilidad del suelo y, también, con fines taxonómicos:

$$\text{PSI} = \frac{\text{CSI}}{\text{CIC}} \times 100$$

Siendo:

CSI: concentración de sodio intercambiable ( $\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$ ).

CIC: capacidad de intercambio catiónico ( $\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$ ).

La relación de adsorción de sodio (RAS) es un índice que se utiliza para evaluar la calidad del agua de riego y para el agua del suelo. Es una medida más fácil de realizar y más precisa que el PSI. Se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}{2}}}$$

Expresando las respectivas concentraciones en  $\text{mmol}_{(+)} \text{L}^{-1}$  o  $\text{meq L}^{-1}$ .

Los valores de RAS entre 6 y 9 del agua de riego marcan la aparición de problemas de permeabilidad, dependiendo de la presencia y tipología de arcillas. Las arcillas expandibles como las esmectitas son más sensibles ante estos procesos que las no expandibles como las illitas o la caolinita.

De hecho, el *Real Decreto 1620/2007* indica que la RAS, como valor de referencia para usos agrícolas, no debe superar el valor de 6.

La estabilidad de los agregados del suelo se puede determinar a partir de diferentes metodologías que miden la vulnerabilidad ante los agentes erosivos, típicamente el agua. Por ejemplo, el método propuesto por Kemper y Rosenau (1982) mide la cantidad de agregados del suelo entre 1 y 2 mm que se mantienen estables al sumergirlos repetidas veces en agua. A partir de este índice tenemos un conocimiento aproximado del comportamiento del suelo ante la entrada de agua a través de la lluvia o el riego.

La recomendación básica en el manejo del agua de riego regenerada en relación a la sodicidad, es vigilar la aparición de síntomas indicadores de la pérdida de porosidad del suelo. Aquellas situaciones en las que la infiltración del agua sea defectuosa, produciéndose encharcamiento superficial o amplia extensión del área de humectación, pueden ser indicadoras de una pérdida de la estructura del suelo. En estos casos, la aplicación previa de materia orgánica puede ser un factor atenuador. El lavado de sales también tendrá un efecto beneficioso.

### 3.3.4 Contenido en metales pesados del suelo

Los metales pesados son elementos que se encuentran en el medio ambiente, habitualmente en concentraciones bajas (Tabla 37). Algunos de ellos como el cadmio, el cromo o el plomo, cuando se encuentran en concentraciones elevadas, suponen una amenaza para los organismos del ecosistema, desde los microorganismos hasta las personas.

Tabla 37: Concentración (mg/kg) de diferentes elementos traza en suelos agrícolas de Mallorca usados en el estudio del efecto del riego con aguas regeneradas sobre el suelo. Los niveles registrados son habituales para los suelos de la región y no se ha podido constatar ningún incremento apreciable en los suelos que se han usado aguas regeneradas.

|                             | As   | B    | Cd  | Cu   | Cr   | Mn    | Ni   | Pb   | Zn    |
|-----------------------------|------|------|-----|------|------|-------|------|------|-------|
| <b>Huerto Piloto Ariany</b> | 12,8 | 43,8 | 0,4 | 24,9 | 43,1 | 541,6 | 28,1 | 13,6 | 54,4  |
| <b>Son Catiu</b>            | 15,3 | 37,3 | 0,4 | 30,8 | 47,0 | 370,4 | 26,8 | 13,9 | 51,0  |
| <b>Can Frontera</b>         | 17,3 | 44,4 | 0,6 | 29,1 | 73,8 | 464,1 | 33,2 | 33,7 | 110,1 |
| <b>Viña Bodega Angel</b>    | 26,2 | 52,8 | 0,5 | 41,4 | 72,4 | 634,2 | 35,7 | 24,1 | 83,6  |
| <b>Viña depuradora</b>      | 29,8 | 57,1 | 0,9 | 34,4 | 85,0 | 769,0 | 47,8 | 29,8 | 108,5 |
| <b>Santa María del Camí</b> |      |      |     |      |      |       |      |      |       |
| <b>Viña Ariany</b>          | 19,7 | 41,7 | 0,5 | 38,1 | 59,9 | 734,6 | 37,0 | 21,1 | 78,9  |
| <b>Viña Pla de Buc</b>      | 20,7 | 43,3 | 0,5 | 42,0 | 68,5 | 568,5 | 35,7 | 23,3 | 92,1  |

Los vertidos domésticos y, sobre todo, los industriales a la red de aguas residuales constituyen fuentes de una gran variedad de sustancias entre las que se incluyen los metales pesados. Estos elementos químicos quedan adsorbidos mayoritariamente a los lodos, siendo las concentraciones del agua regenerada, normalmente baja.

En situaciones en las que el proceso de depuración es defectuoso y se aportan concentraciones elevadas de material particulado y, además se una el hecho de que se puedan verter metales pesados (por ejemplo, industrias que trabajan el metal, plásticos, bisutería, pinturas, etc.) el agua puede contener concentraciones elevadas de algunos de estos elementos, constituyendo por tanto un riesgo medioambiental.

En circunstancias de ejecución correcta de los procesos, desde los vertidos hasta los tratamientos de depuración las concentraciones de dichos elementos es baja y, aparentemente, no suponen un riesgo para el medio edáfico. Como práctica preventiva es recomendable disponer de un estudio analítico del suelo, antes de iniciar el riego regular, para conocer las concentraciones de partida para posteriormente, en periodos de entre 15 y 20 años, realizar análisis de seguimiento para conocer el impacto y establecer medidas correctoras.

La experiencia del riego con aguas residuales depuradas en la isla de Mallorca desde la década de 1970, periodo durante el cual los procesos de depuración no estaban ajustados, produjeron con frecuencia concentraciones elevadas de partículas que dejaron sedimentos orgánicos en la superficie de los campos de cultivo. Las concentraciones de metales pesados se mantienen, en la mayoría de parcelas, con

valores similares a las tierras que no se han regado nunca. Sin embargo, en algunas parcelas se han detectado ligeros incrementos de elementos como el plomo o el cromo, atribuibles al riego de aguas residuales de origen urbano (Adrover et al., 2007). Presumiblemente los incrementos de cromo pueden estar vinculados a antiguos vertidos de la industria de curtido de pieles; y en el caso del plomo, al uso de cañerías de este material junto con su uso en los combustibles. Estas evidencias ponen de manifiesto la necesidad de establecer medidas de seguimiento para evitar el deterioro de la calidad de los suelos.

Para evitar los problemas de contaminación del suelo, el Real Decreto 1620/2007 establece unos valores de referencia de las aguas regeneradas para su uso agrícola: boro: 0,5 mg/L; arsénico: 0,1 mg/L; berilio: 0,1 mg/L; c: 0,01 mg/L; cobalto: 0,05 mg/L; cromo: 0,1 mg/L; cobre: 0,2 mg/L; manganeso: 0,2 mg/L; molibdeno: 0,01 mg/L; níquel: 0,2 mg/L; selenio: 0,02 mg/L y vanadio: 0,1 mg/L.

Las recomendaciones básicas en el manejo del agua de riego regenerada para evitar el incremento de las concentraciones de metales pesados son:

- 1) Disponer de un análisis previo al riego con aguas regeneradas para conocer los niveles de base de los metales pesados del suelo.
- 2) Asegurarse de que no se producen vertidos incontrolados de metales pesados en la red de saneamiento y los procesos de depuración son correctos.
- 3) Realizar un seguimiento, a medio plazo cada 15 a 20 años, para comprobar las concentraciones de los metales pesados en el suelo.

### 3.3.5 Substancias orgánicas: contaminantes emergentes

Durante décadas, la comunidad científica ha centrado sus esfuerzos en el estudio de los contaminantes químicos cuya presencia en el medio ambiente ha estado o está regulada en las distintas legislaciones, contaminantes en su mayoría apolares, tóxicos, persistentes y bioacumulables, como los hidrocarburos aromáticos policíclicos, los policlorobifenilos (PCBs) o las dioxinas (Barceló y López, 2008).

Además de las sustancias citadas, existe una gran diversidad de otras sustancias orgánicas de origen antrópico que se encuentran de forma ocasional o habitual en las aguas residuales y, algunas de ellas, persisten después de los procesos de depuración. Globalmente reciben el nombre de contaminantes emergentes y se encuentran en cantidades muy reducidas. Las técnicas analíticas modernas, con capacidad para identificar sustancias a muy bajas concentraciones, han posibilitado su identificación, constituyendo líneas de investigación actuales.

Entre los contaminantes emergentes más relevantes se pueden señalar los retardantes de llama bromados, cloroalcanos, pesticidas polares, compuestos perfluorados, residuos farmacéuticos, productos de cuidado personal (protectores solares, fragancias), drogas de abuso y los metabolitos y/o productos de degradación de las clases de sustancias anteriores. A pesar de que su introducción en el medio

ambiente es antigua, su estudio ha adquirido relevancia en los últimos años. Son compuestos de los cuales se sabe relativamente poco o nada acerca de su presencia e impacto en los distintos compartimentos. Las aguas residuales tratadas constituyen la principal fuente de estas sustancias y la mayoría no se eliminan con los sistemas de tratamiento actuales en las estaciones de aguas residuales (EDARs).

En la actualidad se han descrito numerosos efectos nocivos de estas sustancias sobre animales, plantas y microorganismos. Efectos adversos sobre la fecundidad y reproducibilidad de peces y otros organismos afectados están entre los efectos más conocidos. Además pueden acumularse en sedimentos, bioacumularse y biomagnificarse en los organismos, llegando a incorporarse a la cadena trófica.

En España, uno de los primeros casos estudiados en el litoral mediterráneo fue el del río Llobregat, alrededor del año 2000. Los niveles de estrógenos y detergentes de tipo alquilfenol etoxilado medidos en aguas y sedimentos en dos de los principales afluentes del Llobregat fueron positivamente correlacionados con efectos de tipo estrogénico en peces, efectos que quedaron evidenciados, por ejemplo, con la aparición de peces intersex (peces con órganos reproductores masculinos y femeninos simultáneamente) (González et al., 2012).

Otros estudios realizados en esta cuenca han evidenciado, además, la presencia de cloroparafinas de cadena corta (detectadas en agua a concentraciones de entre 0,3 y 2,1 µg/L), drogas de abuso (detectadas a concentraciones de hasta 3,5 ng/L en el caso del éxtasis, y 10 y 111 ng/L, respectivamente, en el caso de la cocaína y su principal metabolito, la benzoilecgonina) (Huerta-Fontela et al., 2007), fármacos y productos para el cuidado y la higiene personal (ibuprofeno, diclofenaco, ácido clofíbrico, ácido acetilsalicílico y triclosan, detectados a concentraciones normalmente por debajo de 250 ng/L) y plaguicidas polares (2,4-D, MCPA, mecoprop y propanil, detectados a concentraciones inferiores por lo general a 100 ng/L) (Kuster et al., 2008). Además se ha comprobado que algunos de estos compuestos, que inicialmente no producen efectos nocivos, se pueden transformar en productos tóxicos en los tratamientos en las EDARs.

Otra particularidad de estos compuestos es que debido a su elevada producción y consumo y a la continua introducción de los mismos en el medio ambiente, no necesitan ser persistentes para ocasionar efectos negativos (Petrovic et al., 2003).

Muy pocos de estos compuestos están incluidos como contaminantes prioritarios en la normativa europea, y la gran mayoría no está regulada todavía por ninguna legislación, ni europea ni española. El conocimiento que se va adquiriendo en la actualidad los hace candidatos a ser incluidos en las próximas normativas europeas sobre calidad de las aguas.

La eficacia de los distintos sistemas de tratamiento de las aguas residuales constituye otro tema de investigación, con el objetivo de verter al medio ambiente aguas con los menores niveles posibles de estas sustancias (Luo et al., 2014).

Las recomendaciones básicas en el manejo del agua de riego regenerada, para evitar la incidencia de sustancias contaminantes emergentes es difícil de precisar, debido a la escasa información disponible. Es recomendable aplicar, en todos los casos, el principio de precaución, ajustándose de forma rigurosa a las normas establecidas sobre el manejo de las aguas residuales regeneradas.

### 3.3.6 Organismos patógenos

Los organismos patógenos constituyen uno de los mayores riesgos en el manejo de aguas regeneradas. El agua cruda que entra en las plantas de tratamiento contiene una gran concentración de microorganismos, algunos de los cuales constituyen un riesgo para la salud de animales y personas.

Los organismos patógenos más habituales son los nematodos, helmintos, bacterias y virus. La diversidad potencial de organismos patógenos es muy amplia, siendo una vía de contaminación habitual de los suelos y los cultivos cuando se riegan con aguas residuales no tratadas o con un nivel de depuración insuficiente. Estos organismos son transferidos a los consumidores y, en los lugares donde se riega con aguas residuales no tratadas, la incidencia de algunas infecciones es especialmente elevada.

Los procesos de regeneración establecen una serie de mecanismos que reducen o eliminan la mayoría de organismos patógenos, estableciéndose además sistemas de control a partir de la detección de organismos indicadores para garantizar la baja inocuidad de estas aguas.

Para el aprovechamiento agrícola de las aguas regeneradas, el Real Decreto 1620/2007 establece los niveles de nemátodos intestinales y de *Escherichia coli* que pueden albergar las aguas residuales depuradas para los distintos usos. Además, cuando procede, en función del uso se tiene que asegurar los límites de *Taenia*, *Salmonella* o *Legionella* spp.

Los usuarios de aguas regeneradas deben ser conscientes de que el agua regenerada es un recurso ambiental de alto interés agronómico, sobre el cual se establecen mecanismos de control para asegurar la inocuidad ambiental y sobre la cadena trófica, considerando las personas como consumidores finales.

A pesar de la garantía en el uso de estas aguas que se ofrece a partir de los mecanismos de control, existe un riesgo potencial latente por el que, en circunstancias puntuales, alguna sustancia u organismo patógeno puede traspasar las barreras establecidas, y causar un eventual problema sobre el medio ambiente o los consumidores.

Aparentemente, los riesgos son bajos, pero los usuarios deben ser conocedores de los peligros que puede engendrar el uso de aguas residuales insuficientemente tratadas, evitando su uso en el riego de especies vegetales que tengan contacto con el agua y se consuman en fresco, o recurriendo a sistemas de riego que eviten el contacto directo del agua con partes comestibles de las plantas.

La aplicación del principio de precaución es la garantía adicional que reducirá los riesgos a niveles mínimos. Por otra parte, es importante subrayar que en este proceso los usuarios directos del agua residual son las personas más expuestas a los riesgos potenciales que conllevan esta agua, ajustándose siempre a las normas establecidas a través del Real Decreto 1620/2007.

### **3.4 CONCLUSIONES. EFECTO DEL RIEGO CON AGUAS REGENERADAS SOBRE LA FERTILIDAD DEL SUELO**

A nivel internacional, existen numerosos estudios que evalúan el efecto del riego con aguas residuales tratadas sobre la fertilidad del suelo. Los parámetros sobre los que se hace mayor incidencia son los contenidos en materia orgánica, nitrógeno total, fósforo soluble y capacidad de intercambio catiónico (Chen et al., 2015).

En general se constata que los suelos regados con aguas residuales tienen contenidos en materia orgánica más elevados, atribuible a varios factores: el riego favorece la producción de biomasa vegetal por lo que se produce un incremento en la generación de residuos que se traduce finalmente en un incremento de materia orgánica del suelo. Por otra parte, los sólidos en suspensión constituyen un material particulado, mayoritariamente orgánico y una fuente de materia orgánica a considerar.

El incremento de materia orgánica en el suelo conlleva un aumento del contenido de nitrógeno orgánico, asociado al humus del suelo, por lo que se produce un incremento de este elemento en el suelo, además del que llega al suelo en forma inorgánica.

El fósforo constituye un elemento muy presente en las aguas residuales y, a través del riego, puede llegar en cantidades significativas a las tierras de cultivo. Desde una perspectiva agronómica, el aporte de fósforo mediante el agua regenerada constituye un beneficio complementario al disminuir las necesidades de aporte de abonos.

La capacidad de intercambio catiónico es un parámetro indicador de las cargas eléctricas negativas que se generan en el entorno de los minerales de arcilla y el humus posibilitando la adsorción de cationes, muchos de ellos necesarios para la nutrición mineral de las plantas. En general, en los suelos regados con aguas regeneradas, si se produce un incremento del contenido de materia orgánica, aumenta la capacidad de intercambio catiónico.

Los parámetros biológicos son indicadores de la salud y la calidad ambiental de los suelos. Estudios realizados en el Pla de Sant Jordi (Mallorca) para evaluar el estado de suelo regados con aguas residuales tratadas durante un periodo de más de 20 años se ha podido constatar como presentan niveles de biomasa microbiana del suelo y actividades enzimáticas elevadas (Adrover et al., 2012), concluyendo que el uso de estas aguas han tenido un efecto positivo sobre la salud del suelo. De forma similar los contenidos de materia orgánica y nitrógeno total se mantienen en valores elevados.

Desde una perspectiva funcional, el uso de las aguas regeneradas está dirigido a la producción vegetal. El seguimiento de cultivos de alfalfa regados con aguas regeneradas en el Pla de Sant Jordi (Mallorca) ha puesto de manifiesto que el uso de estas aguas permite mantener una buena producción forrajera (Adrover y Vadell, 2007; Vadell et al., 2015).

Las recomendaciones prácticas han sido insertadas a lo largo del capítulo a término de sus respectivos apartados.

### 3.5 BIBLIOGRAFÍA

- Adrover, M. & Vadell, J. 2007. El reg amb aigües regenerades. Quaderns d'Investigació n. 8. Conselleria d'Agricultura i Pesca; Govern de *les Illes Balears*.
- Adrover, M., Farrús, E., Moyà, G. & Vadell, J. 2012. Chemical properties and biological activity in soils of Mallorca following twenty years of treated wastewater irrigation. *Journal of Environmental Management*, 95, S188-S192.
- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. 1985. *Water quality for agriculture* Vol. 29, pp. 37-70. Rome: FAO.
- Barceló, D., & López de Alda, M. J. 2008. Contaminación y calidad química del agua: el problema de los contaminantes emergentes. Jornadas de presentación de resultados: el estado ecológico de las masas de agua. Panel científico-técnico de seguimiento de la política de aguas, Sevilla, 26 pp.
- Chen, W., Lu, S., Pan, N., Wang, Y., & Wu, L. 2015. Impact of reclaimed water irrigation on soil health in urban green areas. *Chemosphere*, 119, 654-661.
- Corwin, D. L., Rhoades, J. D., & Šimůnek, J. 2007. Leaching requirement for soil salinity control: Steady-state versus transient models. *Agricultural Water Management*, 90, 165-180.
- González, S., López-Roldán, R., & Cortina, J. L. 2012. Presence and biological effects of emerging contaminants in Llobregat River basin: a review. *Environmental pollution*, 161, 83-92.
- Hamilton, A. J., Stagnitti, F., Xiong, X., Kreidl, S. L., Benke, K. K., & Maher, P. 2007. Wastewater irrigation: The state of play. *Vadose Zone Journal*, 64, 823-840.
- Huerta-Fontela, M., Galceran, M. T., & Ventura, F. 2007. Ultraperformance liquid chromatography-tandem mass spectrometry analysis of stimulatory drugs of abuse in wastewater and surface waters. *Analytical Chemistry*, 79, 3821-3829.
- Kemper, W.D., Rosenau, R.C. 1982. Aggregate stability and size distributions. En: Klute, A. ed. *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. American Society of Agronomy, Madison, 425-442.
- Kuster, M., de Alda, M. J. L., Hernando, M. D., Petrovic, M., Martín-Alonso, J., & Barceló, D. 2008. Analysis and occurrence of pharmaceuticals, estrogens, progestogens and polar pesticides in sewage treatment plant effluents, river water and drinking water in the Llobregat river basin Barcelona, Spain. *Journal of Hydrology*, 358, 112-123.
- Letey, J., Hoffman, G. J., Hopmans, J. W., Grattan, S. R., Suarez, D., Corwin, D. L., Dennis L.; Oster, J. D.; Wu, L., & Amrhein, C. 2011. Evaluation of soil salinity leaching requirement guidelines. *Agricultural Water Management*, 94, 502-506.
- Luo, Y., Guo, W., Ngo, H. Hao., Nghiem, L. Duc., Hai, F. Ibney., Zhang, J. & Liang, S. 2014. A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment. *Science of the Total Environment*, 473-474: 619-641.
- Oster J.D., & Rhoades, J.D. 1984. Water management for salinity and sodicity control. En: Pettygrove, G. S., & Asano, T. Eds.. *Irrigation with reclaimed municipal*

wastewater; a guidance manual. In CSWRSB Report Vol. 84. California State Water Resources Control Board. 159-178. [Versión en castellano: Mujeriego, R. 1990 Riego con agua residual municipal regenerada. Universitat Politècnica de Catalunya]

- Pedrero, F., Kalavrouziotis, I., Alarcón, J. J., Koukoulakis, P., & Asano, T. 2010. Use of treated municipal wastewater in irrigated agriculture—Review of some practices in Spain and Greece. *Agricultural Water Management*, 979, 1233-1241.
- Petrovic, M., Gonzalez, S., & Barceló, D. 2003. Analysis and removal of emerging contaminants in wastewater and drinking water. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2210, 685-696.
- Porta, J., López-Acevedo, M., Roquero, C. 2003. *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*, Editorial Mundiprensa.
- Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas BOE núm. 294 Sábado 8 diciembre 2007.
- Roy, R. N., Finck, A., Blair, G. J., & Tandon, H. L. S. 2006. Plant nutrition for food security. A guide for integrated nutrient management. *FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin*, 16.
- Tisdall, J. M., & Oades, J. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 332, 141-163.
- Toze, S. 2006. Reuse of effluent water—benefits and risks. *Agricultural Water Management*, 801, 147-159.
- Vadell, J., Adrover, M., Solivellas, J., Moyà, G., Nicolas, E., Mulet, S., Fernández, E., & Calero, R. 2015. Uso de aguas regeneradas para el riego de cultivos forrajeros en *les Illes Balears*. En: Cifre, J., Janer, I., Gulías, J., Jaume, J. & Medrano, H. 54<sup>a</sup> Reunión Científica de la Sociedad Española para el Estudio de los Pastos S.E.E.P. 2015. "Pastos y Forrajes para el siglo XXI", Mallorca, pp. 105-112.
- Xu, J., Wu, L., Chang, A. C., & Zhang, Y. 2010. Impact of long-term reclaimed wastewater irrigation on agricultural soils: a preliminary assessment. *Journal of Hazardous Materials*, 1831, 780-786.

## 4 BALSAS DE REGULACIÓN



### **PARÁMETROS INDICADORES DE CALIDAD DEL AGUA EN LAS BALSAS DE REGULACIÓN DE INCA Y ARIANY (MALLORCA)**

## APARTADO 4. BALSAS DE REGULACIÓN

### 4.1 INTRODUCCIÓN

La regeneración de aguas residuales tratadas para riego agrícola representa una buena alternativa en aquellas regiones con déficit hídrico potencial, como es el caso de la Mediterránea. El presente capítulo recoge las experiencias de cuatro años de trabajo, iniciados en diciembre de 2011 y finalizados en mayo de 2015, analizando la calidad del agua almacenada en dos balsas de regulación para riego situadas en los municipios de Inca y *Ariany*, en Mallorca. Ambas reciben agua procedente de estaciones depuradoras de aguas residuales.

Los estudios se han basado en el seguimiento y registro de diferentes parámetros fisicoquímicos y biológicos, el análisis de su variabilidad en función de los diferentes orígenes de tratamiento del agua, las diferentes morfometrías de las dos balsas y su gestión para el riego, y su incidencia sobre la calidad del agua.

La elevada variabilidad de las aguas residuales y las diferentes etapas de gestión de las balsas, con periodos de riego y otros de no uso del agua, han marcado las condiciones de esta y los resultados obtenidos. Las entradas y las salidas de agua, y los diferentes periodos de residencia del agua en la balsa, han sido determinantes en la dinámica de las diferentes variables escogidas para su análisis. Parámetros como la transparencia, la demanda bioquímica de oxígeno, las concentraciones bacterianas o los taxones del fitoplancton presentes en el agua, han servido como indicadores comparativos de la calidad de las aguas.

La naturalización de este tipo de agua, eminentemente alejada de su equilibrio natural, se ha manifestado en su colonización por parte de diferentes comunidades del plancton y en la observación de procesos que se dan frecuentemente en aguas naturales de la misma área geográfica. Es el caso de los episodios de aclarado que van ligados a la dinámica de las redes tróficas, y de los procesos de blanqueado que son consecuencia de las precipitaciones de carbonato cálcico.

### 4.2 OBJETIVOS

Los objetivos principales en esta línea de acción han sido:

1. Estudio de la evolución de la calidad del agua de riego almacenado en las balsas de regulación. Desarrollo e implementación de técnicas para su mejora cualitativa para el regadío.
2. Comprobar la eficiencia de los procesos de depuración a que ha sido sometida.

3. Establecer la eficiencia de los procesos mediatizados por los organismos que tienden a mejorar la calidad del agua almacenada.
4. Intentar establecer los tiempos de residencia óptimos del agua en las lagunas para alcanzar la máxima calidad.
5. Establecer parámetros de diseño y gestión, tales como la profundidad idónea de la toma en las distintas épocas del año.

#### 4.3 METODOLOGÍA

La gran heterogeneidad fisicoquímica y biológica de las aguas residuales, las distintas fases de gestión que hemos observado en las balsas, ligadas a los diferentes tiempos de residencia del agua, y, como consecuencia de ello, la variabilidad que se aprecia en los resultados obtenidos, han requerido sucesivas aproximaciones al estudio de las balsas, para poder precisar su modelo de funcionamiento de acuerdo con la necesidad de agua de calidad para el riego.

En cada una de las balsas se escogió un punto de profundidad máximo, teniendo en cuenta que la morfometría de las mismas es bastante homogénea, y se instaló una boya, estableciendo así un punto de muestreo fijo. Durante cada muestreo se realizaban tanto medidas *in situ* como la toma de muestras para su análisis en el laboratorio, en función de los datos obtenidos durante la medición del perfil vertical.

Inicialmente, las muestras se iban alternando en las dos balsas, siendo quincenales durante las épocas de uso del agua, marzo a octubre, y mensuales de noviembre a febrero. Durante el segundo año, con la incorporación de nuevas analíticas, las frecuencias de los muestreos se tuvieron que adaptar a las condiciones prioritarias de cada balsa. El año 2013, coincidiendo con la puesta en funcionamiento de la balsa de *Ariany*, se aumentó la intensidad de los muestreos en esta balsa.

Una vez estudiadas las dinámicas intrínsecas de las balsas y, con la intención de afinar, en el contexto específico de estas en el tiempo de residencia necesario para conseguir optimizar la calidad del agua, se han realizado los referidos estudios de seguimiento intensivo de la evolución del agua, durante los años 2014 y primer trimestre de 2015. Se ha considerado que éste es uno de los factores clave para obtener el máximo rendimiento de las balsas.

En este contexto, los procedimientos empleados han combinado seguimientos intensivos de la calidad del agua mediante analíticas rutinarias mensuales con analíticas más específicas, como la microbiología, para períodos de tiempo determinados.

La balsa escogida para estos seguimientos fue la de *Ariany*. La menor capacidad de almacenaje de esta balsa, 63.009 m<sup>3</sup> frente a los 201.000 m<sup>3</sup> de Inca, posibilitaría llevar a cabo el vaciado de la balsa y su posterior llenado con mayor facilidad. De este modo, primeramente se llevó a cabo el vaciado de la balsa hasta, aproximadamente,

un volumen inferior al 50 % de su capacidad. En estas condiciones se llevó a cabo un muestreo previo que sirvió como punto de partida de las condiciones del agua. Posteriormente se procedió al llenado de la balsa hasta su cota de desagüe por superficie.

## **4.4 RESULTADOS**

### **4.4.1 Tipificación de las balsas**

#### **Origen del agua residual tratada**

Los distintos procesos de tratamiento a los que se puede someter el agua residual determinarán las características y la calidad de los efluentes de las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDARs). El tipo de depuración del agua residual, bien sea primario, secundario o terciario, condicionará el origen del agua de entrada a las balsas de regulación. Así, resulta importante conocer el nivel de depuración del agua afluente, ya que su origen irá ligado a unos determinados valores de la carga orgánica, a la concentración de nutrientes y a la carga microbiológica.

En origen el agua residual que llega a la EDAR vendrá condicionada, por una parte, por su mineralización natural, propia de cada cuenca hidrográfica; y por otra, por el uso antrópico al que ha sido sometida. Así cabe distinguir entre aguas residuales domésticas, que generalmente presentaran una mayor carga orgánica, y aguas residuales de origen industrial, con composiciones muy variables en función de la actividad industrial que se desarrolle en la zona. Estas últimas son más susceptibles de incorporar contaminantes e iones en concentraciones muy alejadas del equilibrio químico del agua de origen, y que requerirán una especial atención en las EDARs.

En el caso del estudio realizado en las balsas de *Ariany* e *Inca*, el agua afluente, procedente de las EDARs, tienen un origen diferente. Mientras que en *Ariany* el agua proviene de un tratamiento secundario con una desinfección al final del proceso por cloración, en *Inca* la EDAR tiene tratamiento terciario, por lo que el agua de entrada habrá sido sometida a una mayor reducción de la carga orgánica (sólidos en suspensión, turbidez y microorganismos fecales). El agua residual que gestionan estas dos estaciones depuradoras es mayoritariamente de origen doméstico. Solo en *Inca*, y de forma casi testimonial, hay una mínima actividad industrial que no afecta de forma notoria a la calidad del agua regenerada.

En general cuando hablamos de aguas residuales regeneradas podemos decir que se trata de aguas eminentemente “artificiales”, a las cuales se les han ido añadiendo productos tanto en el recorrido del agua desde su origen como durante el tratamiento, y que, en general, presentarán tendencia a naturalizarse y a llegar al equilibrio químico, lo que supone una cierta inestabilidad en las características que presentan. Se puede decir que las aguas regeneradas presentan una gran variabilidad hasta en periodos muy breves de tiempo.

En principio, es de esperar que el agua almacenada en las balsas sea rica en nutrientes, y éstos permitirán el desarrollo de comunidades importantes de microalgas, con una mineralización variable en función de la cuenca hidrográfica, con un alto contenido mineral en las zonas con sustratos calcáreos como es el caso de Mallorca y buena parte de la cuenca mediterránea, y por tanto, con elevada alcalinidad. Finalmente, estará sometida a cambios en función de los usos del agua que determinaran las tasas de renovación en la propia balsa.

### Morfometría de las balsas

El diseño y capacidad de las balsas destinadas a almacenar el agua residual tratada para su maduración condicionarán su evolución y comportamiento a lo largo del tiempo. Las balsas con mayor capacidad serán menos susceptibles a los cambios producidos por la entrada de los afluentes procedentes de la EDAR. Generalmente esta mayor capacidad se asociará a una mayor profundidad de la balsa, parámetro que también afectará al agua almacenada, en tanto que la intensidad luminosa que llega al fondo de la balsa favorece los procesos de estratificación térmica del agua, que tiende al equilibrio con la temperatura ambiental. Esta estratificación conlleva la compartimentación de la balsa en diferentes capas de agua con condiciones, en ocasiones, dispares.

Las dos balsas objeto de estudio presentan importantes diferencias en cuanto a su capacidad máxima y, en menor medida, en cuanto a su profundidad. Por una parte tenemos la balsa de *Ariany*, con un volumen útil de almacenamiento de 63.009 m<sup>3</sup> y una altura máxima del agua de 4,75 m. En el caso de la balsa de Inca, de mayor tamaño, su capacidad de almacenamiento llega a los 201.000 m<sup>3</sup> con una profundidad máxima de 6,75 m (Figura 24). Estas diferencias han condicionado evoluciones diferentes del agua almacenada en ambos escenarios, tal y como se explica más adelante. Cabe mencionar que el sustrato de ambas balsas y el diseño del fondo son homogéneos.



#### BALSA DE INCA

- Capacidad: 201.000 m<sup>3</sup>
- Altura máxima: 7,25 m.
- Profundidad útil máxima: 6,75 m.



#### BALSA DE ARIANY

- Capacidad: 63.009 m<sup>3</sup>.
- Altura máxima: 5,65 m.
- Profundidad útil máxima: 4,75 m.

Figura 24. Fotografías aéreas de las balsas de regulación de Inca y *Ariany* y sus principales características morfométricas.

## Procesos de estratificación térmica

El agua almacenada en las balsas experimenta la incidencia de los factores climatológicos y ambientales externos, como ya ha sido mencionado. Así, las variaciones térmicas estacionales determinarán cambios en la temperatura del agua. De esta forma, las temperaturas mínimas del agua se registran durante los meses más fríos, y contrariamente sucede en las épocas cálidas.

Los cambios de temperatura provocarán variaciones en las propiedades del agua, entre ellas su densidad. Durante el verano el incremento térmico ambiental, ligado a la mayor intensidad y exposición al calor solar, provocará el aumento de la temperatura del agua disminuyendo su densidad. Al ser menos densa, el agua más caliente tenderá a situarse en las capas superficiales. Dicho aumento de la temperatura no afectará a toda la columna de agua por igual, dependiendo de la profundidad la exposición será mayor o menor, y, por tanto, las capas de agua con una menor temperatura, y mayor densidad, se situarán en el fondo. Esto provocará la formación de una gradación de la temperatura desde la superficie al fondo, con la aparición de una termoclina, que tendrá como consecuencia la compartimentación en diferentes estratos de agua con temperaturas y densidades distintas, con procesos de inversión y movimientos en la vertical a medida que varían las condiciones ambientales externas. Este proceso es mayor en balsas con profundidades menores, que determinarán procesos de estratificación y mezcla frecuentes, llegando a darse en ciclos diarios (día – noche). En cambio, las balsas con una mayor profundidad podrán mantenerse estratificadas durante meses, sin apenas respuesta a los cambios térmicos diarios.

Las balsas objeto de estudio presentan dos sistemas con marcadas diferencias en cuanto a su comportamiento térmico estacional. La balsa de Inca, con un mayor volumen de agua y una mayor profundidad, se muestra menos sensible a los cambios ambientales diarios, pero presenta una marcada estacionalidad. Así, durante la época estival puede presentar un importante gradiente térmico entre la superficie y el fondo, llegando a una diferencia térmica de más de 10 °C, como se pudo registrar durante el verano de 2012. Estos gradientes varían entre los 2 y los 10 °C, pudiendo mantener la balsa estratificada desde abril hasta octubre (Figura 25) si no se producen cambios significativos en la profundidad de la columna de agua.

Por otro lado, la balsa de *Ariany*, con un menor volumen y una menor profundidad, ha presentado una mayor dependencia de las condiciones ambientales exteriores. Así, la estratificación térmica se restringe exclusivamente a los meses de verano, es decir, finales de junio hasta principios de septiembre, siempre y cuando la balsa se encuentre por encima de los 4 metros de profundidad. Fuera de estos rangos, los ciclos día – noche afectan claramente al comportamiento del agua, produciéndose episodios de estratificación durante el día y mezcla durante la noche.

Evolución de la temperatura (°C) en la balsa de Inca marzo 2012 - octubre 2014

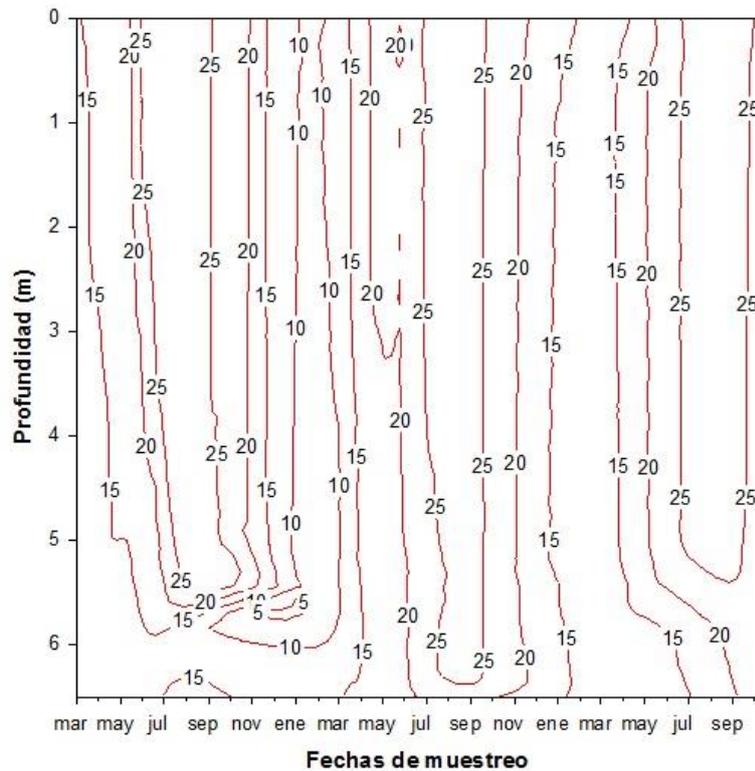


Figura 25: Representación gráfica con isólineas de las temperaturas registradas durante los años de estudio en la balsa de Inca, donde se pueden apreciar las estratificaciones térmicas que tienen lugar durante los meses más cálidos, con diferencias que llegan a los 10°C entre la superficie y el fondo de la balsa.

Por lo tanto, se han observado diferencias relacionadas con la profundidad de la balsa que condicionan la dinámica del agua almacenada. Además se registran, en un área geográfica relativamente muy pequeña, cambios en el comportamiento térmico del agua almacenada, por ejemplo la estratificación de la masa de agua impide procesos de intercambio gaseoso entre dichos compartimentos.

### Anoxia y condiciones reductoras

Ligados a la estratificación térmica y su consecuente compartimentación de la columna de agua, se producen cambios en las dinámicas de los gases disueltos. Las capas superficiales mantendrán el intercambio gaseoso con la atmósfera, siendo habituales, en el caso del oxígeno, situaciones de sobresaturación de este gas en las mismas. En cambio, las capas más profundas, por debajo de la termoclina, no podrán intercambiar gases con las más superficiales, pudiendo llegar a situaciones de agotamiento de las concentraciones de oxígeno al imponerse progresivamente su consumo por procesos de respiración sobre la producción. Este proceso conlleva la formación de zonas en condiciones de hipoxia, pudiendo llegar incluso a la anoxia.

La ausencia de oxígeno y las condiciones reductoras que derivan de la misma, inciden en la aparición de gases, como sulfhídrico y metano, y propician la solubilidad de los

metales. Este proceso está íntimamente relacionado con la vida de toda la fauna y la flora de la balsa, en función de su tolerancia a las bajas concentraciones de oxígeno. En estas condiciones, la degradación de la materia orgánica sedimentada en el fondo será mucho más lenta, como se refleja en el incremento generalizado del parámetro Demanda Biológica de Oxígeno ( $DBO_5$ ) en el fondo de la balsa. Por lo tanto, la estratificación de la columna de agua, tanto por la formación de la termoclina como por la posterior estratificación ligada al agotamiento de oxígeno, da origen a una oxiclina, estrechamente relacionada con el funcionamiento y evolución del agua en la balsa.

En el caso de balsas objeto de estudio, la de Inca, con más estabilidad en cuanto a estratificación térmica se refiere, presenta una mayor tendencia a la aparición de anoxia en el fondo, llegando incluso a tener más de dos metros de columna de agua con déficit de oxígeno durante meses, y una cierta variabilidad en la amplitud de esta última capa del perfil vertical.

Evolución del oxígeno (mg/L) en la balsa de Inca

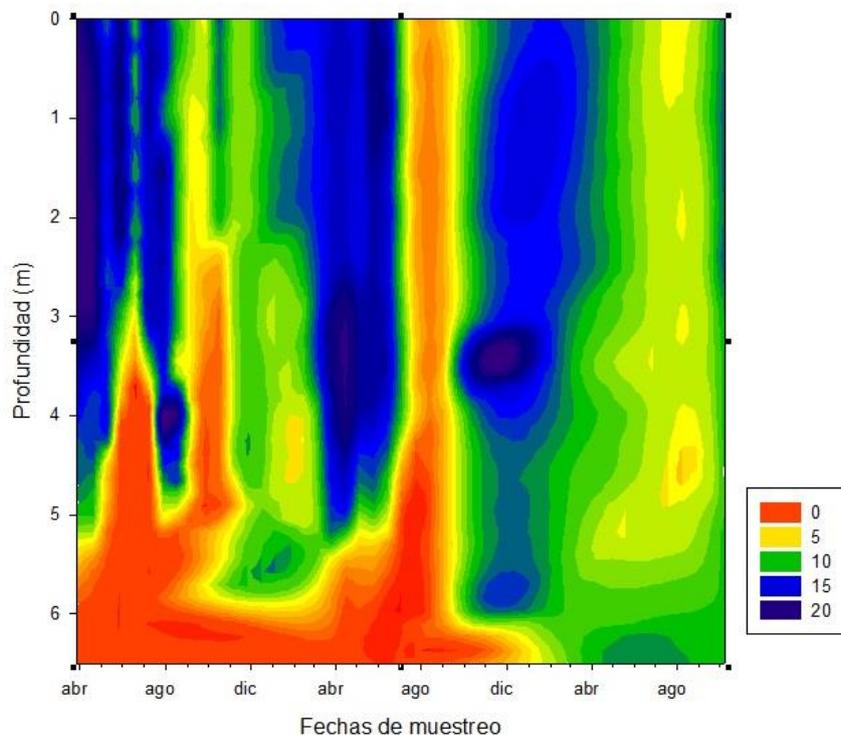


Figura 26. Evolución de las concentraciones de oxígeno (mg/L) entre marzo de 2012 y octubre de 2014 en la balsa de Inca, donde puede apreciarse la aparición de procesos de anoxia en el fondo de la balsa.

El volumen de agua no se ha mantenido en su nivel máximo durante todo el periodo de estudio, por lo que la aparición de anoxia en el fondo durante los meses de invierno es atribuible, en cierta medida, a extrapolaciones que realiza el programa usado para el trazado de las isolíneas.

En la balsa de *Ariany*, normalmente, la zona anóxica alcanza dimensiones menores, situándose siempre en el último metro más profundo de agua. Ahora bien, es habitual

que toda el agua de esta balsa presente concentraciones de oxígeno inferiores a los 4 mg O<sub>2</sub>/L, y por tanto, podemos hablar de condiciones cercanas a la hipoxia en toda la columna. Esto se produce como consecuencia de la inestabilidad de la estratificación térmica sometida a los cambios de temperatura ambiental día-noche, que provoca la movilización y mezcla de la columna de agua, con el ascenso de la capa anóxica hasta la superficie, lo que conlleva la disminución y homogenización de las concentraciones de oxígeno en toda la balsa.

Evolución del oxígeno (mg/L) en la laguna de Ariany

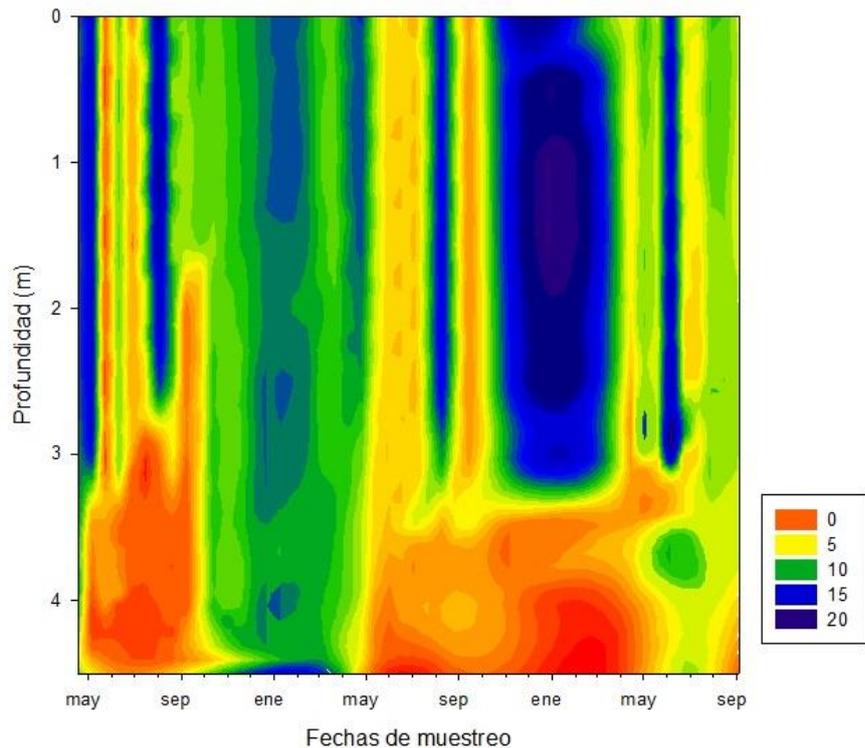


Figura 27. Evolución del oxígeno (mg/L) en la balsa de *Ariany* entre los meses de abril de 2012 y septiembre de 2014. Se puede apreciar la inestabilidad de la estratificación de la columna de agua de esta balsa, y la consecuente disminución de la concentración de oxígeno en toda la columna de agua.

La permanencia de una capa anóxica en el fondo de la balsa de Inca provoca que el agua de salida de la toma de fondo desprenda malos olores como consecuencia de la formación de gases reducidos originados en un ambiente sin oxígeno. La presencia de estos gases en el agua del hidrante alcanza a los usuarios, hecho que causó problemas durante el verano de 2012, cuando se recibieron quejas por los malos olores que desprendía el agua de riego.

Para intentar minimizar el problema se siguieron dos estrategias: por una parte se explicó a los usuarios el origen de los malos olores y su escasa incidencia sobre la calidad del agua. También la ausencia casi total de metales en solución, y que a pesar del incremento de la materia orgánica traducida en un aumento de la DBO<sub>5</sub> a esas profundidades, los valores siempre se mantenían por debajo de los límites exigidos en la legislación para el uso de aguas residuales regeneradas. Por otra parte, se optó por

disminuir el volumen de agua almacenada en la balsa, favoreciendo los procesos de mezcla que, como se ha explicado, tienen lugar en la balsa de *Ariany*, aunque con una columna de agua menor. De este modo se evita la estratificación térmica del agua y la formación de capas anóxicas.

En el caso de *Ariany*, la mezcla de las capas anóxicas con las superficiales y la correspondiente disminución de las concentraciones de oxígeno por debajo del umbral de hipoxia ( $4 - 2 \text{ mg O}_2/\text{L}$ ) podría impactar en los peces que habitan en las balsas y que no toleran las bajas concentraciones o la falta de oxígeno. Durante el periodo de estudio no se observó ningún episodio de mortandad de peces. En este sentido cabe precisar que la especie presente en las balsas es *Cyprinus carpio* o carpa común, caracterizada por tener una elevada tolerancia a las bajas concentraciones de oxígeno (Beamish, 1964).

#### 4.4.2 Química del agua

##### Mineralización: procesos de precipitación de carbonato cálcico

La naturaleza geológica de la cuenca hidrográfica que abastece las balsas reguladoras de aguas regeneradas determina su composición mineral. En el caso de la cuenca mediterránea, y en concreto en *les Illes Balears*, el sustrato calcáreo es el dominante, por lo que las aguas naturales de esta región tienen una gran concentración de carbonato cálcico, que otorga una elevada dureza al agua. Este será un importante factor a tener en cuenta, debido al efecto de acumulaciones de precipitados de carbonato cálcico en los sistemas de canalización del agua, con directas consecuencias, en general indeseables. Las elevadas concentraciones de carbonato cálcico proporcionan un carácter alcalino a las aguas de esta región, lo cual se traduce en valores básicos del pH del agua, en general superiores a 7,5 y llegando a alcanzar valores próximos a 10. Por tanto, el pH puede llegar a ser un factor limitante para el uso de aguas regeneradas para el riego.

Los máximos en los valores del pH coinciden con los llamados procesos de blanqueado del agua, ligados a la captación de  $\text{CO}_2$  por el fitoplancton y al incremento de la temperatura del agua, que disminuye la solubilidad del gas, aumenta el pH del agua y puede llegar a producir la precipitación de carbonato cálcico, con el directo blanqueamiento del agua superficial y presencia de precipitados de color blanco en las orillas de la balsa. Este tipo de procesos son frecuentes en regiones geográficas con sustrato calcáreo (Cabrera, 2007), y consisten en la cristalización de los carbonatos diluidos en el agua para formar cristales de calcita o aragonito, en función de la relación  $\text{Ca} / \text{Mg}$  en el agua.

Paralelamente, y asociados a la precipitación de carbonato cálcico, se produce una serie de efectos de gran interés para el funcionamiento de la balsa, entre los cuales hay que destacar la eliminación de parte del fósforo y del hierro en solución por precipitación química ligada a la de los cristales de carbonato cálcico, una importante disminución de la alcalinidad y el consiguiente incremento del pH, y un significativo aumento de la atenuación de la luz. El precipitado actúa como un filtro que retiene una

parte de la radiación incidente en la superficie del agua, lo que condiciona la actividad fotosintética del fitoplancton. En estas condiciones se puede hablar de un efecto de *feed back*, ya que al disminuir la actividad de las algas pueden recuperarse las concentraciones y niveles de fósforo, hierro, calcio, alcalinidad, pH y de las condiciones lumínicas de la balsa a la situación anterior. Estos procesos de precipitación de carbonato y blanqueo del agua duran entre 5 y 20 días, en función de las condiciones ambientales y de la actividad del fitoplancton.

El proceso ha sido observado, directa e indirectamente, durante varios muestreos de primavera - verano (Figura 28) en ambas balsas, con una especial incidencia en la de Inca. Durante las fases iniciales del mismo se registraron los valores mínimos de transparencia y alcalinidad y máximos de pH, con elevadas concentraciones de clorofila a.



Figura 28. Precipitado de carbonato cálcico en las orillas de la balsa de *Ariany*. Los cristales provocan el blanqueo de las lonas de la balsa, convirtiéndose éstas en un buen indicador de estos procesos. Dicha precipitación puede ser puntualmente ventajosa para los sistemas de conducción de agua, ya que conlleva una bajada en la concentración de carbonato cálcico dentro de la red.

## Salinidad

En los sistemas insulares y costeros, el contenido salino, de origen marino, también puede ser un factor importante en la mineralización del agua. La proximidad del mar a las fuentes de abastecimiento, ligada a una sobreexplotación de los recursos hídricos subterráneos, podrá provocar la entrada de agua marina en los acuíferos, aumentando su conductividad y su salinidad. Las concentraciones de cloruros y de sodio serán determinantes para el posterior uso del agua regenerada para riego. Las intrusiones salinas en los acuíferos de abastecimiento, agravadas en las zonas costeras, ven reducida gradualmente su influencia según nos adentramos hacia el interior de la Isla.

En nuestro caso, las balsas que se han sometido a estudio se sitúan relativamente lejos de la costa, por lo que el efecto de la intrusión de agua marina es previsiblemente nulo. En la balsa de Inca, las conductividades se mantuvieron entre los 1.100 y los 1.500  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , y la salinidad entre el 0,5 y el 0,76 ‰. El uso doméstico de agua provoca la adición de diferentes iones que modifican el contenido salino del agua, por lo que las conductividades obtenidas en la balsa de Inca se mantienen en valores propios de las aguas residuales de origen doméstico (Moreno, 1991).

En el caso de la balsa de *Ariany* los registros de la conductividad experimentaron una importante variabilidad, registrándose valores entre los 1.300 y los 2.600  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , y su salinidad osciló entre el 0,68 y el 1,38 ‰. En esta balsa se registraron también las máximas concentraciones de cloruros, llegando a superar los 600 mg/L. Aunque los cloruros formaron parte de los iones mayoritarios del agua, en la mayoría de los muestreos no se encontró una correlación directa entre las variaciones de la conductividad y los cambios en las concentraciones de este anión, que pudiesen explicar totalmente las variaciones registradas. Así, además de los cloruros, contribuyen significativamente a la conductividad otros iones macroconstituyentes tales como los carbonatos, bicarbonatos y sulfatos. Esta variabilidad en la balsa de *Ariany* es atribuible a la mayor diversidad en el origen del agua. La EDAR que proporciona el agua a la balsa recibe las aguas residuales de cuatro municipios con fuentes de abastecimiento diferentes, lo que trae emparejado conductividades diferentes desde la situación de partida, en función de la proporción del agua procedente de cada origen. A partir de la puesta en marcha del sistema de riego en la primavera de 2013, la conductividad de la balsa de *Ariany* disminuyó, alcanzando muy rara vez valores de conductividad superiores a los 1.800  $\mu\text{s}/\text{cm}$ . Tiempos de residencia adecuados, entre 20 y 25 días, permiten la disminución de la conductividad inicial del agua de entrada.

## pH

El pH de nuestras balsas se ve totalmente influido por el carácter alcalino de sus aguas originarias. Los procesos emparejados al uso del agua, como su tratamiento y maduración, condicionan la variación de este parámetro.

Uno de los vectores con mayor influencia en la variación del pH es la actividad fotosintética, que al eliminar  $\text{CO}_2$  del sistema provoca el aumento del pH. Otro factor que condicionará el pH será la temperatura, al disminuir o aumentar la solubilidad de los gases en función de su variación.

Un aspecto adicional digno de mención es que en las situaciones de estratificación de la columna de agua, los mínimos valores de pH se registran en las capas del fondo, ya que tanto la menor temperatura como el dominio de la respiración por encima de la producción favorecen la disminución del pH. En las balsas estudiadas se ha observado que el agua que sale por la toma de fondo tiene un pH neutralizado respecto a los valores de pH más alcalinos de la superficie. Ahora bien, pudimos observar como a medida que entraba en contacto con un ambiente bien oxigenado, el pH rápidamente recuperaba valores más básicos. Los análisis han permitido constatar una correlación

inversa entre los valores obtenidos de pH y la alcalinidad del agua, si bien, en la balsa de Inca (Figura 29), la reserva alcalina se mantuvo menos constante que en la balsa de *Ariany*, que registró una mayor variabilidad, atribuible a la mayor relevancia de los procesos de precipitación y re-disolución de carbonatos.

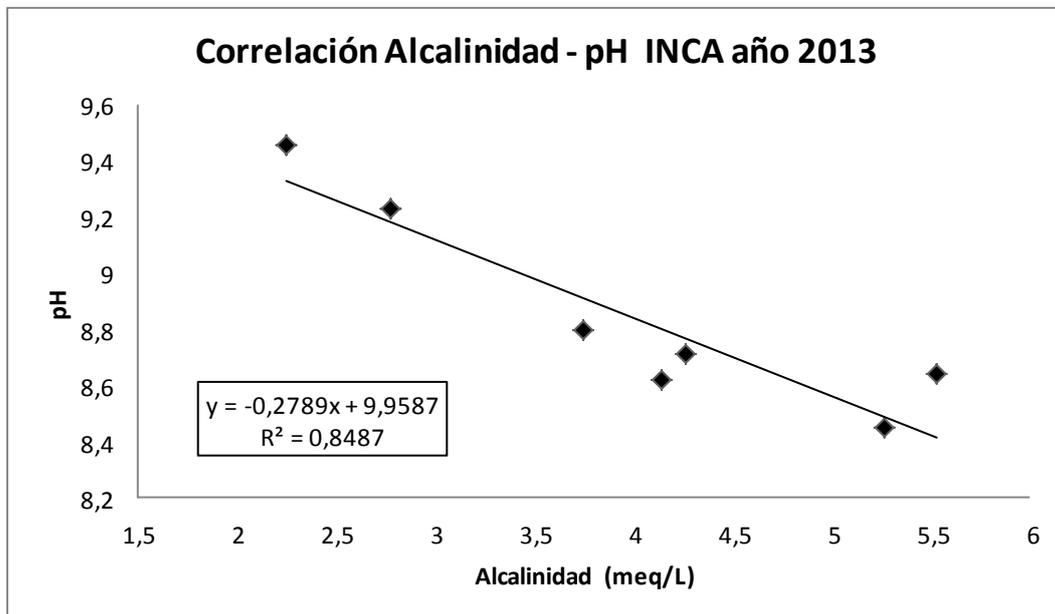


Figura 29. Correlación entre los parámetros alcalinidad y pH en la balsa de Inca durante el año 2013.

### Componentes minoritarios: nutrientes y metales

El uso doméstico e industrial de las aguas conlleva la incorporación de componentes de diferente origen, con mayores variaciones sobre el agua de origen y concentraciones entre límites más altos.

Los tratamientos de depuración de las aguas residuales provocan una reducción de las concentraciones de determinados compuestos, especialmente en el caso de la mayoría de los tratamientos terciarios, que basan parte de su proceso en la eliminación de nitrógeno y fósforo del agua. Estos dos elementos tienen una gran importancia en los ecosistemas acuáticos, ya que limitan el crecimiento de los productores primarios. Esto será de gran importancia en los efluentes de salida de las EDARS que desembocan en zonas sensibles, ya que podrán comportar serios problemas ambientales, tales como la eutrofización de ciertos ecosistemas.

De la misma forma, las balsas de regulación actúan como ecosistemas acuáticos de origen antrópico, por lo que se verán condicionadas por la entrada de estos dos elementos, que actuarán como nutrientes para las microalgas que se desarrollan en la balsa. Además de estos dos elementos, otros, como el hierro, también serán importantes para el desarrollo de las comunidades planctónicas que actúan en la maduración del agua residual tratada que llega a las balsas.

Si tenemos en cuenta el destino final de esta agua y su uso en agricultura, estos elementos minoritarios del agua tendrán una gran relevancia, ya que actuarán como fertilizantes y nutrientes para los cultivos.

Generalmente, el nitrógeno se incorporará en la laguna en forma orgánica y amoniacal (Reddy y Reddy, 1987). En condiciones aeróbicas, el amonio será oxidado a nitrito y rápidamente a nitrato, que será la forma mayoritaria y que servirá para el desarrollo de las comunidades algales. Si las concentraciones de materia orgánica son muy elevadas, el paso de amonio a nitrato puede darse más gradualmente, y como consecuencia, pueden aparecer concentraciones elevadas de la forma de oxidación intermedia, que pueden tener un importante efecto tóxico sobre las comunidades biológicas, especialmente sobre las poblaciones de peces (Colt et al., 1981).

El fósforo, normalmente, actúa como nutriente limitante, y por tanto determina el desarrollo de los microorganismos. En el caso de las aguas residuales tratadas, el fósforo no desempeña este papel tan limitante y se presentará mayoritariamente en forma de fósforo orgánico y fosforo soluble (Moreno, 1991).

En el caso de las balsas de Inca y *Ariany* las concentraciones de nitratos se mantuvieron generalmente entre los 3 y los 5 mg/L, con máximos de 7,76 mg/L en la balsa de *Ariany* y 10,48 mg/L en Inca, a pesar de disponer esta de tratamiento terciario. El efecto de este tratamiento puede haberse notado más en las concentraciones de fosfatos, que se han mantenido siempre menores en Inca, con valores máximos de 4,73 mg/L, y de 6,92 mg/L en *Ariany*, aunque habitualmente se situaron por debajo de los 2 mg/L.

En general, podemos hablar de concentraciones “bajas” para ambos nutrientes, que se explicarían, además de por los tratamientos realizados en las EDARS, por la incorporación de estos elementos por parte del fitoplancton. La incorporación del nitrógeno por parte de los productores primarios supondría la eliminación de éste del medio, y explicaría las deficiencias en este elemento que han presentado las aguas de las dos balsas. No obstante, a pesar de presentar concentraciones bajas, las comunidades algales encontradas en ambas balsas nos permite hablar de ecosistemas eutróficos, es decir, sistemas con una elevada disponibilidad de nutrientes para los productores primarios, que los van incorporando rápidamente y evitan su acumulación en el agua. Solo durante los períodos con baja concentración de clorofila a, se han registrado valores considerables de nitratos, llegando a superar, puntualmente, los 80 mg NO<sub>3</sub>/L. En estos casos es el fósforo el que actúa como elemento limitante para el desarrollo de las algas.

Otros componentes minoritarios de la mineralización del agua son los metales pesados, que en el caso de aguas residuales de origen industrial, podrán suponer un importante problema. Estos metales podrán incorporarse a los cultivos, permanecer en los suelos y finalmente ser lavados por el agua de escorrentía hacia las aguas subterráneas. Un buen ejemplo lo encontramos en una de las localizaciones de las balsas, más concretamente en Inca. La utilización durante años de cromo para el curtido de pieles supuso la incorporación de este metal pesado a los suelos de esta zona. Concentraciones destacables de este metal se encontraron durante la década

de los 90, a pesar de haberse dejado de utilizar más de diez años antes (Adrover, 2010).

Actualmente la industria peletera en Inca es muy reducida, por lo que las aguas de la EDAR pueden ser calificadas de tipo doméstico, tal y como muestran los análisis que se han realizado y las bajas concentraciones registradas de cromo y del resto de metales pesados. Igualmente en la balsa de *Ariany* las concentraciones de estos metales son muy bajas, por lo que no representan un problema para los cultivos.

## **Materia orgánica**

La fracción orgánica es la de mayor relevancia cuando hablamos de aguas residuales de origen doméstico. Durante su tratamiento en las EDAR buena parte del contenido orgánico presente en el agua es eliminado, ya sea por decantación, biodegradación o sedimentación, por lo que el agua de entrada a las balsas de maduración de aguas residuales tratadas tendrá cargas orgánicas menores.

Uno de los parámetros más habituales para medir el contenido orgánico del agua es la demanda biológica de oxígeno a los cinco días ( $DBO_5$ ). Los registros a la entrada de una EDAR municipal están entre los 100 y los 400 mg  $O_2/L$ , mientras que a su salida los valores se sitúan entre los 10 y los 100 mg  $O_2/L$ . Por lo tanto, el agua de entrada en la balsa se encontrará alrededor de estos últimos valores, aunque, generalmente, sufrirá un efecto de dilución al entrar en ella. Los valores más habituales en nuestras balsas se sitúan entre los 10 y los 20 mg  $O_2/L$ . Durante periodos muy concretos, coincidiendo con entradas frecuentes de agua de la EDAR o con episodios de grandes proliferaciones de fitoplancton, las  $DBO_5$  han alcanzado puntualmente valores de hasta 40 mg  $O_2/L$ , superando los 25 mg  $O_2/L$  que marca como máximo la *Directiva Europea 91/271* de vertido de aguas residuales. Los valores mínimos suelen registrarse durante los procesos de aclarado de las balsas y, como ha ocurrido en las balsas de estudio, durante la época invernal.

Igualmente, con la entrada del agua en la balsa, se produce una dilución de los sólidos en suspensión. En general, los valores registrados en las balsas se mantienen por debajo de los máximos establecidos por el Real Decreto 1620/2007, que sitúa el límite en los 35 mg/L. De la misma forma que ocurre con la  $DBO_5$ , situaciones concretas como la entrada de materia orgánica de forma continuada o el desarrollo del fitoplancton aumentarán las concentraciones de sólidos en suspensión, incrementando, además, la fracción orgánica de éstos.

En el caso de las dos balsas, los sólidos volátiles, que corresponden a la fracción orgánica de los sólidos en suspensión, representan entre el 70 y el 90 % del material particulado. Esto demuestra su gran importancia en la carga orgánica de las balsas, mayoritariamente de origen autóctono, en forma de biomasa del fitoplancton, y su decisiva contribución a la demanda biológica de oxígeno (Figura 30).

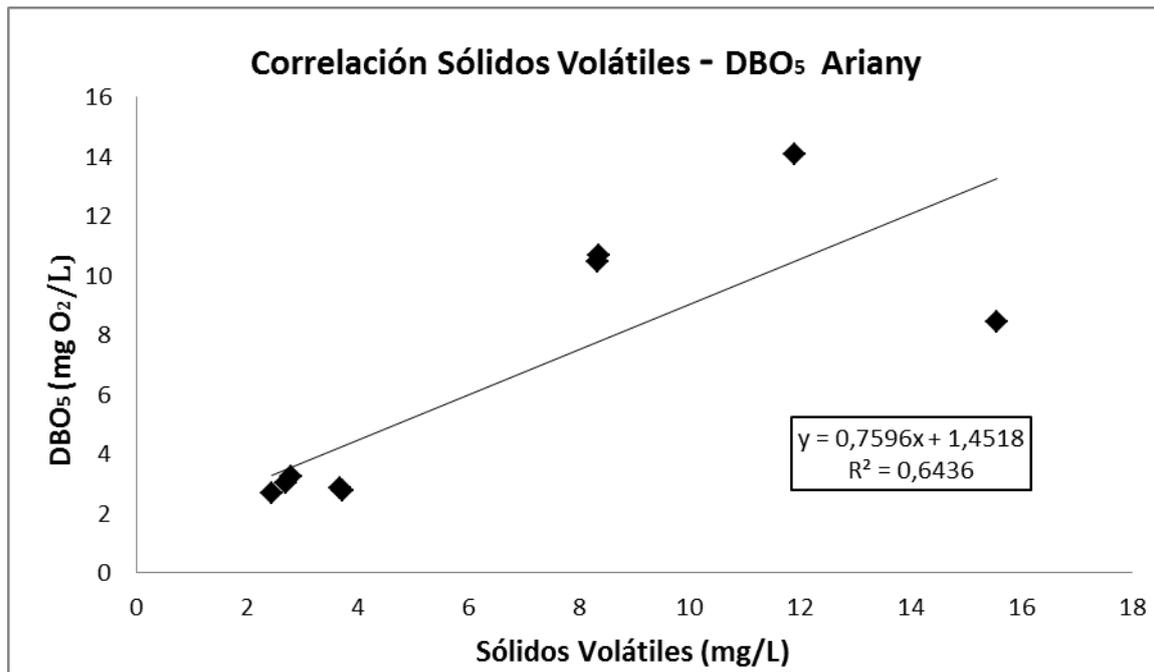


Figura 30. Correlación entre las concentraciones de sólidos volátiles y la demanda biológica de oxígeno en la balsa de *Ariany*.

La Figura 30 expone una alta correlación entre los registros de la DBO<sub>5</sub> y los sólidos volátiles presentes en la balsa de *Ariany* procedentes, en general, de la fracción particulada de la materia orgánica obtenida mediante el filtrado de las muestras de agua.

Una correlación menos significativa, por su mayor variabilidad, es la que se establece entre la DBO<sub>5</sub> y las concentraciones de clorofila *a*, entendiendo el fitoplancton como un componente orgánico del sistema, si bien muchos máximos de clorofila coinciden con máximos de DBO<sub>5</sub>, y no siempre evolucionan de forma solidaria. Esta falta de correlación puede explicarse en base a posibles diferencias en la oxidabilidad, durante el período de análisis de la DBO<sub>5</sub>, de los diferentes tipos de células que componen el fitoplancton. Esta variación permite diferenciar la materia orgánica alóctona, es decir, aquella que procede de la EDAR, más fácilmente oxidable, y la materia orgánica autóctonagenerada in situ a partir de las rutas metabólicas autótroficas y heterotróficas de las comunidades biológicas que se establecen en la balsa.

#### 4.4.3 Calidad del agua ligada al tiempo de residencia y a los procesos biológicos

##### Proliferaciones de plancton y carga microbiológica

Las balsas de regulación, pese a su origen artificial, se convierten, en sistemas acuáticos asimilables a lagunas, en los que se desarrollan procesos naturales, frecuentemente extrapolables a los procesos que se dan en ambientes naturales.

Las aguas residuales tratadas, normalmente ricas en nutrientes, suponen una buena base para el desarrollo de diferentes comunidades biológicas: Por una parte, las comunidades bacterianas, tanto las que se incorporan directamente con el agua de entrada como las de origen ambiental (que se desarrollarán en la balsa). Y por otra, las comunidades de algas unicelulares, mayoritariamente planctónicas, aunque también se han hallado microalgas bentónicas sobre las lonas de las balsas.

Estos dos grupos representan la producción primaria del sistema, especialmente las algas unicelulares, ya que las comunidades bacterianas que se han podido observar son mayoritariamente heterotróficas. El siguiente escalón trófico lo representan los consumidores primarios, esencialmente el zooplancton, que consumirá una importante fracción de los productores primarios. Finalmente, en lo alto de la red trófica que se genera en las balsas, encontramos a los peces que, especialmente en sus fases primarias, se alimentan de los pequeños crustáceos y protozoos integrantes del zooplancton de forma mayoritaria.

De este modo, tenemos un sistema artificial en proceso de naturalización con el establecimiento de las diferentes comunidades biológicas. La balsa funciona como un sistema dinámico y vivo, que, por tanto, condiciona la evolución y maduración del agua.

El desarrollo de las comunidades de productores primarios se verá potenciada por la incorporación de nutrientes; por tanto, las entradas de agua en la balsa determinarán los cambios en las poblaciones del fitoplancton. A diferencia de los sistemas naturales, donde las poblaciones algales se ven, generalmente, condicionadas por las variaciones estacionales de temperatura y radiación solar, las dinámicas de las balsas de regulación, se verán mayoritariamente condicionadas por la entrada de materia orgánica. Además, el aumento de la temperatura y de la radiación solar estimula la proliferación de las poblaciones de algas, como ocurre durante la época estival.

Así, a la entrada de agua le seguirá el desarrollo del fitoplancton como puede verse en la Figura 31. Este permite comparar las concentraciones de clorofila *a* de los seguimientos intensivos realizados en la balsa de *Ariany* durante mayo de 2014 con entradas de agua proveniente de la EDAR, y en marzo de 2015 sin entradas de agua.

Se ha podido comprobar que las poblaciones algales necesitan de períodos de tiempo muy cortos para cambiar sus concentraciones y para que se produzcan variaciones en los grupos y especies dominantes. Las fluctuaciones de sus biomásas respectivas, expresadas como concentraciones de clorofila *a*, pueden darse en cuestión de días. Esto ocurre cuando se producen entradas de agua continuadas a las balsas.

La carga orgánica y el volumen de entrada de agua determinarán las comunidades del fitoplancton que se desarrollarán. La disponibilidad de nutrientes condiciona las especies y grupos que predominarán en la balsa. El grupo de las clorofíceas encuentra mejores condiciones para desarrollarse en ambientes ricos en nutrientes, particularmente nitrógeno, y en general prefieren las aguas eutróficas. En cambio las algas criptofíceas o las diatomeas tienen mayores tasas de crecimiento en aguas con

menos nutrientes, y suelen presentarse cuando en las balsas hay menores concentraciones de materia orgánica.

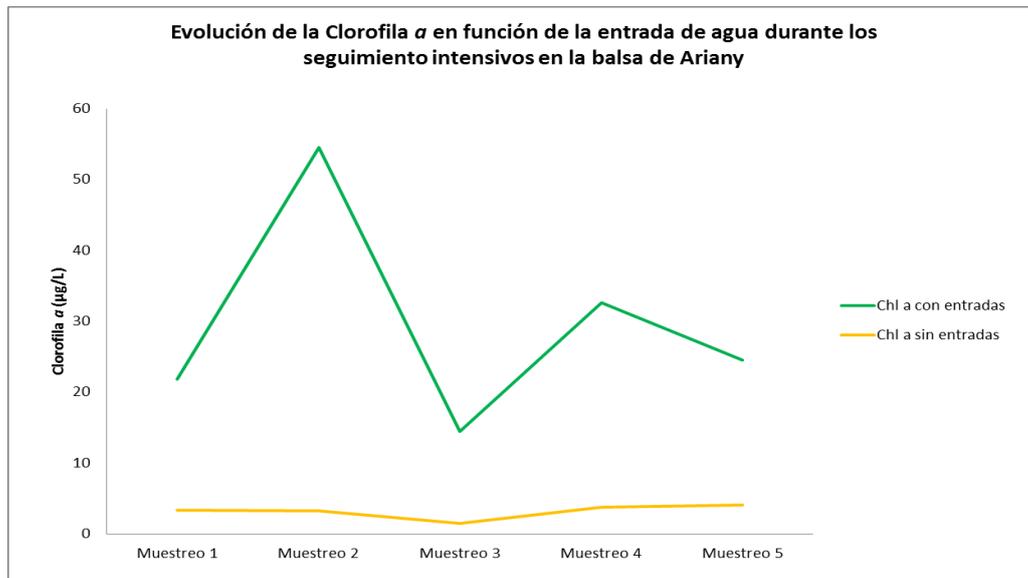


Figura 31. Evolución de las concentraciones de clorofila a en la balsa de *Ariany*, con entradas de agua y sin ellas. Los muestreos se realizaron durante periodos de 25 días.

Igualmente, dentro de cada grupo, hay especies con diferente capacidad de competencia ante una mayor o menor concentración de nutrientes. Por ejemplo, dentro de las clorofíceas, el género *Chlamydomonas* es mayoritario cuando el agua contiene elevadas concentraciones de materia orgánica sin oxidar, y por tanto, de entrada reciente, como se constató en los muestreos realizados en la balsa de *Ariany* durante el verano de 2013, cuando hubo entradas constantes de agua y sin tiempo de maduración.

Las colonias de *Pediastrum boryanum* como especie mayoritaria aparecen cuando las concentraciones de materia orgánica son un poco inferiores o ésta se encuentra más mineralizada. En condiciones de mayor oxidación de la materia orgánica puede ser sustituida por *Pediastrum dúplex*, propia de aguas más limpias, como se observó en el seguimiento intensivo de mayo de 2014 realizado en la balsa de *Ariany*.

A tenor de estas observaciones, resulta evidente que los taxones algales, géneros y especies, tienen un importante papel como bioindicadores de la calidad y las condiciones generales del agua.

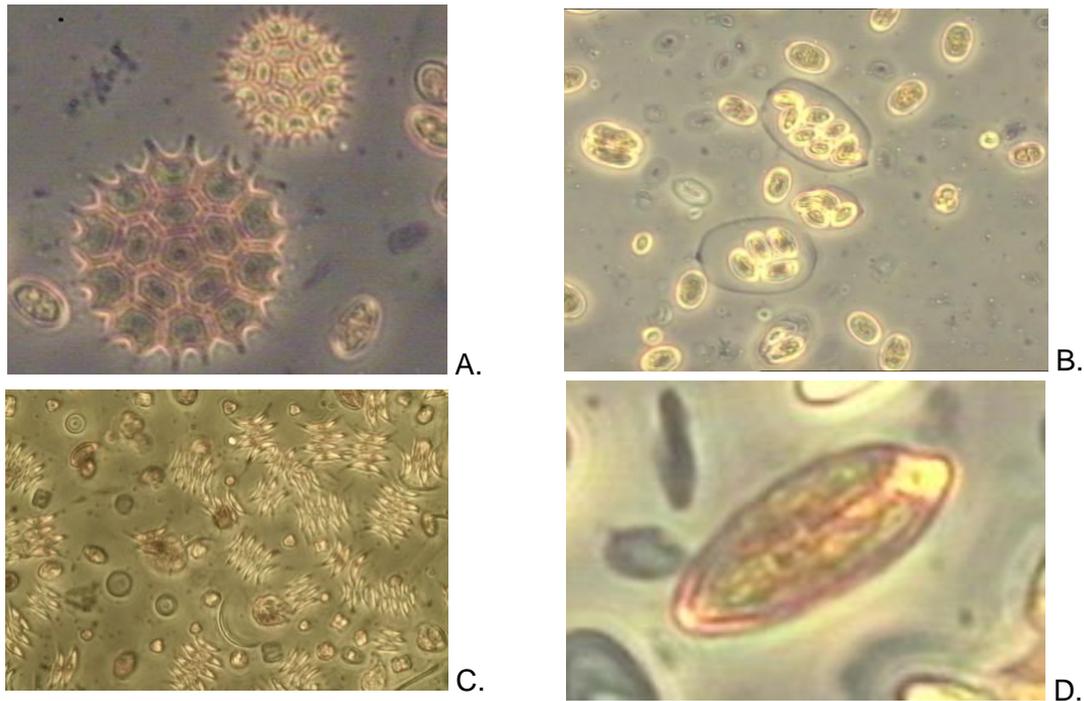


Figura 32. Fotografías realizadas en el microscopio invertido de algunas de las especies más frecuentes en las dos balsas. Las clorofíceas representan el grupo mayoritario; *Pediastrum boryanum* (A), *Oocystis lacustris* (B) y *Scenedesmus acuminatus* (C). Las criptofíceas son el grupo más abundante durante el invierno y durante los procesos de aclarado del agua. En la imagen un representante del género *Cryptomonas* (D) que, junto a *Plagioselmis*, son los taxones más abundantes de este Grupo en las balsas.

Las comunidades bacterianas también juegan un papel importante en la mineralización de la materia orgánica que se incorpora a la balsa a través del agua de entrada. Con la descomposición de ésta, el fitoplancton actúa sobre el contenido mineral del agua, utilizando parte de los nutrientes presentes en ella para su desarrollo. Como ya hemos comentado, ello tiene un especial efecto sobre el nitrógeno, favoreciendo su eliminación del sistema. Por lo tanto, las microalgas tienen un papel esencial como sumidero de este elemento, que generalmente se encontrará en el medio en estado oxidado en forma de nitratos. Los procesos de asimilación de los nitratos por parte de las algas explican las bajas concentraciones del compuesto que se han registrado en las dos balsas. Únicamente durante los muestreos con bajas concentraciones de clorofila *a*, las concentraciones de nitratos pueden experimentar incrementos, como se vio en los resultados obtenidos en el seguimiento intensivo de marzo de 2015 en *Ariany*, con mínimos de clorofila *a* y máximos en las concentraciones de nitratos superiores a los 80 mg/L, mientras que durante los episodios de crecimiento del fitoplancton los valores son inferiores a los 10 mg/L.

Las elevadas concentraciones de fitoplancton y su importante consumo de nitratos, puede tener como consecuencia que el agua tenga un carácter deficitario en nitrógeno con relación a otros nutrientes esenciales.

A los picos de crecimiento del fitoplancton les sigue la proliferación del zooplancton, con una elevada tasa de depredación sobre las comunidades de algas. Con un tiempo

mínimo de residencia del agua, esto desemboca en los procesos de aclarado del agua, que permiten una mejora de los estándares de calidad de la misma, tal y como se explica más adelante.

Por tanto, el tiempo de residencia del agua determinará la evolución de las comunidades de la balsa y su papel en la maduración del agua. Tiempos de residencia cortos se traducen en entradas constantes de agua procedente de la EDAR en la balsa, especialmente durante las épocas más cálidas. Estos tienen como consecuencia una menor maduración del agua y, por tanto, un incremento en los valores de todos los parámetros que rigen la utilización de las aguas regeneradas para riego, tales como sólidos en suspensión y DBO<sub>5</sub>. También de las cargas bacterianas, especialmente los microorganismos patógenos, tal y como puede verse en la Figura 34, que expone la evolución de las concentraciones de *E. coli* en la balsa de *Ariany*.

Tiempos de residencia mayores y, por tanto, tasas de renovación del agua inferiores, se traducen en reducciones de la carga orgánica, de la carga bacteriana y, especialmente, de la turbidez. Todo ello se hizo patente en los seguimientos intensivos de la balsa de *Ariany*, donde una mayor estabilidad del agua en la balsa es muy efectiva sobre la mayor maduración de ésta.

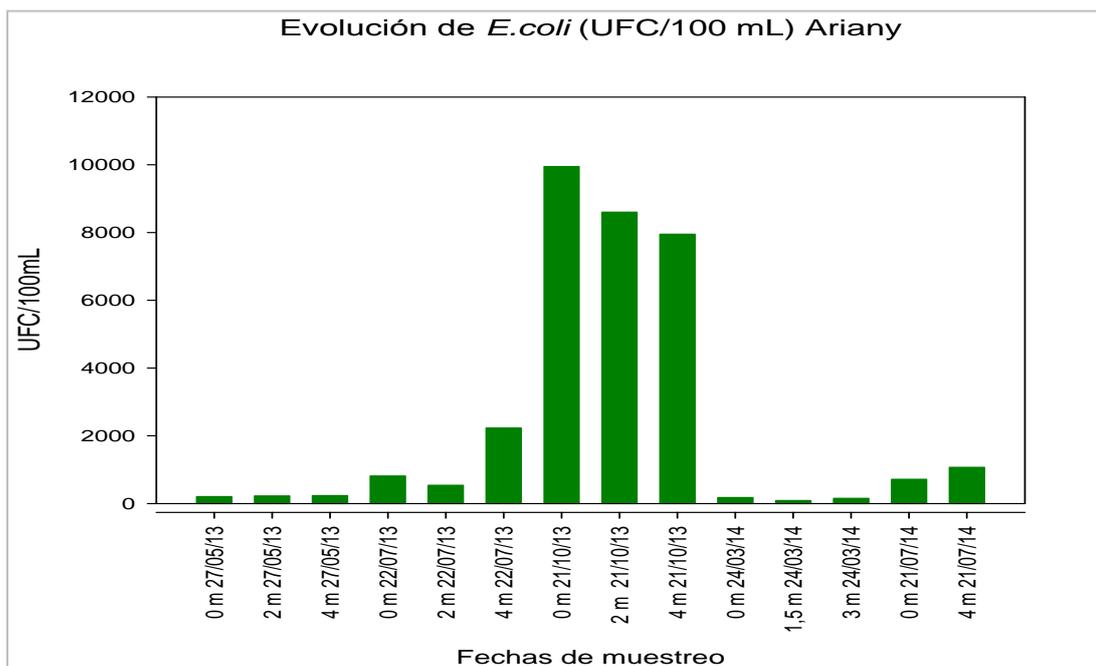


Figura 33. Representación de la evolución de las concentraciones de *E. Coli* en la balsa de *Ariany* durante los años de estudio. Los máximos de otoño de 2013 coinciden con tasas de renovación del agua muy elevadas y, por tanto, cortos tiempos de residencia.

En relación a la carga bacteriana hay que destacar que los clostrídios pueden aumentar sus concentraciones durante las primeras fases de permanencia del agua en las balsas, a pesar de que no haya nuevas entradas, ya que al estar como formas de resistencia, pueden prolongar su ciclo en el tiempo. Además encuentran en las condiciones anóxicas un ambiente ideal para su desarrollo. Con mayores tiempos de

residencia estas concentraciones igualmente se ven reducidas, siempre que no se produzcan nuevas entradas de agua procedente de la EDAR. Tiempos de residencia de entre 10 y 12 días son suficientes para obtener una calidad del agua que cumpla con la legislación vigente para el uso de aguas residuales regeneradas. Este período es suficiente para adaptar la gestión a unos requerimientos más realistas de la demanda de agua para riego. No obstante, con tiempos de residencia más largos, por ejemplo entre 20 y 23 días, los estándares de calidad experimentan mayor mejoría.

Es importante recalcar el papel de los factores ambientales en la evolución del agua y su maduración, con un importante efecto sobre los organismos que viven en las balsas. Así, la temperatura del agua varía durante el año, lo que condiciona la actividad biológica. Las comunidades bacterianas se verán influenciadas por las temperaturas, lo mismo que el fitoplancton, que además, tendrá en la radiación solar un factor limitante. La actividad de los depredadores también se ve condicionada por la temperatura del agua, hasta llegar a reducirse notablemente durante el invierno en el caso de las carpas.

Para la temperatura, su evolución a lo largo del año tendrá como posible consecuencia la estratificación de la columna de agua durante los meses más cálidos, con importantes efectos sobre todos los procesos que se desarrollan en la balsa, como consecuencia de su compartimentación. Si la estratificación térmica permanece estabilizada, puede generarse un ambiente anóxico en el fondo, lo cual afecta a los procesos de oxidación de la materia orgánica, como muestran los valores más elevados de la  $DBO_5$  registrados en el fondo durante los períodos de estratificación.

Las condiciones de hipoxia o incluso anoxia generadas como consecuencia del déficit de oxígeno, harán que el fondo de la balsa sea un medio hostil para los organismos aerobios, y, gracias a las condiciones reductoras, se generaran gases tipo sulfhídrico y metano, medio idóneo para el crecimiento de bacterias anaerobias. Este proceso se traduce en malos olores característicos de esta clase de ambientes.

### **Procesos de aclarado**

La proliferación de las comunidades algales posibilita a su vez el desarrollo del zooplancton, formado principalmente por pequeños crustáceos y protozoos, con una gran importancia en nuestro caso del cladóceros *Daphnia magna*. La depredación del fitoplancton por parte de estos grupos y de las comunidades bacterianas, tiene como consecuencia procesos de aclarado del agua, con una consiguiente disminución de las concentraciones de clorofila *a*, de los sólidos en suspensión, de la turbidez y de la  $DBO_5$ . Igualmente, estos procesos se asocian a la disminución de la carga bacteriana, tanto de origen ambiental como de bacterias patógenas.

En compendio, se ha observado una clara mejora de los estándares de calidad del agua, transformando ambientes hipertróficos (con elevadas concentraciones de clorofila *a*, de sólidos en suspensión y turbidez) en mesotróficos e incluso oligotróficos, como muestran los valores de 1 a 3  $\mu\text{g/L}$  de clorofila *a*, registrados durante el invierno de 2015 en *Ariany*.



Figura 34. Ejemplar del cladócer *Daphnia magna*, protagonista de los procesos de aclarado del agua en las balsas (Fotografía: J. Solivellas).

Los procesos de aclarado del agua pueden observarse en los registros de los perfiles de luz y de transparencia realizados con el disco de Secchi a lo largo del estudio (Figura 35). Los muestreos realizados durante la fase de aclarado durante el invierno de 2015 dieron como resultados valores del disco de Secchi de toda la columna de agua, lo que demuestra los elevados valores de la transparencia del agua durante estos procesos.

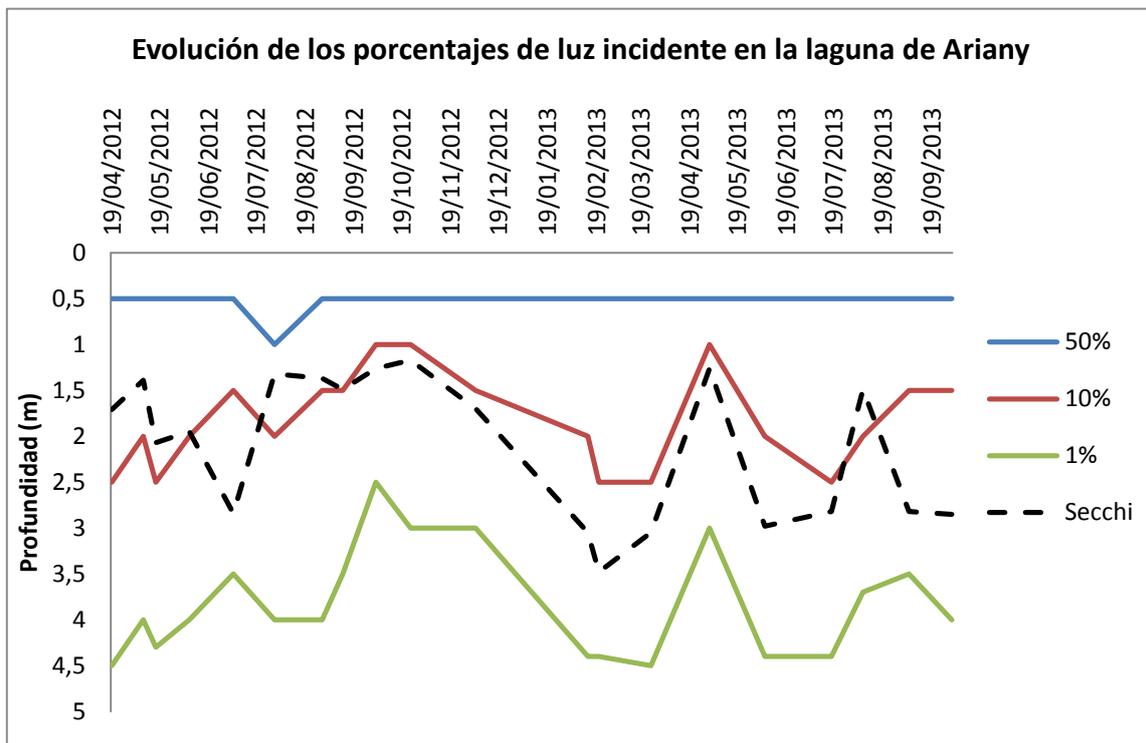


Figura 35. Evolución en profundidad de los porcentajes de intensidad luminosa incidente en la balsa de Ariany, y de los registros del disco de Secchi durante los dos primeros años de estudio. Los mínimos registros coinciden con los máximos de clorofila a, y los máximos de transparencia con las mínimas concentraciones de este pigmento durante los procesos de aclarado posteriores a las fases con alta proliferación de fitoplancton.

La red trófica entre productores y consumidores (deducida a partir de las observaciones realizadas en las balsas) se cerrará con la depredación sobre el zooplancton de los peces, en nuestro caso poblaciones de *Cyprinus carpio* o carpa común (Figura 36). De esta manera se produce una transformación de la materia orgánica que entra con el agua en la balsa en forma de biomasa de peces. Esta podría ser extraída periódicamente mediante la pesca de una fracción de la población de carpas.

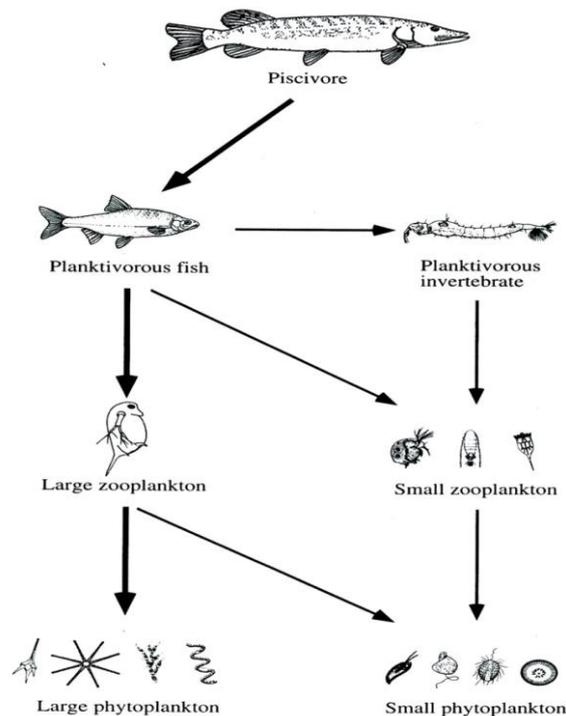


Figura 36. Esquema de la red trófica que se establece entre el fitoplancton, el zooplancton y la comunidad de peces de la balsa y que tiene como consecuencia los procesos de aclarado del agua. (Fuente, Brönmark and Hansson, 2006).

A pesar de que los procesos de aclarado del agua después de las proliferaciones de fitoplancton en los lagos sea conocido desde hace tiempo, y este ampliamente descrita en textos de limnología (Wetzel, 1975; Margalef, 1983), y también en balsas de maduración (Moreno, 1991), se debe insistir en su importancia, ya que significa la transferencia de los nutrientes inorgánicos y de la materia orgánica del agua desde el fitoplancton autótrofo y otros componentes del pico y del nanoplancton heterotrófico, hacia el zooplancton y a los niveles superiores de las redes tróficas. Este hecho resulta particularmente interesante en balsas de maduración, ya que es un mecanismo que acelera la eliminación de la carga orgánica que llega desde las EDAR y actúa como preventivo frente a posibles procesos de eutrofización y colapso en la dinámica de maduración y mejora de la calidad del agua. En las balsas de maduración, los episodios de aclarado se encuentran ligados a las oscilaciones del fitoplancton, que en buena parte dependen de las aportaciones de nutrientes con el agua de la EDAR y no tanto de los ritmos estacionales, como ocurre en lagos y lagunas naturales.

En el caso de eventos con un funcionamiento anormal del sistema, por ejemplo algún defecto en el tratamiento de depuración de la EDAR, puede provocar importantes perturbaciones sobre la red trófica que se establece entre las diferentes comunidades. En la balsa de Inca, durante el mes de octubre de 2014, una perturbación, ocasionada por la entrada de una cantidad anormalmente elevada de materia orgánica provocó una gran mortandad de carpas por la acumulación de concentraciones altas de nitritos.

En este contexto es destacable la tolerancia que presentan las carpas a bajas concentraciones de oxígeno, lo que les permite sobrevivir a los procesos de mezcla de la columna de agua que pueden provocar la disminución de los niveles de oxígeno por debajo de los valores de hipoxia, 4 – 2 mg O<sub>2</sub>/L, en toda la columna de agua.

#### 4.4.4 Aspectos normativos: cumplimiento del Real Decreto 1620/2007

El proceso de maduración del agua a través de su estabilización y los procesos biológicos y químicos que se desarrollan en la balsa, determinan la adecuación del agua almacenada a la normativa vigente para su reutilización para riego. A continuación se expone la influencia de las características de la balsa y de los procesos que se dan en ella y su encaje en los límites establecidos en el RD 1620/2007.

Tabla 38: Influencia de las diferentes características de las balsas y de los procesos que se dan en ellas sobre los parámetros de control establecidos por el Real Decreto 1620/2007.

| Procesos y características de las balsas   | Nemátodos intestinales (10 L) | <i>E. coli</i> (UFC/100 mL)                              | Sólidos en suspensión (mg/L)  | Turbidez (NTU)                | Otros aspectos                                      |
|--|-------------------------------|--|---|-------------------------------|---|
| Elevadas tasas de renovación del agua  | Mayor probabilidad            | Aumento de las concentraciones                           | Aumento de las concentraciones  | Aumento                       | Aumento de la carga orgánica. Agua sin madurar.     |
| Bajas tasas de renovación del agua   | Menor probabilidad            | Disminución de las concentraciones                       | Disminución de las concentraciones                                    | Disminución                   | Disminución de la carga orgánica.                   |
| Blooms de fitoplancton   | Sin efecto observado          | Asociado a concentraciones altas                         | Aumento de las concentraciones, especialmente de la fracción orgánica | Aumento                       | Eliminación de nitrógeno                            |
| Procesos de aclarado   | Menor probabilidad            | Disminución de las concentraciones hasta niveles mínimos | Disminución de las concentraciones a niveles mínimos                  | Disminución a niveles mínimos | Pueden aparecer deficiencias en algunos nutrientes. |
| <b>Influencia de las diferentes características de las balsas y de los procesos que se dan en ellas sobre los parámetros de control establecidos por el Real Decreto 1620/2007</b> |                               |  |   |                               |   |
| Procesos y características de las balsas   | Nemátodos intestinales (10 L) | <i>E. coli</i> (UFC/100 mL)                              | Sólidos en suspensión (mg/L)  | Turbidez (NTU)                | Otros aspectos                                      |

|   |                      |  |   |             |   |
|---|----------------------|--|---|-------------|---|
| <b>Estratificación de la columna de agua</b>          | Sin efecto observado | Diferencias en el crecimiento de las poblaciones bacterianas   | Gradientes en las concentraciones de sólidos, con efecto de fondo por sedimentación                                 | Disminución | Condiciones anóxicas, con menor oxidación de la materia orgánica y aumento de la DBO <sub>5</sub> .       |
| <b>Procesos de precipitación de carbonato cálcico</b> | Sin efecto observado | La menor penetración de la radiación solar podría favorecer el desarrollo de las poblaciones bacterianas | Normalmente asociado a elevadas concentraciones de clorofila a y por tanto a valores altos de sólidos en suspensión | Aumento     | Precipitación de algunos nutrientes, por ejemplo de hierro. Eliminación de carbonato cálcico del sistema. |

El uso agrícola del agua regenerada, según el RD 1620/2007, requiere de información adicional como un máximo de conductividad de 3.000  $\mu\text{s}/\text{cm}$ . Bajas tasas de renovación permiten una disminución de la conductividad ligada a procesos de precipitación y al efecto del crecimiento del fitoplancton sobre la mineralización del agua. También, la estratificación de la columna de agua puede provocar la formación de gradientes de conductividad.

Los valores de los diferentes parámetros que regula la legislación variarán en función del uso final del agua de riego, es decir, si se utiliza tanto para el riego de cultivos de consumo directo como no directo, leñosos, forrajes o para plantas ornamentales. Durante la mayor parte de análisis el agua de las balsas se ha mantenido apta para su uso en riego de los tres últimos tipos de cultivo. Ligados a los procesos de aclarado o a períodos con tasas bajas de renovación del agua, el agua ha presentado la idoneidad de los parámetros para el riego de cultivos frescos o de consumo directo.

Además del RD 1620/2007, cabe tener en cuenta la aplicación de la *Directiva europea 91/271*, que establece los valores máximos de la DBO<sub>5</sub>. Como se ha indicado, la estratificación de la columna de agua puede provocar aumentos de la DBO<sub>5</sub> en el fondo de la balsa. Por su parte, aportes continuos de agua procedente de la EDAR aumentarán los valores de la DBO<sub>5</sub> por encima de los máximos de la normativa (25 mg O<sub>2</sub>/L), como ocurrió en la balsa de *Ariany* durante el verano de 2013, con entradas constantes de agua. Los procesos de aclarado, por su parte, se asocian a los mínimos valores de este parámetro.

Cuando hablamos de mejora de los estándares de calidad, nos referimos a aguas con unas condiciones microbiológicas y estado de oxidación de la materia orgánica como indicadores de la calidad del agua. Ahora bien, para el uso final de este tipo de agua, estos procesos pueden suponer la eliminación de nutrientes esenciales para los cultivos, como el nitrógeno y el fósforo en disolución, que se transforman en biomasa de los organismos de la balsas.

En el caso concreto de las balsas que hemos estudiado se trata de llegar a un equilibrio entre la mejora de la calidad del agua que permita cumplir con la normativa vigente y el déficit de nutrientes para el riego de los cultivos, al que puede llegarse mediante el establecimiento de los tiempos mínimos de residencia, los cuales permiten

una mejora de la calidad sin comprometer los beneficios de las aguas regeneradas para uso agrícola.

#### **4.4.5 Consideraciones sobre la reducción de los costes de tratamiento mediante balsas**

A partir de la posibilidad de estudiar dos balsas con aguas procedentes de diferente origen, se ha podido concluir que un funcionamiento correcto de los tratamientos, ya sea terciario o secundario, asegura una buena calidad de agua de entrada y repercute en el coste posterior de su tratamiento. Factores de especial relevancia son la carga orgánica, los sólidos en suspensión y la carga bacteriana, cuya concentración en el agua de entrada tiene una influencia directa en su evolución dentro de la balsa y en factores económicos de su reutilización posterior en forma de abono en la propia agua de riego.

Las aguas con posibilidad de madurar, es decir, con un tiempo de residencia adecuado, adquieren unos mejores estándares de calidad, y se adaptan a la normativa de uso del agua regenerada del Real Decreto 1620/2007, vigente en el momento de redacción de este trabajo. Un buen ejemplo de ello es la disminución de las concentraciones bacterianas medidas. En el caso de *Ariany*, períodos con bajos tiempos de residencia se tradujeron en concentraciones superiores a las 10.000 UFC de *E. Coli*/100 mL, mientras que tiempos de residencia mayores redujeron las concentraciones por debajo de las 100 UFC/100 mL, resultando un agua perfectamente apta para el riego de cultivos frescos sin cloración previa. Esta mejora de las propiedades microbiológicas del agua, ligada a los procesos de maduración, permite ahorrar costes relacionados con el tratamiento para la desinfección del agua.

Igualmente, balsas poco profundas, o con menor turbidez, permiten una mayor incidencia de la radiación solar sobre el agua, lo que favorece la destrucción de patógenos por la radiación ultravioleta. De este modo se utiliza un método de desinfección natural que actúa de forma pasiva y del cual, en nuestras latitudes, se puede obtener un alto aprovechamiento y una gran eficiencia.

Por otra parte, el desarrollo de bacterias originadas por los procesos naturales de la propia balsa contribuye eficientemente a la mineralización de la materia orgánica. Estos procesos representan un aporte fundamental en la degradación de la carga orgánica del agua y en la mejora de su calidad para el uso previsto.

El fitoplancton contribuye de forma muy eficiente a los procesos de eliminación de la carga de nitrógeno del agua, mecanismo propio de los tratamientos terciarios de las EDAR. Esta eliminación de nutrientes del agua evita posibles episodios de eutrofización, que alteran la calidad del agua y que pueden afectar a los medios receptores del agua de salida.

Los procesos de aclarado del agua ligados a las cadenas tróficas, y que se potenciarán con el aumento del tiempo de residencia del agua, son un importante mecanismo de control de las poblaciones del fitoplancton, lo que supone una importante disminución de los sólidos en suspensión y un menor riesgo de obstrucción

de los sistemas de filtración en la salida del hidrante. Así, no es necesario recurrir a métodos químicos para el control de la población algal y se prolonga el tiempo de vida útil de los filtros.

La mejora de los estándares de calidad, en ocasiones, favorece la eliminación de nutrientes esenciales para los cultivos, como el nitrógeno y el fósforo en disolución, que se transforman en biomasa de los organismos de la balsas. Esto va en detrimento de la capacidad de abonado del agua madurada.

En el caso concreto de las balsas estudiadas, la tendencia es a encontrar un equilibrio entre la mejora de la calidad del agua y el déficit de nutrientes para el riego de los cultivos mediante una gestión inteligente. Esta se basa, esencialmente, en el establecimiento de los tiempos mínimos de residencia que permiten una mejora de la calidad sin comprometer los beneficios de las aguas regeneradas para uso agrícola.

#### **4.5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

En base a las experiencias descritas en las balsas de *Ariany* y de Inca, se puede establecer una serie de criterios técnicos y recomendaciones útiles para el diseño de las balsas, gestión del agua almacenada y uso final.

En cuanto al diseño de balsas, la lección aprendida recomienda priorizar una relación alta entre superficie y volumen. El almacenamiento de agua en balsas de profundidades no superiores a los 3,5 metros impide la estratificación estacional permanente, y por tanto la aparición de anoxia en el fondo, evitando así las consecuencias indeseables ya explicadas. Las mayores relaciones entre superficie y volumen benefician la eliminación de una fracción de la carga bacteriana por la radiación solar incidente y su efecto desinfectante emparejado de la radiación ultravioleta.

El inconveniente de este tipo de balsas menos profundas es la menor capacidad de almacenaje de agua. En los casos de balsas ya construidas en las que se mantiene un mayor volumen de agua durante los meses de otoño e invierno, la alternativa es reducir la profundidad durante los meses más cálidos. Este test se ha llevado a cabo con éxito en la balsa de Inca en el verano de 2012, impidiendo así condiciones anóxicas y malos olores.

Otra opción para aquellas balsas con profundidades por encima de los 3,5 metros, es la instalación de tomas flotantes para la captación de agua, o, todavía mejor, a distintas profundidades introduciendo un parámetro de gestión para contar con agua de la mejor calidad posible a lo largo del año, si su explotación se hace de la manera más adecuada. Así, contrariamente a lo que sucede en las balsas de Inca y *Ariany* en las que la toma se encuentra fija en el fondo, se podría elegir el agua que, en cada momento, se encuentra en las mejores condiciones de toda la columna, evitando obviamente las capas anóxicas. Al mismo tiempo se impediría la resuspensión de los sedimentos que se remueven al captar el agua de fondo, aumentando los sólidos en

suspensión con los posibles efectos adversos tanto en la calidad del agua como en el desgaste y obstrucción del sistema de filtros de la propia balsa.

En general, mayores volúmenes de agua permiten atenuar efectos indeseados producidos por la llegada a la balsa de composiciones muy diferentes. Según se ha constatado en la balsa de Inca, que durante todo el estudio se había mostrado menos sensible a los cambios que la balsa de *Ariany* (que tiene una tercera parte del volumen de la primera), las eventuales perturbaciones provocadas por el agua de entrada pueden alterar drásticamente al funcionamiento del sistema, como quedó demostrado en el episodio de mortandad de peces descrito en el apartado de *componentes minoritarios y procesos de aclarado*.

Por lo que concierne al tema del uso y gestión, el primer factor a tener en cuenta es el control del agua de entrada, debido a la importancia del tratamiento en origen, que será determinante sobre los procesos de maduración del agua en la balsa. En relación a ello se ha podido comprobar la gran variabilidad del agua residual que llega a las balsas. En términos generales, el agua de Inca, sometida a un tratamiento terciario, ha mostrado una variabilidad composicional menor y una menor carga orgánica y bacteriana; mientras que la balsa de *Ariany*, con agua proveniente de un tratamiento secundario, ha presentado mayores concentraciones de estos parámetros y una menor resiliencia para amortiguar cambios bruscos al mezclar agua de distintas composiciones. No obstante, perturbaciones puntuales pueden alterar por completo el proceso de maduración, de ahí la importancia de tener un cierto control sobre las características del agua de entrada.

Otro parámetro muy importante relacionado con la gestión y uso del agua es el tiempo de residencia y las tasas de renovación, con una gran incidencia sobre los principales parámetros de calidad del agua, según se ha descrito en el apartado precedente. En general resulta positivo madurar el agua por encima de 20 días.

Para la gestión de las balsas es recomendable establecer indicadores tales como el seguimiento de algún parámetro básico de forma continuada. Por ejemplo, mediciones periódicas mediante el disco de Secchi, un método estandarizado y sencillo, permiten obtener una notable información del nivel de transparencia del agua, que a su vez es un buen indicador de la turbidez, y por tanto, de los sólidos en suspensión y de la concentración de clorofila. También sería recomendable, cuando se obtengan bajos valores de la transparencia, realizar mediciones de parámetros como la  $DBO_5$ , concentración de oxígeno, sólidos en suspensión y clorofila *a* en diferentes profundidades de la columna de agua; así como la toma de muestras de fitoplancton para descartar la presencia de especies tóxicas en el agua. Igualmente es conveniente llevar a cabo análisis microbiológicos de patógenos que figuran en la legislación, como las concentraciones de *E. Coli* y de otros no regulados pero que son de gran importancia, como los clostridios, por su elevada patogenicidad.

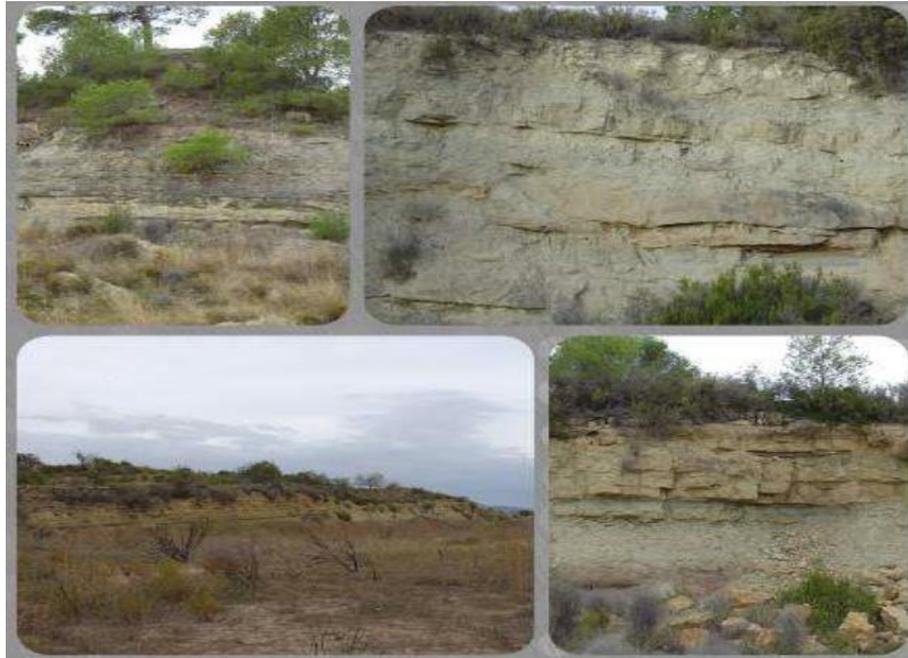
#### 4.6 BIBLIOGRAFÍA

- Adrover, M. 2010. Efectes del reg amb aigües residuals tractades en els sòls i cultius. Tesis doctoral. Palma: Universitat de *les Illes Balears*.
- Adrover, M; Moyà, G; Vadell, J. 2012. J. Effect of Trated Wastewater Irrigation on Plant Growth and Biological Activity in Three Soil Types. *Communication in Soil Science and plant Analysis*, 43 (8): 1163 – 1180.
- Adrover, M; Farrús, E; Moyà, G; Vadell, J. 2013. Chemical properties and biological activity soils of Mallorca following twenty years of treated wastewater irrigation. *Journal of Evironmental Management*, 127: 162 – 165. 2013.
- Amengual, C. 2009. Operació i manteniment en sistemes depuració natural. El cas del fitoplancton en els llacunatges facultatius. Memòria d'investigació per a l'obtenció del Diploma d'Estudis Avançats. Palma: Universitat de *les Illes Balears*.
- Anderson, J. N.D. 2010. The environmental benefits of water recycling and reuse. *Water Science and Technology: Water Supply*, 3: 1-10.
- Angelakis, A.N., Marecos Do Monte, M.H.F., Bontoux, L., Asano, T. 1999. The status of wastewater reuse practice in the mediterranean basin: need gor guidelines. *Water Research*, 33 (10): 2201 – 2217.
- Ayres, R.M; Mara, D. 1996. Analysis of wastewater for use in agriculture. A laboratory Manual of Parasitological and Bacteriological. Techniques. Ed World Health Organization: Geneva.
- Beamish, F.W.H. 1964. Respiration of fishes with special emphasis on standard oxygen consumption: II. Influence of weight and temperature on respiration of several species. *Canadian Journal of Zoology*, 42(2): 177-188, 10.
- Blumenthal, U.J., Mara, D., Peasey, A., Ruiz – Palacios, G., Stott, R. 2000. Guidelines for the microbiological quality of treated wastewater used in agriculture: recomendations for revising WHO guidelines. *Bulletin of the World Health Organization*, 78: 1104-1116.
- BOE. REAL DECRETO 1620/2007 de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. *Boletín Oficial del Estado*, 8 de diciembre de 2007, num294, 50639-50661.
- Brönmark, C., Hansson, L.A. 2006. The biology of lakes and ponds. *Biology of Habitats*. Oxford University Press.
- Cabrera, M. D. 1981. Distribución del fitoplancton en la Laguna de la Cruz y su relación con los nutrientes. Tesis doctoral. Valencia: Universitat de València, 2007.
- Catalan, J. Química del agua. Madrid.
- Chakrabarti, C. 1995. Residual effects of long-term land application of domestic wastewater. *Environmental International*, 21: 333-339.
- Colt, J; Ludwig, R. 1981. The effects of the nitrite on the short – term growth and survival on channer catfish (*Ictalurus punctatus*). *Aquaculture*, 24. 111 – 122.
- De Bustamante, I; Cabrera, M.C; Candela, L, Lillo, J; Palacios, MP. 2010. La reutilización de aguas regeneradas en España: ejemplos de aplicación en el marco del proyecto Consolider – Tragua. *Aqua*, 1 (2): 1 – 17.
- DOCE. DIRECTIVA EUROPEA 91/271/CEE del consejo de la Unión Europea, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, 30 de mayo de 1991.
- Elozegi, A; Sabater, S. 2009. Conceptos y técnicas en ecología fluvial. *Autodedicion (Fundación BBVA)*. Bilbao.
- Estrada, M., Vallespinos, F. 1976. Estudio estadístico de espectros de absorción de extractos de pigmentos de comunidades de algas macrofitas. *Investigaciones Pesqueras*, 40 (2): 551-559.

- Friedel, J.K., Langer, T., Siebe, C., Stahr, K. 2000. Effects of long-term waste water irrigation on soil organic matter, soil microbial biomass and its activities in central Mexico. *Biology and Fertility of Soils*, 31. 414-421.
- Hadas, O; Cavari, B.Z; Kott, Y. y Bachrach, U. 1983. Preferential feeding of *Daphnia magna*. *Hydrobiologia* 89, 49 – 52.
- Hamilton, A., Stagnitti, F., Xiong, X., Kreidl, S.L., Benke, K.K., Maher, P. 2007. Wastewater irrigation: the state of play. *Vadose Zone Journal* 6: 823-840.
- IOC. 2010. Microscopic and Molecular Methods for quantitative Phytoplankton Analysis. *Manuals and Guides 55*. UNESCO. París.
- ISO 7899-1:1984. Water quality. Detection and enumeration of faecal streptococci. Part 1: Method by enrichment in a liquid medium. Ginebra, International Organization for Standardization.
- ISO 6461-1:1986. Water quality. Detection and enumeration of the spores of sulfite-reducing anaerobes (clostridia) - Part 1: Method by enrichment in a liquid medium. Ginebra, International Organization for Standardization.
- ISO 9308-1:1990. Water quality. Detection and enumeration of coliform organisms, thermotolerant coliform organisms and presumptive *Escherichia coli*. Part 1: Membrane filtration method. Ginebra, International Organization for Standardization.
- ISO 6222:1999. Water quality. Enumeration of culturable micro-organisms. Colony count by inoculation in a nutrient agar culture medium. Ginebra, International Organization for Standardization.
- ISO 9308-1:2000. Water quality. Detection and enumeration of *Escherichia coli* and coliform bacteria. Part 1: Membrane filtration method. Ginebra, International Organization for Standardization.
- Lapeña, L., Cerezo, M., García – Agustín, P. 1995. Possible reuse of treated municipal wastewater for Citrus spp. plant irrigation. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 55: 697-703.
- Llimona, X et al. 1989. Història Natural dels Països Catalans. Volum 4: Plantes inferiors. *Enciclopedia Catalana*.
- Llobera, M., Ferriol, A. 1994. Seasonal fluctuations in the chemistry of limestone springs from the Tramuntana mountain Range (Mallorca, Spain). *Verh. Internat. Verein. Limnol* 25: 1445-1448.
- Margalef, R. 1983. *Biología de los embalses*. Investigación y Ciencia 1: 50-62. 1976
- Margalef, R. *Limnología*. Barcelona: Ed. Omega,
- Mapanda, F., Mangwayana, E.N., Nyamangara, J., Giller, K.E. 2005. The effect of long-term irrigation using wastewater on heavy metal contents of soils under vegetables in Harare, Zimbabwe. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 107: 151-165.
- Mateos, R.M., Crespí, D. Galmés, A., González, C. 2001. Regadío con aguas residuales tratadas en la isla de Mallorca. Afección a las aguas subterráneas. VII Simposio de hidrología. Tomo XXIV. Asociación Española de Hidrología Subterránea, Murcia.
- Marrero, M.C. 1998. Evolución de aguas depuradas almacenadas en balsas. Universidad de la Laguna. Departamento de Ingeniería Química y Tecnología Farmacéutica.
- Moreno, M.D. 1991. Depuración por lagunaje de aguas residuales. Manual de operadores. Monografías de la Secretaría de Estado para las Políticas del Agua y el medio Ambiente, MOPT.
- Moustaka, M; Vardaka, E. 2007. Phytoplankton species succession in a shallow Mediterranean lake (L. Kastoria, Greece): steady –state dominance of *Limnothrix redekei*, *Microcystis aeruginosa* and *Cylindrocapsa raciborskii*. *Hydrobiologia*, 575: 129 - 140.

- Mujeriego, R., Sala, L. 1991. Golf course irrigation with reclaimed wastewater. *Water Science and Technology* 24: 161-171.
- Pedrero, F., Alarcón, J.J. 2009. Effects of treated wastewater irrigation on lemon trees. *Desalination* 246: 631-639.
- PLA HIDROLÒGIC. 2013. Govern de *les Illes Balears*. Conselleria de Medi Ambient.
- QIAN, Y.L., MECHAM, B. 2005. Long-term effects of recycled wastewater irrigation on soil chemical properties on golf course fairways. *Agronomy Journal* 97: 717-721.
- Reboll, V., Cerezo, M., Roig, A., Flors, V., Lapeña, L., García-Agustín, P. 2000. Influence of wastewater vs groundwater on young Citrus trees. *Journal of Science of Food and Agriculture* 80: 1441-1446.
- Reddy, G.B; Reddy, K. R. 1987. Nitrogen transformations in ponds receiving polluted water from nonpoint sources. *Journal Environmental Quality*, 16 (1): 1-5.
- Reynolds, C.S; Huszar, V; Kruk, C; Naselli, L; Melo, S. 2002. Towards a functional classification of freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, 24 (5): 417-428.
- Rodier, J. 1981. Analisis de las aguas: Aguas naturales, aguas residuales, agua de mar. Barcelona: Ed. Omega.
- Rowe, D.R., Abdel-Magid, I.M. 1995. Handbook of wastewater reclamation and reuse. CRC Lewis publishers, London.
- Sabater, S; Sabater, F. 1987. Comunidades de diatomeas en localidades altamente contaminadas del rio Ter. *Limnetica*, 3: 103 – 109.
- Santarrufina, J.E. El regadío en *les Illes Balears*. 2007. Uso de agua depurada. *Investigaciones Geográficas* 43: 85-96.
- Sharma, R.K., Agrawal, M., Marshall, F. 2007. Heavy metal contamination of soil and vegetables in suburban areas of Varanasi, India. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 66: 258-266.
- Streble, H; Krauter, D. 1987. Atlas de los Microorganismos de Agua Dulce. Ed. Omega.
- Talling, J.F. 2003. Phytoplankton – zooplankton seasonal timing ant the “clear-water phase” in some English lakes. 2003. *Freshwater Biology*, 48: 39 – 52.
- Toze, S. 2006. Reuse of effluent water – benefits and risks. *Agricultural Water Management*, 80: 147-159.
- Reynolds, C.S; Huszar, V; Kruk, C; Naselli, L; Melo, S. 2002. Towards a functional classification of freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, 24 (5): 417-428.
- Villena, M.J; Romo, S. 2003. Phytoplankton changes in a shallow Mediterranean lake (Albufera of Valencia, Spain) after sewage diversion. *Hydrobiologia*, 506 – 509: 281 - 287.
- Wang, Z., Chang, A.C., Wu, L., Crowley, D. 2003. Assessing the soil quality of long term reclaimed wastewater-irrigated cropland. *Geoderma*: 261-278.

## 5 ACUÍFEROS



### ***PHIB. Artículo 21. Otras previsiones.***

***1. Se fomentará la utilización de aguas residuales depuradas que tengan la calidad adecuada para atender usos agrícolas existentes que en la actualidad se sirven con recursos subterráneos...***

## APARTADO 5. ACUÍFEROS

### 5.1 INTRODUCCIÓN

El estudio de calidad de las aguas, entendiendo por calidad el grado de adecuación de las características del agua para un fin específico, resulta una técnica adicional para el conocimiento hidrogeológico de un sistema.

La calidad del agua debe ser determinada desde una perspectiva dinámica por su posible variación espacio-temporal y, por tanto, hay que referirla a un lugar y un periodo determinado, en este caso a tres sectores de la isla de Mallorca (afueras de Inca, *Santa Maria del Camí* y María de la Salut) (Figura 37) y para el período entre 2011 y 2016. Dada la escasa variabilidad ambiental entre estos sectores objeto de estudio, los resultados pueden ser previsiblemente extrapolables a escenarios análogos, al menos del arco mediterráneo.

El empleo de técnicas y herramientas hidrogeoquímicas representa una metodología adicional para conocer el funcionamiento de los acuíferos y para la gestión de los recursos hídricos, siempre y cuando estén claramente definidos los objetivos.

En el contexto del presente estudio, el propósito será estudiar si la calidad hidroquímica del recurso (aguas regeneradas) provoca algún tipo de impacto en el medio receptor (acuíferos, tras interactuar con los cultivos y los suelos), mediante la observación directa de puntos de agua ubicados en redes de control, mediante su caracterización, monitoreo y apoyo en técnicas de modelación. El fin último será la evaluación del impacto, la propuesta de actuaciones específicas para minimizarlo y el diseño de parámetros de gestión prácticos.

La caracterización es considerada una etapa previa para la modelación, y permite por sí misma obtener información importante sobre la calidad de las aguas y su evolución, establecer tendencias evolutivas, estudiar el origen de las aguas subterráneas y su evolución como consecuencia de la interacción con la geología del terreno, así como evaluar su grado de contaminación o alteración de la calidad natural a lo largo del tiempo.

Previamente a la interpretación de los resultados de los análisis de muestras de agua de las redes de control, fue realizado un trabajo bibliográfico centrado en la calidad química de las aguas en su etapa preoperacional para las tres zonas piloto donde se han realizado las labores de I+D+i. La información obtenida ofrece una primera aproximación al quimismo de las aguas subterráneas de los tres sectores objeto de estudio tras varios años de regadío con aguas regeneradas sobre suelos diferentes en composición y espesor, y a distintos cultivos.

Cabe anticipar que en el período de estudio (cinco años) no se han detectado afecciones negativas en el acuífero como medio receptor en ninguna de las zonas, dentro de los límites de precisión de los procedimientos analíticos empleados. Para

prever la evolución a medio y largo plazo se han aplicado técnicas de modelado hidrogeoquímico, empleando bases de datos termodinámicas específicamente adaptadas para este fin, como se expone más adelante.

## 5.2 CONTEXTO

Además del marco geográfico donde se ha llevado a cabo el estudio, con sus correspondientes condiciones ambientales y ya expuesto en apartados precedentes, es importante conocer el marco legal que posibilita tal actuación, que depende en buena medida de la Comunidad autónoma donde se practiquen este tipo de acciones.

En el caso concreto de *les Illes Balears*, la viabilidad de la actuación está contemplada en su Plan Hidrológico (PHIB), que en su artículo 21 (otras previsiones) dictamina:

- 1) Se fomentará la utilización de aguas residuales depuradas que tengan la calidad adecuada para atender usos agrícolas existentes que en la actualidad se sirven con recursos subterráneos.
- 2) Las demandas de abastecimiento urbano que no sea posible satisfacer mediante la aplicación de los criterios establecidos en los artículos anteriores, podrán atenderse mediante desalación de agua de mar.
- 3) El futuro incremento de las demandas de agua para campos de golf u otros espacios recreativos similares se atenderá mediante las disponibilidades de aguas residuales depuradas o desalación de agua de mar.
- 4) El mantenimiento de zonas verdes previstas en el Planeamiento urbanístico será atendido, en la medida de lo posible, mediante agua residual depurada.

Con respecto a los recursos disponibles, en su Artículo 24 dicta:

*.../... Los 2,3 hm<sup>3</sup>/año de diferencia con los 33,6 hm<sup>3</sup>/año consolidables para usos de riego actuales deberán suplirse con aguas residuales depuradas.*

En este contexto, el marco legal para llevar a cabo este estudio queda plenamente soportado. Todo técnico dispuesto a emprender regadíos con aguas regeneradas en escenarios paralelos debe estudiar su viabilidad legal como etapa previa.

En cuanto a su contexto hidrogeológico, las dos primeras zonas de estudio se encuentran en el acuífero de Inca, Unidad hidrogeológica 11-11 (Inca-Sa Pobla), masas de agua 18-14-M3 (Pont D'Inca) para el Sector designado *Santa Maria del Camí* y 18-11-M3 (Inca) para el denominado "sureste de Inca". El tercer sector se llama "*Maria de la Salut*" se encuentra en el acuífero de la Depresión Central de Mallorca, UHG 11-16 (La Marineta), Masa de Agua 18-16-M1 (*Ariany*) (Figura 37).

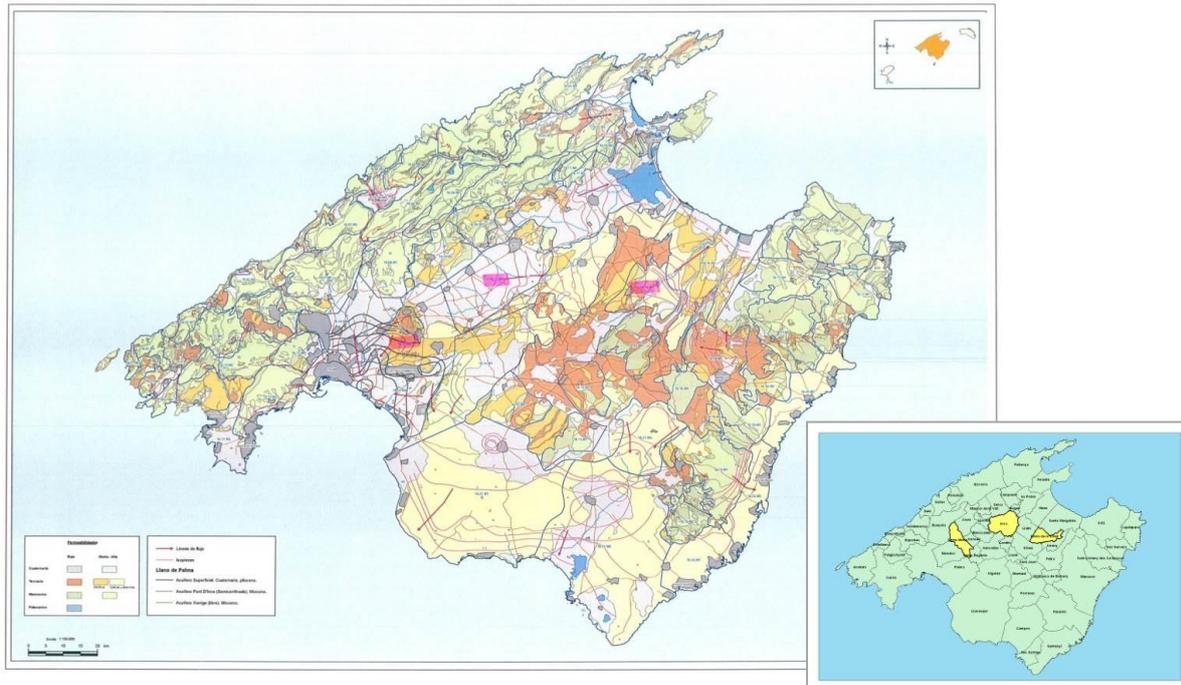


Figura 37. Cartografía hidrogeológica básica para la Isla de Mallorca y posición de las parcelas de estudio conforme a su zonificación en Masas de agua (tomado del PHIB, pg. 128). Las zonas piloto se han marcado con un rectángulo rosáceo. Modificado del PHIB.

### 5.3 OBJETIVOS

Este Proyecto ha apostado por aplicar un carácter demostrativo al uso sostenible del agua que permita la creación de sinergias favorables al uso de aguas regeneradas en la agricultura, en las Comunidades de Regantes y para los usuarios en general, en caso de que los resultados obtenidos fueran positivos. Asimismo, el mejor conocimiento de diseños más apropiados permitirá el ahorro de costes en determinados elementos, tales como instalaciones de tratamientos terciarios en depuradoras (EDAR), construcción de balsas de regulación/depuración de aguas regeneradas, diseño de redes de control, etc.

El carácter “demo” del proyecto ha requerido obtener una serie de datos y resultados que permitan contemplar el efecto del riego con agua regenerada en los acuíferos tras su paso por los cultivos y suelos mediante un enfoque integrado. A este objetivo general hay que sumar otros específicos de tipo medioambiental y económico, entre los que cabe destacar:

- 1) Recopilación de la información disponible del entorno preoperacional relativo a la calidad de las aguas subterráneas.
- 2) Caracterización de aguas y suelos conforme a sus condiciones ambientales.
- 3) Diseño de redes de control que permitan conocer la evolución de las aguas a lo largo de las líneas de flujo subterráneo. Selección de los puntos de muestreo y análisis periódico de estos.

- 4) Caracterización de las muestras de aguas y de la fracción sólida. Estudios de las pautas de reacción y productos resultantes de la interacción en los tres entornos operacionales.
- 5) Determinación de las mejores prácticas para minimizar el efecto adverso sobre los acuíferos, en caso de detectarse alguno.

#### 5.4 METODOLOGÍA

Para la caracterización cualitativa del estado inicial de los acuíferos y el efecto del riego con agua regenerada sobre los mismos, se ha seguido el siguiente esquema procedimental:

El plan de trabajo ha sido secuencial y consistente en la recopilación de toda la información disponible en piezometría (niveles freáticos y piezométricos) y calidad de las aguas (parámetros macroconstituyentes seleccionados y aquellos microconstituyentes y trazas de especial relevancia para el estudio de los procesos de interacción), mejora del conocimiento de los límites físicos del acuífero y de su estructura tridimensional, especialmente mediante la deducción de divisorias de aguas subterráneas mediante cartografías hidrogeológicas de detalle, avance en el conocimiento del funcionamiento del acuífero, cierre del balance hídrico (transferencias laterales, infiltración, pérdidas, extracciones, etc.), y todos aquellos parámetros precisos para su posterior modelización (condiciones de contorno).

Se han analizado periódicamente las aguas subterráneas en tres o más captaciones para cada sector. Estos puntos de agua han sido seleccionados en un circuito desde “aguas arriba”, donde no hay regadío, hacia abajo según el sentido del flujo subterráneo que atraviesa las zonas regables. Los puntos de control han sido propios del proyecto, no incluidos en las redes del Servei d'Estudis i Planificació de la Direcció General de Recursos Hídrics de la *Conselleria de Medi Ambient, Agricultura i Pesca* del Govern Balear (en adelante nos referiremos a esta institución como la “*Conselleria*”) y del IGME. De este modo se ha generado una información adicional que ha permitido ampliar el conocimiento hidrogeológico de las áreas de intervención donde se sitúan las tres parcelas experimentales y balsas de riego, elementos *sine qua non* del sistema integrado de las tres zonas piloto.

Las líneas de flujo han sido deducidas mediante cartografías hidrogeológicas detalladas elaboradas específicamente para el proyecto. Se han considerado las variaciones con el acuífero funcionando en régimen natural y afectado (debido a las extracciones de aguas subterráneas, en general para regadío). De este modo la concordancia con el sentido regional presenta ciertas variaciones estacionales.

La justificación para tal selección queda expuesta en la Figura 38, que presenta el aspecto de estos puntos de agua, su proyección sobre la cartografía hidrogeológica esquemática, con sus correspondientes equipotenciales y líneas de flujo, el sentido del flujo regional (líneas a la izquierda) y local (líneas a la derecha), así como las zonas regadas con aguas regeneradas ubicadas sobre el circuito de las aguas subterráneas.

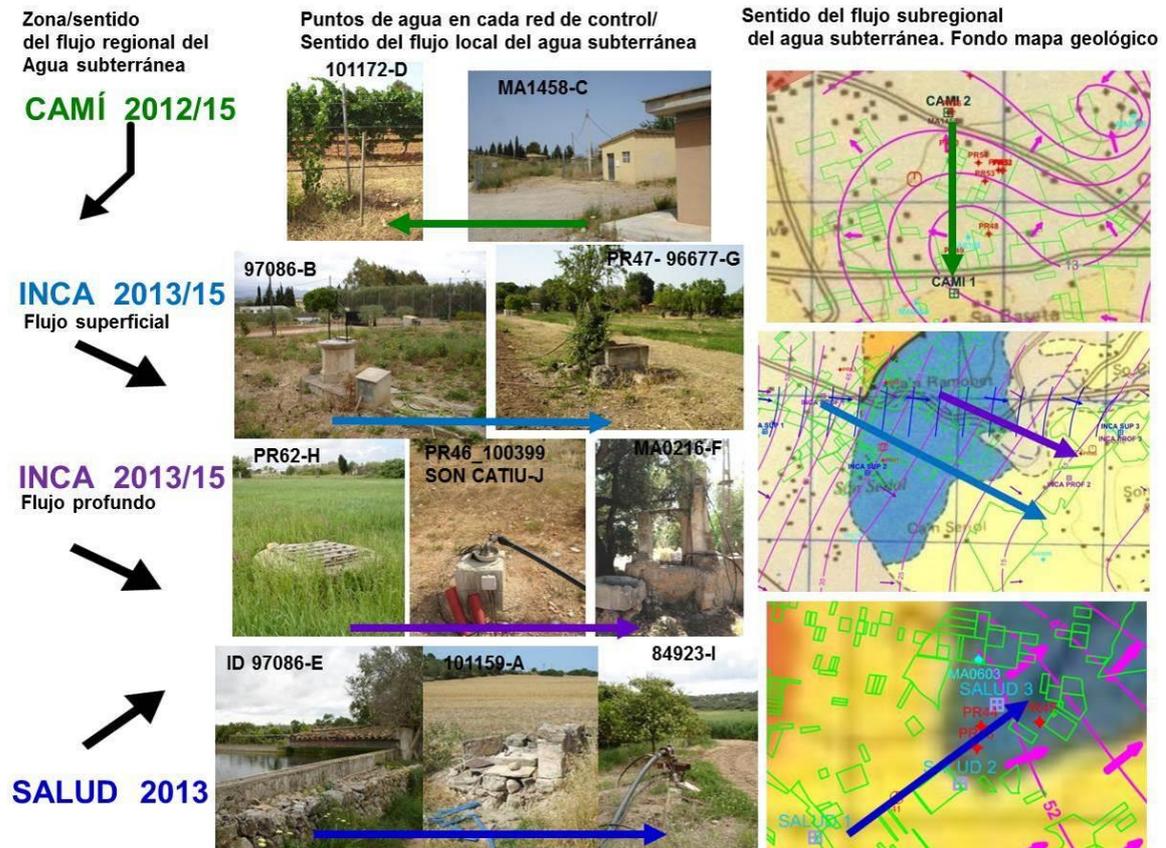


Figura 28. Puntos de agua seleccionados para el estudio de su evolución cualitativa y sentido de las líneas de flujo. Representación sobre la capa de geología. Los polígonos verdes corresponden a las parcelas regadas.

En el sector de Inca se han establecido dos circuitos, uno para el acuífero superficial y otro para el profundo, seleccionando puntos de agua someros y profundos respectivamente.

Los puntos que han constituido las redes de control, con su denominación, ubicación y facies hidroquímicas aparecen listados en la Tabla 39.

Tabla 39: Puntos de agua de las redes de control de Santa Maria del Camí, Inca y Maria de la Salut. ID común con la Figura 38, último dígito de cada código.

| Muestra ID                      | ID | Facies                                     | X      | Y       |
|---------------------------------|----|--|--------|---------|
| CAMI 1 101172 BODEGA AGO12      | C  | Ca-Mg-Na-HCO <sub>3</sub> -Cl              | 481913 | 4387493 |
| CAMI 2 MA1458 ES MOLINETS ENE12 | D  | HCO <sub>3</sub>                           | 481883 | 4388457 |
| INCA PROF 1 ABONO PR62 MAY13    | H  | Na-Ca-Mg-Cl-HCO <sub>3</sub>               | 494509 | 4396177 |
| INCA PROF 2 100399 PR46 AGO13   | J  | Ca-Cl-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub>    | 496406 | 4395541 |
| INCA SUP 1 97086 OCT13          | B  | Ca-Na-HCO <sub>3</sub> -Cl                 | 494061 | 4395902 |
| INCA SUP 2 PR 47_PAU AGO13      | G  | Na-Ca-Cl-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> | 494851 | 4395583 |
| INCA SUP Y PROF 3 MA 0216       | F  | Ca-Na-HCO <sub>3</sub> -Cl                 | 496802 | 4395895 |
| SALUD 1 22759 OCT13             | E  | Ca-Mg-SO <sub>4</sub> -Cl                  | 506926 | 4389083 |
| SALUD 2 101159 HUERTO OCT13     | A  | Na-Ca-Cl-HCO <sub>3</sub>                  | 507674 | 4389363 |
| SALUD 3 84923 PR43 OCT13        | I  | Ca-Mg-Cl-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub> | 507863 | 4389771 |

Se ha realizado la analítica de macro, microconstituyentes y una amplia variedad de trazas (los análisis completos se adjuntan en el anexo 1).

Conviene indicar que los límites inicialmente propuestos para su modelado no cuentan con respaldo físico, más bien son trazados artificiales para acometer los trabajos (poligonal envolvente) de modelado. Como anticipo del apartado posterior, cabe adelantar que el estudio de la evolución de los procesos de interacción entre las aguas de riego y el acuífero objeto de estudio (zona de Inca), en una modelación directa de las reacciones químicas y termodinámicas, alcanza prácticamente la estabilización a partir del quinto año (régimen transitorio).

#### **5.4.1 Caracterización inicial para el estudio de la influencia de las aguas regeneradas en los acuíferos**

De acuerdo con experiencias previas, se ha considerado que una caracterización queda suficientemente definida cuando se especifica una serie de factores que permiten contar con una información suficiente del acuífero y aguas subterráneas, de manera que cualquier cambio pueda ser relativizado con respecto a la situación inicial.

Para llevar a cabo tal caracterización se ha procedido a la integración de los resultados analíticos y su tratamiento mediante diversas técnicas y herramientas procedimentales, conjugadas siempre con las características estructurales y ambientales de cada zona. Las técnicas empleadas han sido el análisis hidroestadístico multivariante, empleo de índices hidrogeoquímicos, clasificaciones de aguas, diagramas hidrogeoquímicos o hidrogramas, cartografías de isocontenidos, isorrelaciones iónicas y cartografías temáticas.

Los parámetros precisos para adquirir un grado de conocimiento suficiente del sistema y otros elementos adicionales conllevan, al menos, la identificación espacial y temporal de la muestra, su composición molar y molal, su balance iónico, carácter de la muestra con respecto a patrones estandarizados y concentración de minerales disueltos. Con respecto a su uso, es indispensable conocer su potabilidad e idoneidad para el regadío y uso industrial sobre la base de parámetros artificiales de clasificación.

#### **Aguas regeneradas de riego**

La calidad de las aguas regeneradas y su fertilización adicional son factores determinantes en el desarrollo de un cultivo, si bien puede contribuir a la desestructuración, salinización y/o empobrecimiento de un suelo, deteriorar los sistemas de aspersión y goteo, crear efectos de persistencia y acumulación de determinados iones, etc. De ahí la importancia del análisis del agua utilizada y del drenaje resultante, como elemento inicial o “polo frío” del circuito de interacción. Además de la calidad, obviamente influyen otros aspectos como son la técnica de riego, volumen de aplicación, tipo de suelo, clima, etc.

El control de la calidad química de las aguas para riego ha contado con determinaciones de los siguientes parámetros, siendo al menos éstos los recomendables para experiencias replicadas:

- 1) **Análisis microbiológico:** Aerobios mesófilos, Coliformes totales, Coliformes fecales, Clostridrios, Enterobacterias, Eschericia coli, Pseudomona aeruginosa, Staphilococcus aureus y Streptococcus fecales.
- 2) **Análisis químicos básicos:** Conductividad, pH, Cloruros, Fosfatos, Nitratos y Nitritos.
- 3) **Análisis químicos completos:** Además de los mencionados en el párrafo anterior deberán analizarse los siguientes: Alcalinidad, Bicarbonatos, Sulfatos, Calcio, Sílice, Magnesio, Sodio, Potasio, Amoniaco, Hierro, Residuo seco, Sólidos en suspensión, DBO y DQO.

La periodicidad de los controles debe ser de, al menos, seis meses, en general antes y después del período de riego (mayo y octubre). Esta periodicidad puede variar dependiendo de si es una zona regable consolidada o incipiente.

La calidad química de las aguas regeneradas empleadas para riego cuenta, en general, con una salinidad y mineralización superior a las aguas nativas, con mayor concentración de iones alcalinos, cloruros y sulfatos y presencia importante de algunas trazas, tales como hierro y manganeso. La concentración de nitratos es variable según el sistema de depuración específico. En ciertas ocasiones los agricultores hacen pasar el agua por un descalcificador, reduciendo así la presencia de alcalino-térreos.

La caracterización detallada de las aguas regeneradas para los tres sectores se encuentra en las referencias bibliográficas (memoria técnica del proyecto EARSAC 2013). A modo de ejemplo se presentan las analíticas de 2012 para los tres sectores (Tabla 40) y su representación en un hidrograma de Piper-Hill-Langelier (Figura 39).

Tabla 40: Composición química (macroconstituyentes) de las aguas regeneradas de los tres sectores de estudio iniciales en el verano de 2012.

|                                       | Na     | K     | Ca     | Mg    | Cl     | HCO <sub>3</sub> | SO <sub>4</sub> | Fe   | Cu    | Al     | Mn     | NO <sub>3</sub> |
|---------------------------------------|--------|-------|--------|-------|--------|------------------|-----------------|------|-------|--------|--------|-----------------|
| SANTA MARIA DEL CAMÍ REGENERADA JUL12 | 128,60 | 23,15 | 105,50 | 30,24 | 179,60 | 256,4            | 109,90          | 0.09 | <0,01 | 0,0411 | 0,1728 | 0,33            |
| SANTA MARIA DEL CAMÍ REGENERADA AGO12 | 148,10 | 23,40 | 98,93  | 34,14 | 181,00 | 437              | 185,70          | 0.03 | 0.01  | 0,0387 | 0,1805 | 33,30           |

|                                 | Na     | K     | Ca    | Mg    | Cl     | HCO <sub>3</sub> | SO <sub>4</sub> | Fe    | Cu    | Al     | Mn     | NO <sub>3</sub> |
|---------------------------------|--------|-------|-------|-------|--------|------------------|-----------------|-------|-------|--------|--------|-----------------|
| INCA SON CATIU REGENERADA JUN12 | 191,4  | 29,3  | 62,5  | 33,0  | 253,4  |                  | 148,6           |       |       |        |        | <0,3            |
| INCA SON CATIU REGENERADA JUL12 | 196,60 | 28,27 | 63,74 | 30,01 | 247,41 | 268,06           | 165,15          | <0,01 | <0,01 | 0,0231 | 0,1527 | <0,1            |
| INCA SON CATIU REGENERADA AGO12 | 226,30 | 31,36 | 43,58 | 30,95 | 280,00 | 221              | 192,90          | <0,01 | <0,01 | 0,0175 | 0,1647 | 1,47            |

|                                    | Na     | K     | Ca    | Mg    | Cl     | HCO <sub>3</sub> | SO <sub>4</sub> | Fe    | Cu    | Al     | Mn     | NO <sub>3</sub> |
|------------------------------------|--------|-------|-------|-------|--------|------------------|-----------------|-------|-------|--------|--------|-----------------|
| MARIA DE LA SALUT REGENERADA JUN12 | 311,6  | 43,7  | 79,0  | 40,9  | 378,8  |                  | 117,3           |       |       |        |        | 0,46            |
| MARIA DE LA SALUT REGENERADA JUL12 | 266,00 | 41,68 | 98,18 | 40,40 | 385,60 | 312              | 224,85          | 0.01  | <0,01 | 0,0581 | 0,1921 | <0,1            |
| MARIA DE LA SALUT REGENERADA AGO12 | 354,10 | 48,32 | 33,79 | 43,28 | 439,00 | 394              | 167,80          | <0,01 | <0,01 | 0,0353 | 0,226  | 15,60           |

## Aguas subterráneas indígenas

La caracterización hidrogeoquímica de las muestras de agua se ha realizado con el apoyo de dos aplicaciones informáticas específicas de hidroquímica: Hydrochem V. (Rockware) y Aquachem 3.70. (Waterloo software). El primero de ellos genera salidas gráficas de diagramas hidroquímicos de calidad. El segundo es un paquete de programas de hidrogeoquímica que ayuda a caracterizar evolutivamente las muestras de un área en el espacio y en el tiempo. Entre sus aplicaciones cuenta con herramientas de generación de bases de datos de análisis y parámetros geoquímicos, cálculos (desde simples balances iónicos a evaluaciones estadísticas complejas), cálculos geotermométricos y fases minerales estables para muestras simples o grupos de muestras, lo que permite interpretar y comparar los datos geoquímicos de distintas aguas.

Los grupos de parámetros considerados indispensables para una caracterización hidroquímica adecuada han sido:

- 1) Identificación de la muestra y de las características del lugar del muestreo.
- 2) Datos físicos e hidrogeológicos relativos al punto de agua y parámetros del agua.
  - Cationes (Ca, Mg, Na, K, etc.).
  - Aniones (Cl, Br, SO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, etc.).
  - Parámetros inestables y elementos traza.

Dada su gran extensión, la caracterización específica de cada alícuota debe ser consultada en las referencias bibliográficas (EARSAC, 2013). A modo indicativo se presentan las muestras de los circuitos de interacción para una situación operacional inicial.

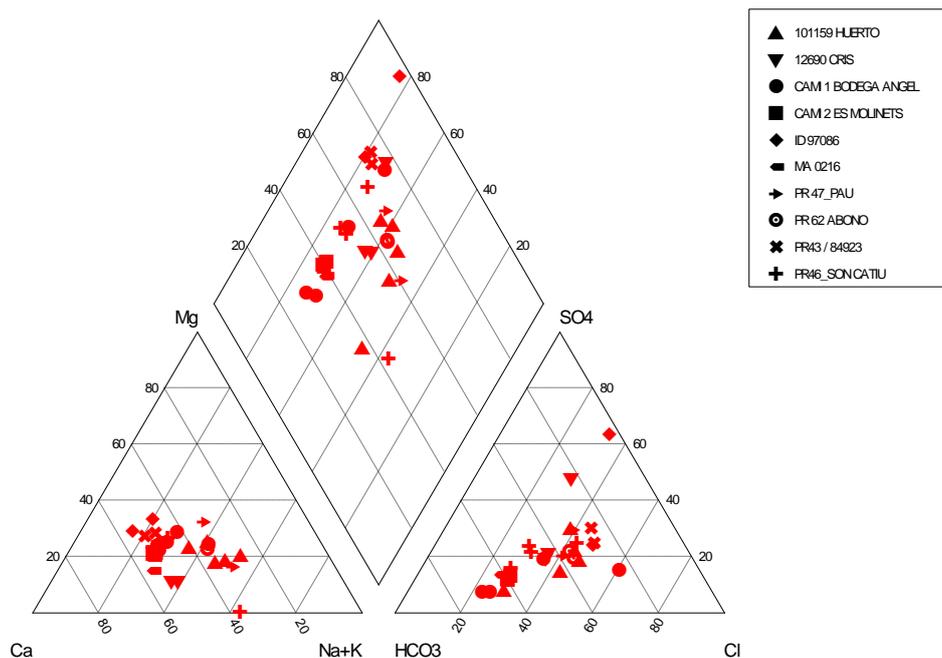


Figura 39. Hidrograma de Piper-Hill-Langelier para los puntos de agua de las tres redes de control establecidas.

En general son aguas bicarbonatadas y sulfatadas cálcicas, con proporciones variables de magnesio y sodio. Los resultados analíticos completos se encuentran en el anexo 1.

## Suelo

El estudio de la fracción “*suelo*” requiere un conocimiento exhaustivo del mismo que permita identificar los procesos hidroquímicos resultantes de la interacción y poder realizar previsiones evolutivas, tanto para su zona no saturada como saturada. Para ello es preciso conocer la composición de determinadas formaciones y el análisis de suelos y fases minerales estables en distintas zonas del acuífero. También realizar una caracterización precisa de las aguas subterráneas y del medio sólido por el que discurren y del que adquieren su quimismo.

La metodología aplicada requiere las siguientes técnicas:

- Muestreo de la fase sólida.
- Testificación detallada.
- Análisis geoquímicos de los suelos (fracción sólida): parámetros químicos, salinidad, pH, porosidad e índice de estabilidad estructural.
- Conocimiento de la mineralogía. Determinación de las fases minerales.
- Estudio o estimación de la capacidad de autodepuración del terreno.

Los análisis específicos de los suelos se encuentran en el apartado de edafología y en las memorias técnicas del proyecto (EARSAC, 2013).

## Caracterización del medio receptor: acuífero

Se ha recopilado la siguiente información:

- Antecedentes
- Contexto geológico e hidrogeológico.
- Condiciones de contorno: Definición de los límites hidrogeológicos del acuífero.
- Levantamiento de columna/s litoestratigráfica/s tipo.
- Piezometría. Cartografía hidrogeológica.
- Funcionamiento del acuífero.
- Calidad de las aguas, grado de contaminación y presiones. Cartografía hidroquímica.
- Cierre del balance hídrico (transferencias laterales, infiltración, pérdidas, extracciones, etc.).

La caracterización previa al estudio de los productos de interacción para las tres zonas de estudio se presenta a continuación, como ejemplo de aplicabilidad y de la complejidad del proceso, especialmente en acuíferos multicapa.

## FASES MINERALES EN LOS PROCESOS DE INTERACCIÓN. SECTOR SANTA MARIA DEL CAMÍ.

En cabecera, la fase mineral más abundante a tenor de la composición química de sus aguas subterráneas es en forma de productos de alteración de carbonatos (59,73 mmol), seguido de yesos (0,70 mmol); o bien otras fuentes de calcio de la alteración de carbonatos y silicatos. Aparecen también una concentración importante de sales tipo halita (0,46 mmol) y otras fuentes de sodio, como podría ser la presencia de feldespato albita o incluso una concentración relevante en el agua de lluvia de este elemento. En menor concentración se detecta la presencia de fases estables carbonatadas tipo calcita y dolomita (0,30 mmol), que con frecuencia se confunden con productos de alteración de carbonatos.

En el otro extremo del circuito, las fases minerales estables deducidas a partir de la concentración de determinados iones en sus aguas subterráneas tras los procesos de interacción con el acuífero han experimentado ligeras variaciones. Se aprecia un enriquecimiento importante en yeso disuelto (0,83 mmol), productos de la alteración de carbonatos y silicatos (0,59 mmol) y sales tipo halita o procedentes de la albita por procesos de intercambio catiónico (0,50 mmol). En definitiva la mineralización por envejecimiento se produce, especialmente, por la disolución de fases salinas cálcicas y sódicas en su circuito de interacción.

## FASES MINERALES EN LOS PROCESOS DE INTERACCIÓN. SECTOR INCA (CIRCUITO SUPERFICIAL)

El circuito de interacción más superficial de las aguas subterráneas tiene una importante variedad de minerales estables, cuya disolución determina la calidad química de las aguas subterráneas. Esto conlleva que la complejidad en el proceso de cálculo sea importante, debido, principalmente, al alto espesor del suelo sobre el sustrato rocoso y a la entrada de procesos contaminantes desde el punto de partida del circuito de interacción. Estos tienen en algunos casos un claro origen agrario (fertilizantes) y elementos minoritarios que podrían corresponder a filtraciones, fugas o vertidos. Se da la circunstancia de que este punto se encuentra en las inmediaciones de la depuradora.

Entre los elementos que aporta el *Rock Source Deduction Analysis*, más importantes y por orden decreciente, cabe destacar la presencia de carbonatos alterados, cuya interpretación es confundible con silicatos (9,99 mmol), seguido de una fuente importante de calcio que bien se puede manifestar en forma de carbonatos (calcita y dolomía, 9 mmol), o silicatos en una concentración de 0,72 mmol excluyendo al yeso y anhidrita. La calculadora hidroquímica también indica la presencia de feldespato sódico tipo albita alterada (1,38 mmol) y plagioclasa. La fuente adicional de calcio es atribuida a alteración de evaporitas y salmueras, apuntando además el posible origen a través del agua de lluvia o de la probable presencia de procesos contaminantes antrópicos.

Al igual que en el sector previo, se detecta una menor amplitud en la *suite* de fases minerales estables. La principal fuente de calcio procede de fuentes carbonatadas o silicatadas (0,81 mmol), excluyendo facies sulfatadas cálcicas. Hay una presencia también importante de facies cálcicas procedentes de la alteración de evaporitas (0,64 mmol). En una concentración parecida aparece ión sodio (0,53 mmol), procediendo posiblemente de procesos de intercambio catiónico directo.

#### FASES MINERALES EN LOS PROCESOS DE INTERACCIÓN. SECTOR INCA (CIRCUITO PROFUNDO)

Para el mismo sector pero siguiendo un circuito de captaciones más profundas y con una orientación parecida a la del circuito de interacción previo, de nuevo encontramos una abundante variedad de fases en los términos iniciales de la serie. Conviene mencionar que las captaciones muestreadas manifiestan procesos de mezclas de aguas, por lo que, a pesar de tener una mayor profundidad, las aguas del circuito superficial alcanzan las captaciones del profundo en la mayoría de los casos. Esta mezcla resultó ineludible al utilizar pozos de agricultores, sin haber perforado una red de control propia aislando tramos, que sería la situación deseable.

En este sector, y contrariamente a lo que era previsible, la mayor parte del ión calcio encontrado es atribuido a la presencia de calcita y dolomía (1.276 mmol), rocas que integran mayoritariamente el acuífero perforado por estas captaciones. También la disolución de facies sulfatadas, tipo yeso y anhidrita, en concentración superior que en el circuito superficial (7 mmol), e iones alcalinos y alcalinotérreos procedentes de procesos de intercambio catiónico en hasta (14,2 mmol). Estos se atribuyen a la presencia de albita alterada y minerales ferromagnesianos. La alteración de rocas carbonatadas, en especial dolomita, aporta además 6,8 mmol, que podría estar en forma de arcilla de descalcificación en el interior del macizo rocoso. Las facies salinas más sódicas se atribuyen a la alteración de sales tipo halita y otras evaporitas sin especificar.

El punto de agua situado más “aguas abajo” de la serie presenta una analítica menos detallada que los otros, al ser datos facilitados por los organismos colaboradores. El sondeo de Son Catiú ha sido muestreado y analizado. En este circuito también hay unas pautas evolutivas generales, como es el enriquecimiento de calcio en las aguas subterráneas procedente de una fuente tipo rocas carbonatadas o silicatos alterados (510 mmol) o sin alterar (7,78 mmol), así como yeso (0,5 mmol). La fuente de sodio principal procede de evaporitas (0,73 mmol) o bien de procesos contaminantes, habiendo una fuente adicional no salina atribuida a procesos de intercambio catiónico (0,52 mmol). La alteración de feldespato plagioclasa aporta además sodio, potasio y calcio (0,08 mmol).

#### FASES MINERALES EN LOS PROCESOS DE INTERACCIÓN. SECTOR MARÍA DE LA SALUT

Habida cuenta de que el nivel del agua en este sector es relativamente somero y el circuito de aguas subterráneas tiene una clara orientación desde el oeste hacia el este,

no procede diferenciar un flujo superficial de otro más profundo. Si bien hay que tener en cuenta que al efecto antrópico en la evolución de la calidad de las aguas como consecuencia del abonado y del uso de aguas regeneradas, cabe añadir un factor adicional, como es la presencia de un torrente semiparalelo al circuito de flujo por el sur. Su interacción con las aguas subterráneas es evidente y directa, dado que dicho arroyo tiene un carácter influente.

En el punto de agua muestreado en el extremo Oeste del circuito (aguas arriba) no es previsible una fuerte influencia antrópica, al estar en el margen de una zona boscosa sin cultivar. Las fases minerales más significativas en el sustrato es la dolomía, al tratarse de un macizo rocoso de este material, con intercalaciones de yeso en forma de lentes, y con un espesor de suelo relativamente moderado, que en general corresponde a un regolito superficial.

De este modo el porcentaje más alto, conforme a la misma calculadora hidroquímica, corresponde a la alteración de carbonatos en el proceso de interacción (1.347 mmol), en ocasiones manifestando ambigüedad con silicatos (7,78 mmol) y dolomía en su término puro (7,77 mmol). Con menor relevancia cabe destacar la presencia de una fuente de sodio, potasio y calcio atribuible a feldespatos alterados tipo plagioclasa (1,43 mmol) y evaporitas (0,51 mmol). A pesar de haberse detectado lentes de yeso en la serie, su influencia se cuantifica en 7 mmol. El origen del calcio restante y de los sulfatos es atribuido en mayor medida a salmueras, procesos de intercambio catiónico, alteración de salmueras y evaporitas e incluso una posible intrusión marina.

Parece evidente que este proceso de cálculo, dado que se trata de una primera aproximación a la realidad hidrogeoquímica, apenas considera los procesos antrópicos que intervienen en el sistema.

Al igual que en los casos anteriores, los procesos de interacción hidrogeoquímica determinados como más posibles distinguen unas fases minerales estables, cuya principal fracción se debe a la disolución del yeso (7,0 mmol). A continuación de la disolución de sales tipo halita (0,51 mmol), de la alteración de carbonatos tipo dolomía o silicatos (0,28 mmol), y de la meteorización de la plagioclasa como mineral cuya alteración representa una fuente de sodio, potasio y calcio.

## EN SÍNTESIS

Como denominador común para las tres zonas de estudio, cabe destacar:

El tipo de acuífero, su funcionamiento, su composición química y su edad son factores determinantes de su efecto sobre el quimismo de las aguas en todas las zonas piloto.

La disolución del yeso se confirma como el proceso de mayor influencia en el circuito de aguas subterráneas. Cabe la posibilidad de que a medida que avanzan “aguas abajo”, la interacción con facies sulfatadas evaporíticas sea mayor, hipótesis que requeriría conocer el acuífero con mayor detalle.

La evolución hidrogeoquímica de las aguas denota la existencia de dos tipos de flujo, uno por acuíferos profundos, generalmente semiconfinados o confinados conectados hidráulicamente, y un flujo superficial, de aguas jóvenes y escasamente mineralizadas. Se producen frecuentes procesos de mezclas de aguas entre las dos tipologías reseñadas, especialmente en los sondeos de Inca.

El flujo superficial y subálveo caracteriza a las aguas jóvenes, con escaso tiempo de permanencia en el acuífero, escasa salinización y alta vulnerabilidad ante procesos contaminantes. Los acuíferos más vulnerables son aquellos que funcionan en régimen libre, con el nivel freático situado muy cerca de la superficie (en ocasiones a menos de 1 m) y recubrimiento cuaternarios sobre diferentes sustratos.

La mayor parte de estas casuísticas corresponde a acuíferos hipodérmicos constituidos por depósitos aluviales, limolitas y arcillas rojas con cantos de caliza; en otros sectores aparecen gravas y bolos de cantos de caliza con una matriz de limos y arcillas limolíticas rojas. Su espesor es pequeño, su permeabilidad muy variable y su uso, en general, escaso (la mayor parte de los pozos que lo explotaban están, actualmente, sin uso, constituyendo un riesgo potencial de entrada de procesos contaminantes, o fueron reprofundizados hacia niveles acuíferos más profundos).

En estos niveles superficiales aparecen distintos niveles de encostramientos y presencia de lentes de precipitados en general carbonatados, relacionados directamente con las oscilaciones del nivel freático.

El agua en estos niveles acuíferos tipo “recubrimiento” presenta una calidad química deficiente para el consumo y riego (exceso de cloruros, sulfatos, nitratos y ocasionalmente nitritos) y por su contenido microbiológico, debido a las labores agrícolas y la preexistencia de fosas sépticas con posibles fugas o vertidos.

Por debajo de estos recubrimientos aparecen, con frecuencia, acuíferos de materiales del Oligoceno y comportamiento semiconfinado, con alternancia de materiales permeables y semipermeables o impermeables. Son acuíferos con una cierta compartimentación, lo que da lugar a niveles freáticos muy variables (entre 10 y 40 m de profundidad en general) y productividad variable. Se utilizan exclusivamente para regadío y, en escasa medida, para abastecimiento doméstico. En general la calidad química y microbiológica del agua es aceptable con algunas excepciones, debidas a procesos contaminantes orgánicos (contaminación microbiológica) y nitratos.

Los niveles acuíferos terciarios formados en el Mioceno tienen, en general, comportamiento en régimen libre, permeabilidad alta y nivel freático entre 55 y 70 m de profundidad (dependiendo de la cota del terreno). Los litosomas más abundantes son margas con yesos, areniscas, calizas bioclásticas y conglomerados calcáreos. Estos niveles acuíferos se usan para regadío, abastecimiento doméstico y, en ocasiones, abastecimiento urbano cuando las captaciones explotan sectores localizados aguas arriba (según la dirección del flujo subterráneo) de las zonas de riego.

La relación con la red hidrográfica superficial es un factor muy importante a tener en cuenta, en especial si los ríos o arroyos son influentes, es decir, se infiltra una fracción

de su volumen hacia el acuífero. La variabilidad de su calidad química es dependiente de la época del año y de su relación con las zonas regables (en ocasiones están conectados con azarbes y sistemas de drenaje). Aquellas zonas piloto que presentan un cauce superficial han provocado que el estudio del comportamiento de las aguas subterráneas resulte más complicado, por la variabilidad temporal de los procesos de interacción y por la entrada de un “polo frío” al sistema muy cambiante.

#### **5.4.2 Capacidad de autodepuración del terreno**

El principal problema que presentan los acuíferos arenosos y kársticos es su alta vulnerabilidad a la contaminación ante vertidos directos de sustancias nocivas.

En los casos “controlados” el problema se reduce a la capacidad de las plantas de tratamiento para eliminar sólidos en suspensión y contaminantes orgánicos. En este estudio se han analizado además los elementos traza y algunos “emergentes”. Esta preocupación ante los elementos traza se justifica porque el origen de las aguas tiene, en uno de los sectores (Inca), una componente industrial. En los restantes, por lo general, las industrias existentes tienen escasa capacidad contaminante y no generan microconstituyentes en abundancia. Las aguas de origen agrícola presentan alta contaminación orgánica y alto potencial de contaminación difusa. Las de origen concretamente ganadero suelen presentar concentraciones importantes en trazas, tipo cobre y cinc, que han sido evaluadas.

Los casos “incontrolados” son escasos, y son más atribuibles al desconocimiento del efecto que producen los vertidos conocidos sobre el acuífero que a la presencia de vertidos de forma irregular.

Basándonos en la técnica de los escenarios análogos, se han estudiado las experiencias de ensayos similares en otros países. En concreto, se ha recurrido a las experiencias en el Reino Unido de utilización de los acuíferos como almacén de efluentes residuales tales como (Bouwer and Maddock, 1997), quienes indican que la recarga artificial con aguas de buena calidad es un medio efectivo para eliminar sustancias nocivas (con excepciones).

#### **5.4.3 Naturaleza del acuífero**

Cualquier lugar susceptible de ser utilizado para la recarga de efluentes residuales deberá ser investigado desde el punto de vista geológico, haciendo un estudio pormenorizado de la presencia de drenes, anomalías hidrogeológicas, etc.

En el estudio geológico no se han detectado estructuras tectónicas importantes que puedan estar involucradas con la velocidad de infiltración de los efluentes. Tan sólo se ha apreciado una cierta adaptación de la cobertera sedimentaria a unas alineaciones del sustrato calcáreo, que funcionan como drenes de orientación NNO-SSE, a través de los cuales parece haber un drenaje de las aguas del acuífero y, consecuentemente, de los efluentes infiltrados.

Las arcillas presentes aparecen en forma de lentejones esporádicos de escasa potencia, o bien en lentes, o conforman el regolito como arcilla de descalcificación.

Suele aparecer en abundancia fracciones limosas y margosas, con frecuencia cementados por carbonatos. En las muestras observadas hay además indicios de materia orgánica.

La capacidad de intercambio catiónico del suelo con el agua es relativamente alta, habida cuenta de la alta capacidad de retención de agua por parte de la fracción arcillosa.

En cuanto a la distribución del tamaño del poro, a continuación se presenta una gráfica relativa a la capacidad de filtración de microorganismos dependiendo de la granulometría del suelo (Figura 40). En ella se puede apreciar que el tipo de suelo presente en la zona retiene en zona no saturada la mayor parte de los hongos y protozoos del sistema, pudiendo alcanzar la zona saturada los restantes microorganismos dependiendo de su tiempo de residencia.

En los ensayos de permeabilidad realizados se ha estimado una permeabilidad vertical de hasta 2 m/día (aluvial Salut) por lo que la mayoría de los microorganismos pueden alcanzar el nivel freático en dos días con un gradiente hidráulico vertical inducido.

Esta velocidad de propagación lógicamente depende del tipo de microorganismos presentes en las aguas regeneradas. En general puede haber bacterias coliformes que han sobrevivido al proceso depurador, cuya pervivencia está supeditada a algunos factores como su densidad y dimensiones, la temperatura del suelo y ambiental, la humedad del suelo en zona no saturada, el flujo vertical, el tipo y concentración de iones en solución en el suelo, etc. Influyen además la naturaleza de la materia orgánica en suspensión y la actividad de la microfauna del suelo.

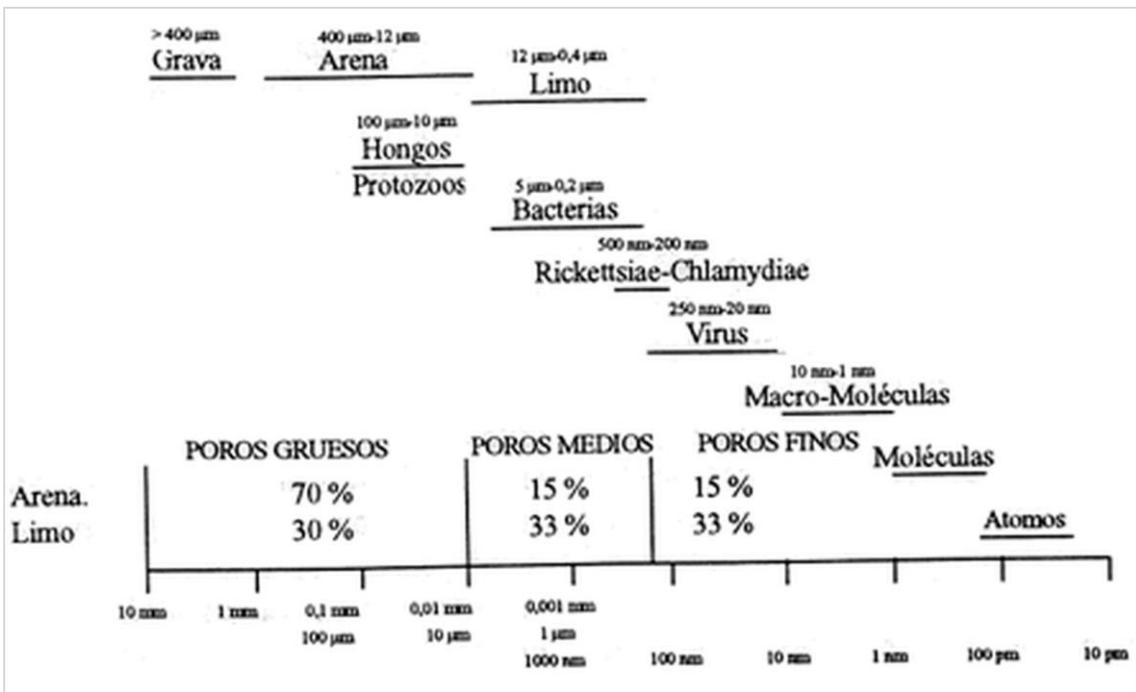


Figura 40. Gráfico en el que se comparan el tamaño de bacterias, virus y moléculas con diámetros equivalentes de los poros. Fuente: ITGE, 1998.

A continuación se desglosan los factores más influyentes:

### **Cantidad de nutrientes**

Es un factor limitante del desarrollo bacteriano. En el estudio realizado por el ITGE “Estudio metodológico de los procesos de contaminación bacteriológica de las aguas subterráneas. Aplicación a los acuíferos del Norte de España” (en ITGE, 1990), se demuestra la correlación proporcional inversa entre el contenido en bacterias y el contenido en fósforo del agua. En cuanto al nitrógeno, la relación es dependiente del tipo de bacteria, fenómeno corroborado en las tres zonas de estudio.

### **Humedad**

Las bacterias suelen desarrollarse mejor en medios con facilidad de retención de agua.

### **Luz**

La luz tiene efectos inhibidores sobre bacterias no pigmentadas. Los factores de la luz se ven modificados por otros factores como la temperatura.

### **pH y potencial Redox**

Las bacterias sólo aparecen en rangos de pH de 4 a 9, que son rangos de aguas naturales. El potencial redox (Eh) dependerá del tipo de bacteria que sea, aerobia o anaerobia, necesitando un potencial Redox mayor las primeras que las segundas.

### **Presencia de metales**

Se ha observado que algunos metales en el agua tienen efectos bactericidas, como ocurre con el cobre, mercurio, plata, arsénico, selenio, etc.

### **Presión hidrostática**

Las bacterias de suelos y aguas dulces no crecen a presiones superiores a 200 atmósferas.

### **Temperatura**

La tasa metabólica bacteriana aumenta con la temperatura. Las bacterias parásitas del hombre en las aguas subterráneas desaparecen de forma más rápida al aumentar la temperatura.

### **Turbidez**

Los factores que influyen en la turbidez son las partículas finas de origen mineral, los detritus constituidos por material inorgánico y orgánico y los microorganismos. Si el aumento de la turbidez conlleva un aumento de bacterias, suele ser debido a un aumento del contenido en materia orgánica.

## Salinidad

La salinidad influye de forma considerable en el tipo de microorganismos que hay en el agua dulce. El rango óptimo depende del tipo de cultivo.

## Gases

La mayoría de los microorganismos son anaerobios facultativos (se adaptan a presencia o ausencia de oxígeno). Se ha observado que las variaciones del contenido en oxígeno de las aguas subterráneas no afecta a las restantes aerobias, que no se desarrollarán en condiciones de presiones parciales de oxígeno bajas.

Según estudios de los autores citados al comienzo del apartado, una zona no saturada de al menos 10 m de potencia asegura la capacidad del acuífero para depurar residuos. En Inca y Salut los niveles se encuentran en torno a esta profundidad, aunque cabe esperar un ascenso del nivel freático durante la recarga por retorno del riego. La Figura 41 representa la disminución del contenido de bacterias en zona no saturada en función de la litología y del espesor de la columna de suelo.

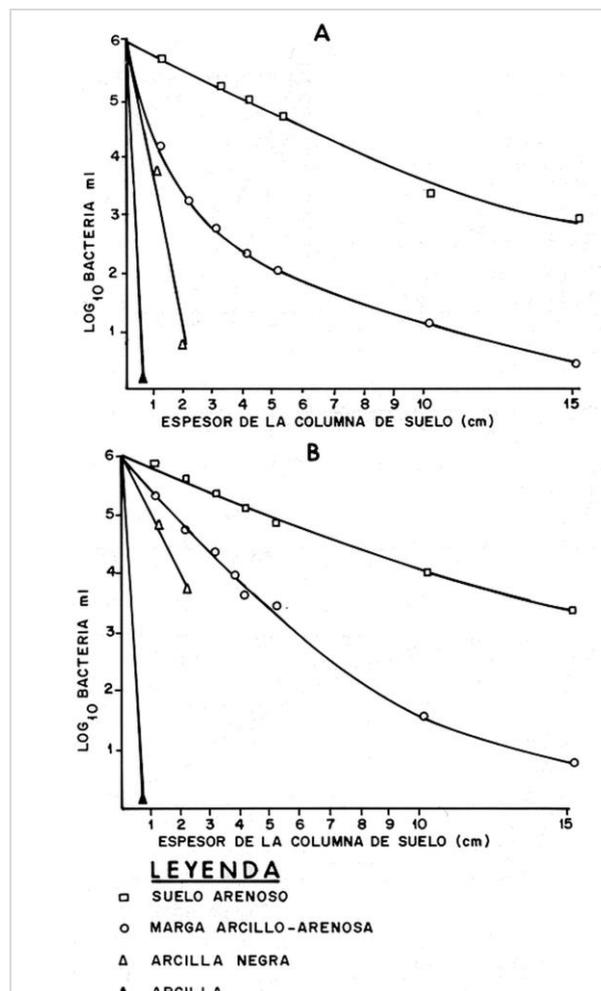


Figura 41. Disminución del contenido en bacterias de un acuífero en función del tipo de material. Tomado de Crane & Moore, 1984.

## Contaminación química

La movilidad de los diferentes contaminantes químicos depende de su naturaleza y de las condiciones del medio. Los más importantes son:

- 1) **Metales pesados:** su mayor o menor movilidad depende de la presencia de aniones con los que se puedan combinar formando compuestos más o menos solubles. En presencia de ácidos húmicos forman complejos en los que quedan retenidos de forma irreversible; por tanto, su concentración disminuye en las aguas subterráneas y adquieren un cierto retardo hasta que se incorporan a la zona saturada.
- 2) **Hidrocarburos:** ligados a la actividad urbana o industrial. Antes de infiltrarse en el terreno pierden los volátiles, siendo posteriormente la dilución y la degradación bacteriana los responsables de su desaparición.
- 3) **Plaguicidas:** la solubilidad en el agua es uno de los factores más importantes que influyen en su transporte. Si se producen retenciones por fenómenos de absorción, su eliminación será provocada por la degradación bacteriana.

Los productos residuales, normalmente, son altamente nitrogenados y clorurados y con contenidos bajos en hierro y manganeso. Presentan abundantes bacterias, escaso oxígeno disuelto y, salinidad y demanda bioquímica de oxígeno altas.

## Contaminación bacteriológica

Su procedencia es de las explotaciones ganaderas, industrias en general y vertidos urbanos (aguas grises) sobre todo.

Los microorganismos que se generan en los residuos industriales no suelen ser de patología dañina para el hombre, aunque se generan gran número de especies. Los vertidos urbanos generan un número de agentes patógenos bastante mayor, de los cuales algunos de estos microorganismos tienen parte de su ciclo de vida en medio hídrico, por lo que su tiempo de permanencia en el agua es mucho mayor.

La cinética de degradación (eliminación en bacterias, inactivación en virus) sigue la ley exponencial:

$$C_t = C_0 \exp [-\lambda t (t-t_0)]$$

Donde:

- $C_0$  = concentración inicial
- $C_t$  = concentración a un tiempo
- $\lambda t$  = constante de eliminación de bacterias o de inactivación de virus.
- $\lambda t = 0.693/T$  siendo T el tiempo en el cual la mitad de bacterias o virus han desaparecido.

Los estudios realizados hasta la fecha en el acuífero desprenden unos valores que, en general, varían de 1 a 30 días para las bacterias, y de 10 a 100 días para los virus.

Los siguientes gráficos son indicativos del tiempo de supervivencia de distintos tipos de bacterias (*Salmonella typhimurium*, *Escherichia coli* y *Enterococcus faecalis*) (Figura 42), y dos tipos de virus (poliovirus y fagos) en las aguas subterráneas (Figura 43).

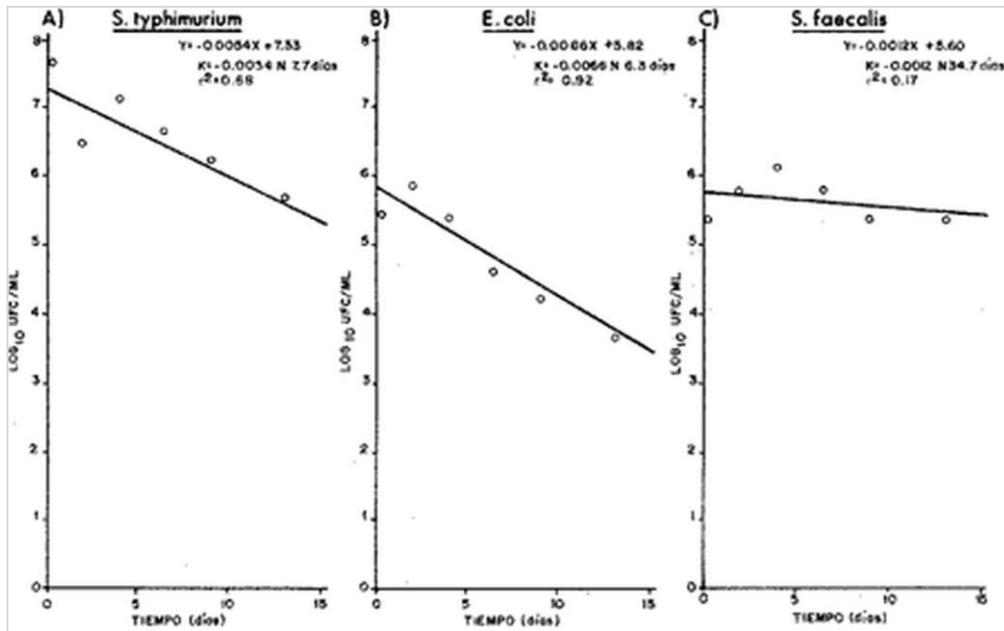


Figura 42. Gráfico que muestra la supervivencia de varios tipos de bacterias en aguas subterráneas. Fuente: Bitton, 1998.

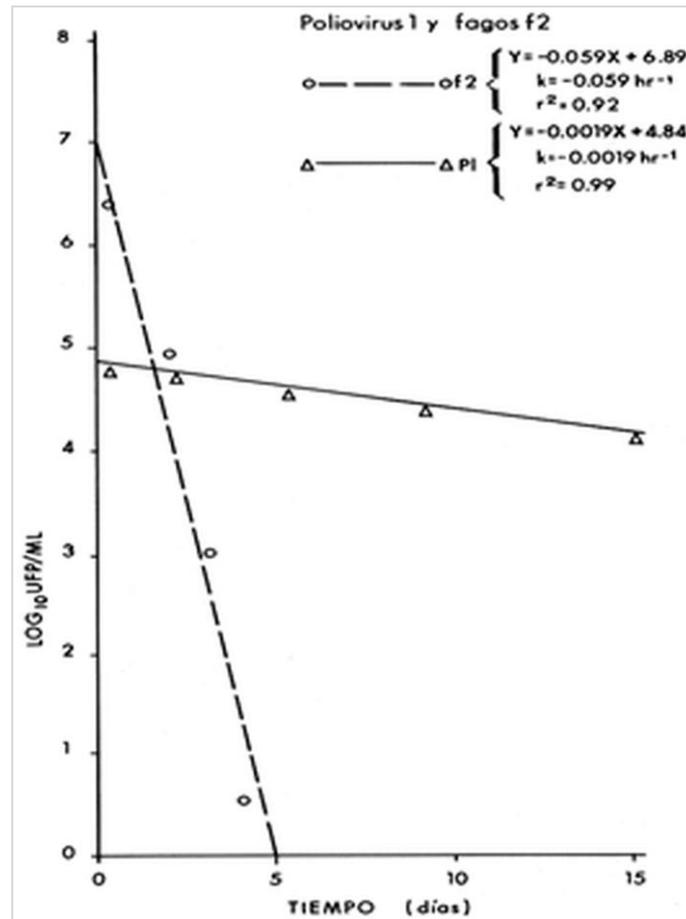


Figura 43. Gráfico que muestra la supervivencia en aguas subterráneas de dos tipos de virus. Fuente: Bitton, 1998.

### Interacción entre la naturaleza del acuífero y la composición de los residuos

La perdurabilidad de la contaminación en el agua subterránea radica principalmente en el tiempo de tránsito, que puede ser mayor que el período de degradación o inactivación del agente contaminante, en cuyo caso no se produce contaminación alguna del agua del acuífero o viceversa.

Si la permeabilidad es media-alta, como es el caso de estos acuíferos, el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en la zona saturada es medio-alto, dependiendo de la profundidad del nivel del agua.

No es previsible encontrar problemas de contaminación con metales pesados libres debido a que se asocian con los sólidos en suspensión de la disolución coloidal (Pescod y Arar, 1985).

En las zonas de estudio la interacción entre las líneas de flujo y el acuífero sigue las siguientes orientaciones: en *Santa María del Camí* es Norte-sur, drenándose hacia la Bahía de Palma; en Inca se ha establecido un circuito conectando pozos con el nivel freático somero y otro conectando sondeos con el nivel del agua bajo 20 m de profundidad, y el sentido general de flujo de las aguas subterráneas es nor-noroeste-

este-sudeste; y en *Maria de la Salut*, con sentido suroeste-noreste, drenándose hacia la bahía de Alcudia.

Las cartografías hidrogeológicas locales actualizadas han permitido apreciar que no se ha detectado un “efecto de vaciado” acumulativo en estos sectores, la respuesta de los acuíferos ante las precipitaciones es diferida, con períodos de retardo de hasta 40 días, al tratarse de acuíferos calcáreos de baja inercia con un cubrimiento detrítico de espesor variable. Se han detectado algunos puntos “anómalos”.

#### **5.4.4 Modelización Hidrogeoquímica**

Este apartado presenta los resultados obtenidos de la modelización hidrogeológica mediante un modelo de transporte reactivo. El objetivo de la modelización es reproducir los procesos naturales que se están produciendo en el acuífero y evaluar el efecto de las aguas regeneradas sobre el acuífero. Par la modelización se ha empleado el software Comsol Multiphysics (COMSOL, 2015a), con el cual se ha realizado un modelo en 3 dimensiones de flujo y transporte transitorio reactivo en condiciones de saturación variable.

Para el desarrollo del modelo se han utilizado las características hidrogeológicas e hidrogeoquímicas de la zona de Inca, Mallorca. Si bien la gran parte de los procesos implementados en el modelo son extrapolables a otros sites análogos y a los estudiados con pequeñas variaciones de las condiciones de contorno.

Un valor añadido del empleo del software COMSOL es la capacidad del software para desarrollar aplicaciones personalizadas para el problema que se quiera ensayar, en este caso el efecto del riego (COMSOL, 2015b).

#### **Modelo conceptual**

El modelo desarrollado comprende un dominio rectangular paralelo a la dirección de flujo (Figura 44) en la zona de Inca, Mallorca. El área modelizada cubre una superficie de aproximadamente 567 hectáreas, de las cuales 167 son zonas regadas con aguas regeneradas. La Figura expone el área del modelo y los puntos de agua subterránea inventariados empleados para el calibrado y validación del mismo.

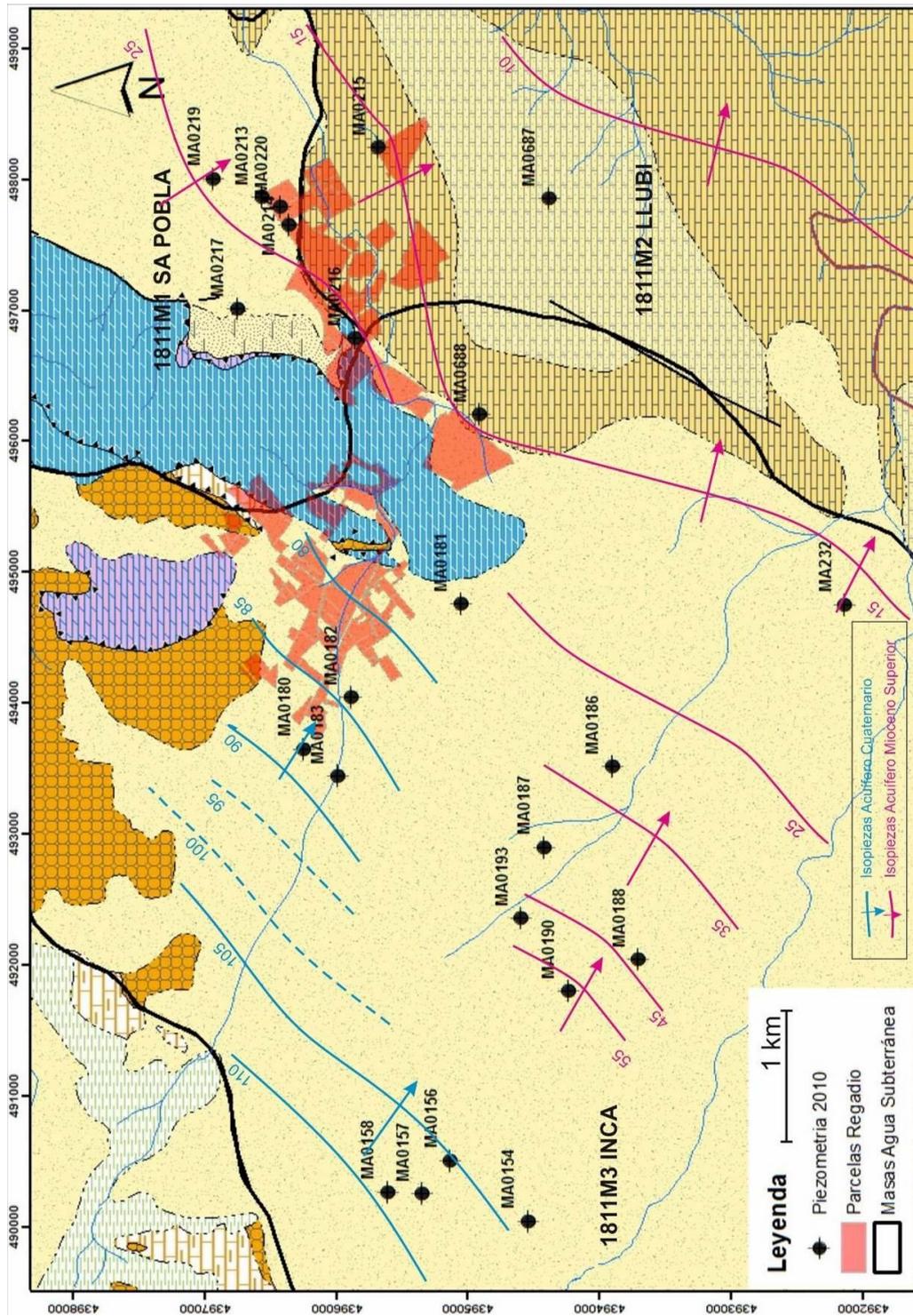


Figura 44. Piezometría local del acuífero Cuaternario y Mioceno (Datos octubre 2010 DGRH). Base mapa geológico local (Fuente: <http://ideib.caib.es>).

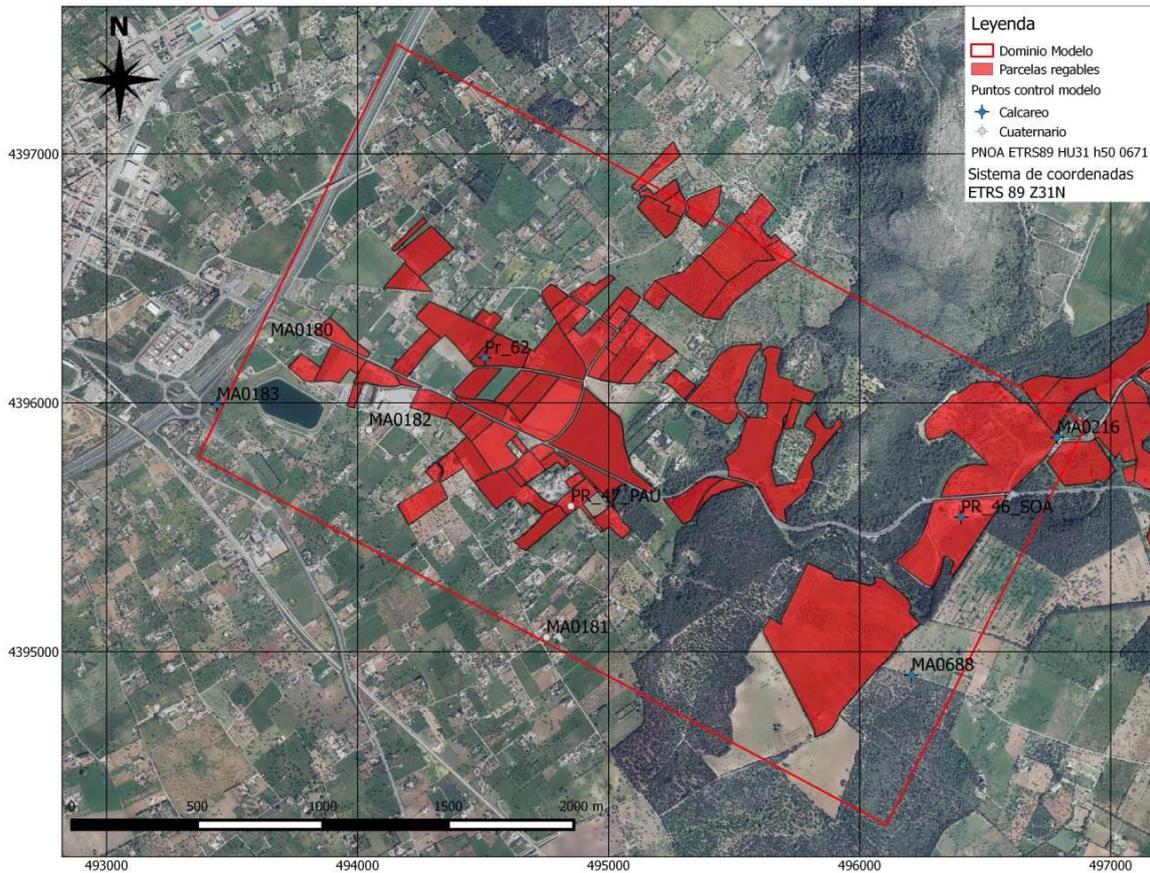


Figura 45. Foto área de la zona de estudio con las parcelas regadas con agua regenerada resaltadas en rojo. Los puntos de agua subterránea de los cuales se tiene información están representados con puntos azules (pozos perforados en el acuífero calcáreo mioceno) y grises (pozos pertenecientes al acuífero cuaternario-pleoceno).

En base a los datos presentes en la bibliografía (Plan Hidrológico de *les Illes Balears*, 2009, rev. 2016; Lopez-García y Mateos, 2003) se diferencian cinco materiales distintos atendiendo a sus propiedades hidráulicas, los cuales, de más recientes a más antiguos son suelo, cuaternario y plioceno, margas miocenas tardías, calizas miocenas y calizas liásicas. La Figura 46 muestra la disposición de los materiales en un corte geológico esquemático paralelo a la dirección de flujo (Noroeste-Sureste).

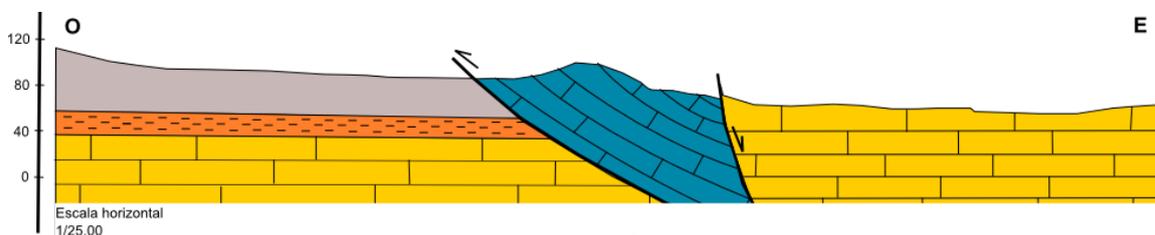


Figura 46. Corte geológico esquemático con los materiales diferenciados en el modelo. Gris = Cuaternario + plioceno, naranja = Margas miocenas, amarillo = calizas miocenas y azul = Calizas liásicas. Por debajo de las calizas aparecen unidades impermeables. Modificado del “Estudio hidrogeológico del impacto a las aguas subterráneas del regadío mediante aguas residuales depuradas en Inca”.

La Tabla 41 muestra los parámetros hidráulicos empleados para cada material. Estos han sido obtenidos a partir de las fichas de caracterización de las masas de aguas subterráneas incluidas en el Plan Hidrológico de *les Illes Balears* (PHIB) del 2009 y modificados durante la calibración del modelo.

Tabla 41: Parámetros hidráulicos base empleados para los diversos materiales en el modelo. Modificado de PHIB (Plan Hidrológico de *les Illes Balears*, 2009, rev. 2016).

| Material             | K (m/d) | Porosidad | Referencias |
|----------------------|---------|-----------|-------------|
| Suelo                | 5       | 0,15      | --          |
| Cuaternario/Plioceno | 5       | 0,15      | PHIB,2009*  |
| Margas               | 0,001   | 0,05      | PHIB,2009*  |
| Calizas Miocenas     | 50      | 0,05      | PHIB,2009*  |
| Calizas Liásicas     | 2       | 0,05      | PHIB,2009*  |

Por último, la Figura 47 muestra la malla de elementos finitos empleada en la simulación de flujo y la discretización de materiales. La capa de suelo se ha mallado con prismas para poder obtener una mayor discretización vertical. En la figura también se observa el refinado de la malla en la capa de suelo y en la capa de margas donde se han diferenciado cinco elementos en la vertical.

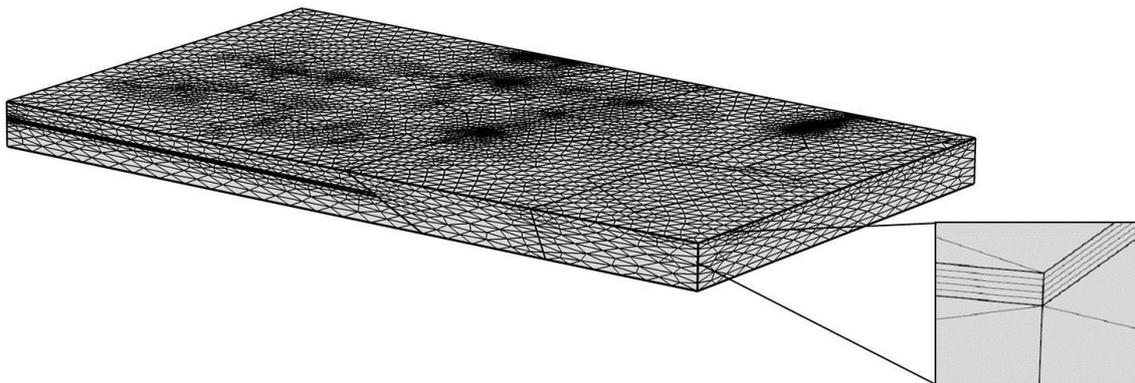


Figura 47. Imagen de la malla de 135.364 elementos y detalle de la discretización vertical en la zona del suelo.

Para el transporte reactivo se ha reducido el número de elementos a 61.424, manteniendo la discretización vertical del suelo y del acuífero.

### Geoquímica

Los principales procesos que se han modelizado son, la mezcla de aguas de distinto origen, la adsorción de metales pesados en los distintos materiales y la degradación de materia orgánica siguiendo la secuencia redox.

La adsorción de metales pesados en la fase sólida está expresada por las relaciones:

$$c_{P,i} = k_{P,i} c_i$$

$$k_{p,i} = \frac{\partial c_{p,i}}{\partial c} = \frac{\partial}{\partial c} (k_{p,i} c_i)$$

Donde  $c_{p,i}$  es la fracción adsorbida y  $c_i$  la concentración disuelta.

Por otro lado, los procesos de degradación de materia orgánica propuestos siguen la secuencia redox propuesta por Appelo y Postma (2013). Estos procesos están resumidos en la Figura 48.

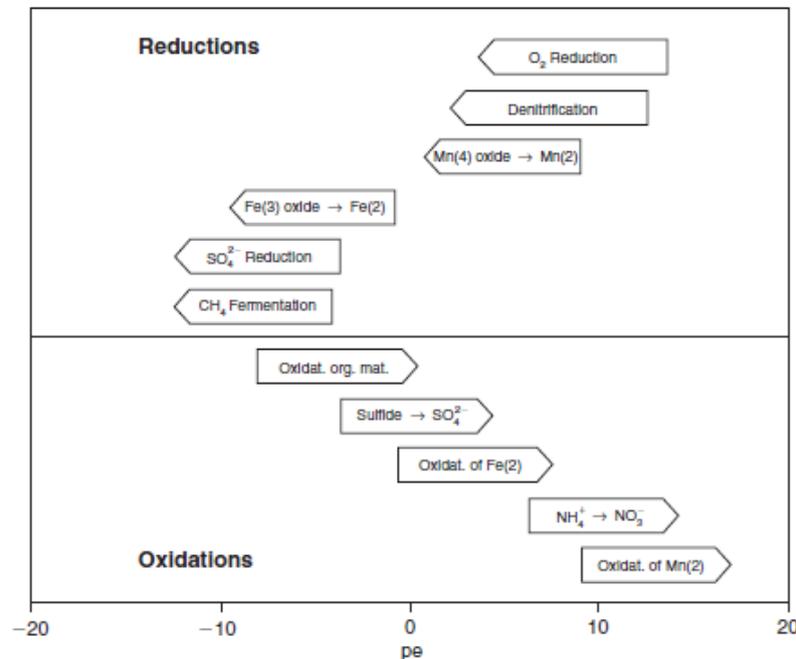
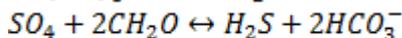
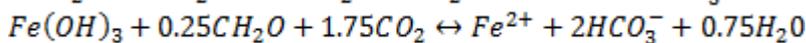
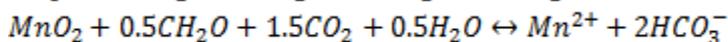
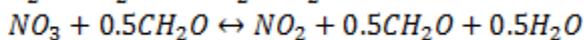
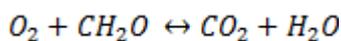


Figura 48. Secuencias importantes en los procesos redox. Fuente: Appelo y Postma, 2013.

Las reacciones incluidas en el modelo consisten en la oxidación de materia orgánica, nitrato, manganeso, hierro y sulfato y se formulan de la siguiente forma:



La secuencia de degradación de materia orgánica se produce de forma secuencial. Estas reacciones se han incluido en forma de cinéticas de segundo orden con las siguientes expresiones:

$$\frac{\partial a}{\partial t} = -k_a \cdot [a][CH_2O]$$

Donde  $k$  es una constante que puede ser calibrada y  $a$  es el elemento que se degrada.

Con estas expresiones la velocidad de degradación de los distintos elementos es función de la cantidad de especies reaccionantes presentes en el agua. Como se ha explicado anteriormente, las reacciones actúan de forma secuencial de manera que no

se activan hasta que la concentración del elemento superior no es inferior a un límite determinado.

## Modelo numérico

### DESCRIPCIÓN DE ECUACIONES

COMSOL resuelve el flujo de aguas subterráneas en medios de saturación variable mediante la ecuación de Richards por medio del método de elementos finitos. La ecuación de Richards para simulaciones transitorias es definida de la siguiente forma:

$$\rho \left( \frac{C_m}{\rho g} + S_e S \right) \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \left( -\frac{k_s}{\mu} k_r (\nabla p + \rho g \nabla D) \right) = Q_m$$

La ecuación de Richards precisa de curvas de retención que relacionen las propiedades hidráulicas del medio con el contenido de agua.

Para este modelo se ha utilizado el conocido modelo empírico propuesto por Van Genuchten (Van Genuchten, 1980).

La relación entre la permeabilidad relativa  $k_r$  (-) y el grado de saturación  $S_e$  se ha calculado mediante una ley exponencial cubica  $k_r = S_e^3$  para  $H_p < 0$  (Åkesson et al., 2010, Villar et al. 2012, Pintado et al. 2001, Salltink et al. 2005). COMSOL resuelve el transporte de solutos disueltos en agua mediante la siguiente ecuación para cada especie transportada:

$$\phi \frac{\partial c_i}{\partial t} + c_i \frac{\partial \phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \mathbf{c}_i = \nabla \cdot [(D_{D,i} + D_e) \nabla c_i] + R_i + S_i$$

Una descripción más exhaustiva de las ecuaciones así como la descripción de las distintas variables puede encontrarse en (COMSOL, 2015a).

### CONDICIONES DE CONTORNO

#### -Flujo

En base a la piezometría de la Figura 46, el modelo conceptual propuesto para el dominio queda resumido en las siguientes entradas y salidas:

#### -Entradas:

1. Aguas arriba a través del acuífero cuaternario y del acuífero mioceno.
2. Recarga del acuífero por efecto de la precipitación, del riego con agua del acuífero y del riego con agua regenerada.

#### -Salidas:

1. Aguas abajo a través del acuífero libre de calizas miocenas.
2. Extracciones para bombeo.

La Figura 49 muestra un esquema con las condiciones de contorno aplicadas en el modelo. Se ha aplicado flujo nulo a la base del dominio y a los laterales

perpendiculares a la dirección del flujo. El nivel en el acuífero libre se ha modelizado usando condición de contorno de “nivel prescrito” (valores de 90 y 10 para aguas arriba y aguas abajo). La entrada de agua en el acuífero confinado se ha representado mediante “flujo prescrito” con un valor de  $0,07 \text{ m/d}\cdot\text{m}^2$  resultado de aplicar la ley de Darcy sobre la piezometría de la Figura 46. La recarga tanto por lluvia como por riego se ha introducido en el modelo mediante condición de contorno de Neuman.

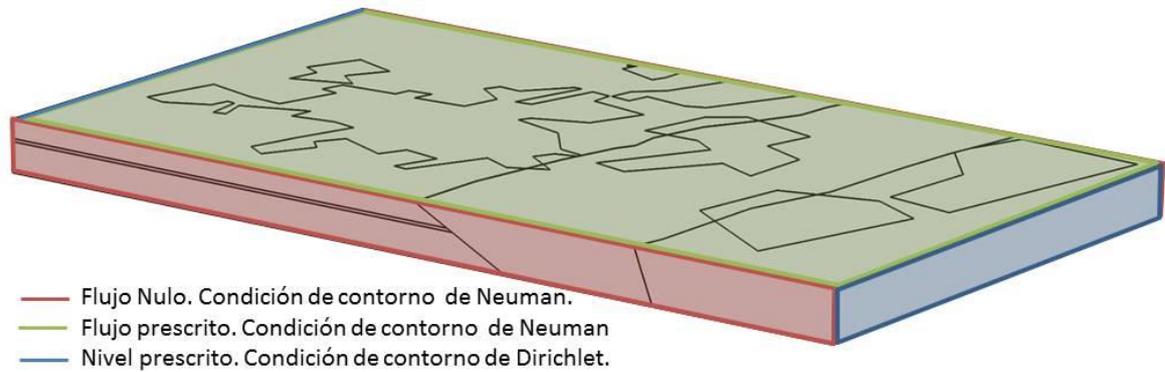


Figura 49. Esquema mostrando las condiciones de contorno empleadas para el cálculo del flujo de agua subterránea.

Como se ha explicado anteriormente, se distinguen tres tipos distintos de recarga que afectan a distintas extensiones. Mientras que la recarga por lluvia afecta a toda la superficie, la recarga por riego con aguas regeneradas o con agua del acuífero solo afecta a determinada parte de la superficie. Los datos de recarga por lluvia han sido obtenidos a través de la estación meteorológica de la agencia estatal de meteorológica (AEMET) y se dispone de datos de precipitación, temperaturas (máxima, mínima y media) y ETP para el periodo desde el 2012 hasta el 2014 con frecuencia diaria. Como puede observarse, la recarga por lluvia mensual es distinta para cada año estudiado, pero puede apreciarse que, en general, los meses de recarga coinciden con el otoño, invierno e inicio de la primavera, siendo durante el verano cuando la recarga es menor o incluso nula.

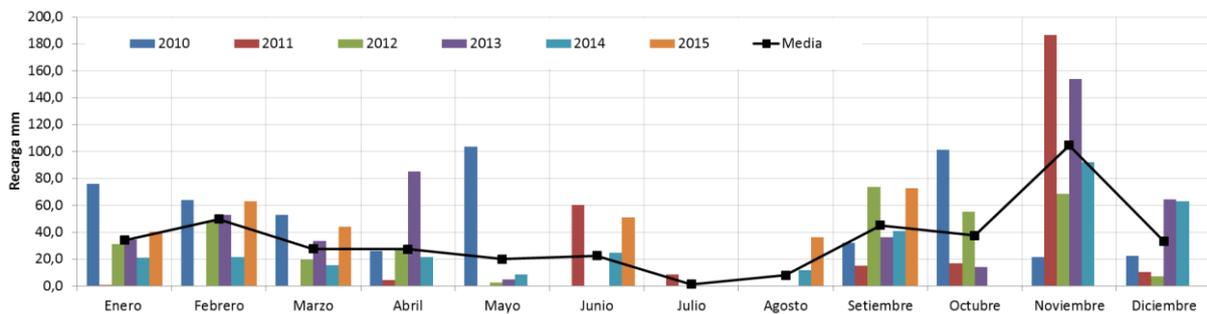


Figura 50. Gráfica mostrando la recarga de los acuíferos por meses para el periodo de tiempo 2010-2015.

-Recarga por riego

La cantidad de agua empleada en el riego de las parcelas ha sido calculada por medidas directas y consiste en datos de consumo de agua (m<sup>3</sup>/parcela) para el periodo 2012-2015 (Tabla 42), con periodicidad trimestral para los años 2013, 2014, 2015 y semestral para el año 2012. Con estos datos y la superficie del área regada (asumiendo un riego homogéneo tanto espacial como temporalmente), se han calculado los mm de agua que se riegan diariamente. La recarga se ha determinado en base al consumo de agua aplicando un porcentaje de eficiencia en el riego. Este excedente de agua se infiltra hasta el acuífero y constituye la fuente de recarga artificial. En este caso se ha supuesto un factor de eficiencia del 95%.

Tabla 42: Consumo total de agua de las parcelas regadas. Información propia. Unidades en m<sup>3</sup>.

| Año  | Marzo     | Junio     | Septiembre | Enero  |
|------|-----------|-----------|------------|--------|
| 2012 | 73.510    |           | 136.541,30 |        |
| 2013 | 10.840,00 | 35.701,00 | 53.340,00  | 9.,649 |
| 2014 | 2.,903,30 | 17.600,00 | 136.602,70 | 15.149 |
| 2015 | 1.553,00  | 78.593,00 | 42.295,00  |        |

#### -Hidroquímica

En la zona estudiada se distinguen 4 productos de interacción o *end-members* (ENDMs) químicos: 2 aguas de origen natural (ENDM 1 y 2) que se corresponden con las aguas del acuífero plio-cuaternario detrítico y del acuífero mioceno calcáreo respectivamente; y 2 tipos de aguas regeneradas (los ENDM 3 y 4) que corresponden con la composición del agua regenerada para los años 2012-2013 y 2014-en adelante.

Las condiciones de contorno empleadas para el transporte consisten en *open Boundary* (El agua sale con la concentración que calcula el modelo y entra con la concentración fijada por el usuario) para todos los contornos con condición de flujo diferente a flujo nulo. En los bordes en contacto con el acuífero aguas arriba la concentración es la correspondiente al agua tipo de esos materiales (ENDMS 1 y 2); para la zona regada con agua regenerada se utiliza el ENDM 3 para los dos primeros años de simulación (2012 y 2013) y el ENDM 4 para el resto de los años simulados.

La composición química de los distintos ENDM es expuesta en la Tabla 43. Las aguas que simulan la recarga han sido equilibradas previamente con el oxígeno atmosférico, utilizando el software PHREEQC (Parkurst y Appelo, 2013).

Tabla 43: Composición química de los ENDMS empleados en la simulación.

| ID/(mg/l)        | ENDM 1 AS Detrítico | ENDM 2 AS Calcáreo | ENDM 3 AR 1 | ENDM 4 AR 2 |
|------------------|---------------------|--------------------|-------------|-------------|
| C.E dS/m         | 1,22                | 0,83               | 1,418       | 1,432       |
| pH               | 7,13                | 7,42               | 7,33        | 7,2         |
| Cl               | 147                 | 112                | 218,2       | 272,4       |
| SO <sub>4</sub>  | 153                 | 28,2               | 176,68      | 740,1       |
| HCO <sub>3</sub> | 380                 | 328                | 244         | 244         |
| NO <sub>3</sub>  | 99,2                | 35,9               | 1,1         | <1,0        |
| Ca               | 197                 | 81,7               | 55,08       | 47,51       |
| Cu               | -                   | -                  | 0,01        | <0,01       |

|             |        |      |       |       |
|-------------|--------|------|-------|-------|
| <b>Fe</b>   | -      | -    | 0,01  | <0,01 |
| <b>K</b>    | 5,12   | 6,41 | 30,12 | 28,73 |
| <b>Li</b>   | < 0,10 | -    | 0,02  | 0,02  |
| <b>Mg</b>   | 21,2   | 25,1 | 30,53 | 27,32 |
| <b>Mn</b>   | -      | -    | 0,14  | 0,15  |
| <b>Na</b>   | 83,5   | 70,7 | 185,1 | 186,7 |
| <b>Zn</b>   | -      | -    | 0,02  | 0,01  |
| <b>DBO5</b> | -      | -    | 5     | 16    |
| <b>DQO</b>  | -      | -    | 23    | 65    |
| <b>DOC</b>  | 0      | 0    | 1,67  | 5,33  |

## 5.5 RESULTADOS

### 5.5.1 Los procesos contaminantes. Distribución y evolución previsible

Los vectores contaminantes principales detectados se pueden manifestar de cuatro formas: contaminación **puntual**, **difusa**, **regional** y de **origen natural**.

A continuación se presentan los procesos contaminantes detectados en el acuífero y las previsiones de su pauta evolutiva al interaccionar aguas regeneradas del regadío y aguas subterráneas.

#### Nitrógeno, fósforo, potasio

Según datos del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPAMA), el consumo de fertilizantes nitrogenados en el año 2000 ascendió a 1.279 miles de toneladas de elemento fertilizante.

En este contexto, la elevada concentración en ión nitrato en las aguas subterráneas, asociada al término “contaminación difusa”, se ha convertido en el mayor y más difundido problema de contaminación por actividades agrícolas en nuestro país. Su principal fuente de origen es el abonado animal o mineral, la presencia de granjas indebidamente aisladas y vertidos de aguas residuales, así como de explosivos en áreas de explotaciones mineras.

La aplicación de fertilizantes genera un volumen de nitrógeno residual que no es asimilado por las plantas, cuya lixiviación y transporte le conduce hasta la zona saturada del acuífero y, en menor concentración, a los puntos de drenaje del mismo.

El límite de potabilidad para los nitratos en las aguas está establecido en 50 mg/l (DOCE, 2000 –DMA–). A pesar de contar con aguas originarias que cumplan este estándar de calidad, resulta difícil prever la evolución de la contaminación difusa en el tiempo. La solución más factible pasa por minimizar la cantidad de fertilizantes a aplicar en zonas vulnerables. Por ejemplo, la tasa de aplicación en Francia ha sido reducida en diciembre de 2002 de 210 a 170 Kg/ha/año en zonas alejadas de captaciones para abastecimiento humano, proponiendo descender más todavía esta tasa en estos casos.

El abonado en la zona se lleva a cabo siguiendo códigos de Buenas Prácticas Agrarias, no obstante, en muchas ocasiones, la cantidad de abono sobrepasa con

creces las recomendaciones técnicas, al representar un sistema de eliminación de los excedentes de purines de las granjas agrarias. Generalmente se aplica “por manta”, a partir de acumulaciones superficiales de abono orgánico.

El desplazamiento del nitrato en las aguas subterráneas se produce por advección y disolución. Al ser una molécula relativamente gruesa, su migración está condicionada en gran medida por la granulometría del acuífero, y por su poder de autodepuración, que, en este caso, es relativamente alto. La presencia de bacterias interviene activamente en la reducción de nitratos a nitritos y a nitrógeno gas.

La implantación del principio “el que contamina paga” o su análogo “el que contamina más, paga mucho más” (LBAE, 2000; MIMAM, 2001) ha llevado al Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPAMA) a implantar un punto de la *Red de Control de Nitratos en las aguas subterráneas*, dentro del programa de determinación de “zonas vulnerables” desde 2001.

En las restantes zonas con elevada actividad agrícola (casi todo el área de estudio, exceptuando las extensiones forestales), se produce el reciclaje de las aguas de riego debido a la elevada permeabilidad de los estratos más superficiales.

El hecho del reciclaje de las aguas del acuífero a través de las captaciones profundas ha sido mencionado en la literatura hidrogeológica desde hace casi dos décadas (IGME, 2000). Este efecto de reciclaje ha sido constatado al menos en cuatro sondeos que intercomunican verticalmente el acuífero superficial con el infrayacente.

De todo esto se deduce que el nivel de contaminación alcanzado en la zona en su estado preoperacional es alto y su origen es, principalmente, antrópico y consuntivo.

Se ha llevado a cabo un análisis hidroestadístico con los resultados de los análisis químicos hasta la campaña de octubre de 2015 (anexo 1). Como resultados cabe citar:

### **Sodio-cloruro**

En cuanto a la especiación del Na, las formas en que aparece este ión en el sistema son variables y generalmente iónicas, excepto en forma de halita.

Las formas más abundantes son  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NaSO}_4^-$ ,  $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{NaCO}_3^-$  y  $\text{NaOH}$ , predominando la forma de sodio libre, sulfato y bicarbonato frente a las restantes.

En cuanto a la distribución de la concentración de **cloruros**, presentan bastante analogía con la conductividad, manifestando una relación directa y estrecha entre ambos parámetros. Igualmente el ión sodio presenta, en general, una alta correlación con ambos.

Para el sector de Camí, con un desarrollo de suelos importante y un regolito de transición con un sustrato calcáreo de potencia superior a 100 m, la concentración de cloruros en el agua subterránea ha registrado un aumento cercano al 12% en tres

años (2012-14), mientras que el sodio registró una tendencia decreciente y cercana al 8%. La conductividad aumentó en 0,02 dS/m.

En la zona de Inca, con un desarrollo de suelo menos potente y un sustrato igualmente calcáreo que forma un acuífero compartimentado, la evolución de ambos iones muestra una tendencia más satisfactoria a lo largo del circuito de interacción y para un período de tres años. Ambos iones aumentan a lo largo del circuito de interacción, con incrementos de hasta el 12% en estadios intermedios, para finalmente disminuir a término de la serie hasta en un 50%, debido al lavado y dilución a lo largo de la zona regable. El acuífero profundo presenta un comportamiento equivalente, con aumento de ambos iones exclusivamente en la captación más cercana al punto de toma de aguas regeneradas (“Inca arriba”).

En *Maria de la Salud*, zona con un espesor de suelo muy inferior y un sustrato dolomítico homogéneo, las tendencias evolutivas son diferentes, con disminución de la concentración a lo largo del tiempo entre el 20 y el 40%. En el circuito de interacción los valores máximos se registran en el pozo intermedio. La concentración en el último pozo es ligeramente inferior a la registrada “aguas arriba”, en torno al 2%.

### **Calcio-magnesio**

La especiación del Ca en los mismos sectores diferenciados presenta ligandos y fases minerales similares en todos ellos, que son  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{CaHCO}_3^+$ ,  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{CaOH}^+$ , si bien las proporciones son variables.

Los procesos de mezcla con aguas de recarga más frías que las del acuífero tienden a generar precipitados de carbonato cálcico. Este proceso es ligeramente superior en los sectores con el nivel freático más profundo.

Las fases cálcicas presentes en el agua son la anhidrita, aragonito, calcita, dolomita:  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ , y anhidrita/yeso:  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . En general, se presentan en sobresaturación las fases carbonatadas más que las sulfatadas, en los tres sectores estudiados.

La especiación del Mg presenta diferentes iones y fases entre los distintos sectores.

Los iones en disolución son  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{MgHCO}_3^+$ ,  $\text{MgCO}_3$  y  $\text{MgOH}^+$ , con mayor abundancia en el sector meridional que en el septentrional.

La evolución de la concentración de calcio y magnesio es ligeramente creciente en todos los casos, tendencia más atribuible a la componente caliza del subsuelo por disolución directa que al contenido inicial en las aguas regeneradas.

### **Cinc, manganeso, cobre, hierro**

La presencia de elementos traza en las aguas naturales es sustancialmente menor que en aguas regeneradas. Concentraciones excesivas de algunos elementos como el litio, boro, cobre, hierro y cinc, pueden presentar problemas de toxicidad.

- Zn (cinc). Tóxico para muchas plantas a muy variados niveles de concentración; su toxicidad es reducida con  $\text{pH} > 6$  y en suelos de textura fina y en los orgánicos. Límite 2,00. La concentración de zinc aumenta ligeramente a lo largo de los circuitos de interacción superficiales, con una reducción importante en los profundos.

- Mn (Manganeso). Su determinación incluye sus estados de oxidación +2 y +3. Su estado de valencia +4 sólo aparece en el óxido insoluble. Tiene un comportamiento similar al hierro aunque tiene un potencial redox mayor. Facilita el desarrollo de ciertas bacterias ferro-mangánicas asociadas a los procesos de incrustación. En todos los circuitos de interacción de la zona de estudio ha presentado una tendencia alcista en los tres años de análisis completos. El efecto acumulativo de este ión requiere estudios más prolongados en el tiempo para evaluar el impacto de su efecto acumulativo.

- Cu (Cobre). Entre 0,1 a 1,0 mg/l es tóxico para ciertas plantas en soluciones nutritivas. Límite 0,20. Se observa un cierto incremento en el sector central del circuito de interacción superficial, y una tendencia descendente en el profundo.

- Fe (Hierro). Puede aparecer en dos estados de oxidación. El  $\text{Fe}^{3+}$  es muy insoluble y precipita como óxidos o hidróxidos. El  $\text{Fe}^{2+}$  es muy oxidable. Tiene gran afinidad por los compuestos orgánicos, por lo que se incorpora al suelo con facilidad. Da dureza al agua, y genera procesos incrustantes.

Este metal se presenta formando complejos con distintos ligandos, en función de la concentración del ligando libre y de la afinidad del ligando por el catión.

En condiciones reductoras, el Fe es soluble y móvil como Fe (II) por debajo de pH en torno a 7-8 y, por lo general, en forma libre  $\text{Fe}^{2+}$ . El Fe funciona, por lo común, con los estados de oxidación II y III originando compuestos ferrosos y férricos y, en condiciones excepcionales, como Fe (IV) –muy poco estable– y como Fe (VI) (ferratos) (Buil, 2002).

Los complejos del Fe con grupos  $\text{OH}^-$  están dominados por el Fe (III), cuyas constantes de estabilidad en la formación de complejos con grupos hidroxilos son más elevadas que para el resto de los ligandos presentes en solución. El Fe (II) forma complejos carbonatados e hidroxilos; con constantes de solubilidad similares.

El siguiente diagrama de estabilidad del hierro muestra las condiciones de estabilidad de las distintas fases en función del pH y Eh del medio (Figura 51).

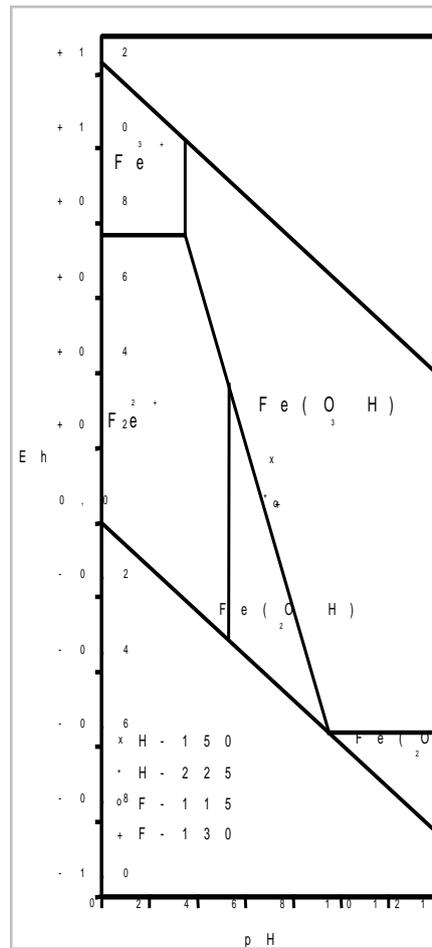


Figura 51. Diagramas de estabilidad de los distintos ligandos ferrosos y fases en función del pH y Eh del medio (tomado de Custodio y Llamas, 1983).

En definitiva, en función del pH, el porcentaje de especies de Fe (II) mantiene una relación directa con el carácter reductor de las aguas, mientras que el porcentaje en especies de Fe (III) muestra un comportamiento inverso, mayor en aguas oxidantes y alcalinas.

En los tres circuitos de interacción estudiados, solo ha presentado una tendencia creciente en Inca superficial, mientras que en los otros se mantiene relativamente constante.

## Boro

- Boro, B. Ión fitotóxico por excelencia. No se encuentra libre en la naturaleza. Las fuentes de boro más importantes son los boratos, en especial el bórax,  $Na_2B_4O_7$ . En las aguas naturales se encuentra esencialmente en forma de ácido bórico no disociado. Las aguas superficiales raramente lo contienen, aunque las aguas subterráneas y regeneradas de zonas industrializadas y urbanas presentan concentraciones mayores.

Es un elemento esencial para el crecimiento normal de las plantas en cantidades pequeñas, pero en concentraciones superiores a 1 ó 2 mg/l en el agua de riego resultan perjudiciales para por ejemplo el riego de cítricos, melocotonero, ciruelo, vid,

cebolla y fresa (Pescod et al., 1985). La toxicidad es detectada por el análisis de agua y suelo, así como por síntomas en el vegetal, como son las hojas secas o con manchas amarillas y secas en los ápices. No todos los cultivos sensibles acumulan boro en sus hojas.

El boro es más difícil de eliminar por lavado que el cloro o el sodio, se desplaza con lentitud y requiere una lixiviación hasta tres veces superior. En todos los circuitos de interacción superficiales ha disminuido tanto durante su avance en el espacio como a lo largo del tiempo, excepto en Inca profundo, donde su concentración ha aumentado en torno a un 8% en tres años.

### **Contaminación por vectores orgánicos**

La legislación española (RD 140/2003) establece como análisis microbiológico mínimo el control de coliformes totales y fecales.

#### **ESTREPTOCOCOS FECALES**

Responden a la denominación de estreptococos fecales, sf, según la Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. (American Work Association Water Pollution Control Federation 1981).

Se encuentran normalmente en el intestino de los mamíferos y nos sirven como indicadores complementarios de polución fecal. El periodo de incubación de estreptococos fecales es de 48 h, a una temperatura de 35° C.

El análisis de conjunto de coliformes fecales y estreptococcus fecales permite determinar la relación cf/sf, que nos informa sobre el origen predominantemente animal o humano de la contaminación.

Los microorganismos aerobios han manifestado una tendencia alcista en los circuitos de interacción superficiales, tan solo descendente en el caso de *Maria de la Salut*.

### **5.5.2 Resultado de la modelación**

#### **Flujo de agua con saturación variable**

En lo referente a flujo se han realizado dos simulaciones. Por un lado, mediante un modelo estacionario se ha reproducido la piezometría de detalle expuesta en el capítulo anterior). Por otro lado, se ha reproducido la variación en los niveles piezométricos para una simulación transitoria.

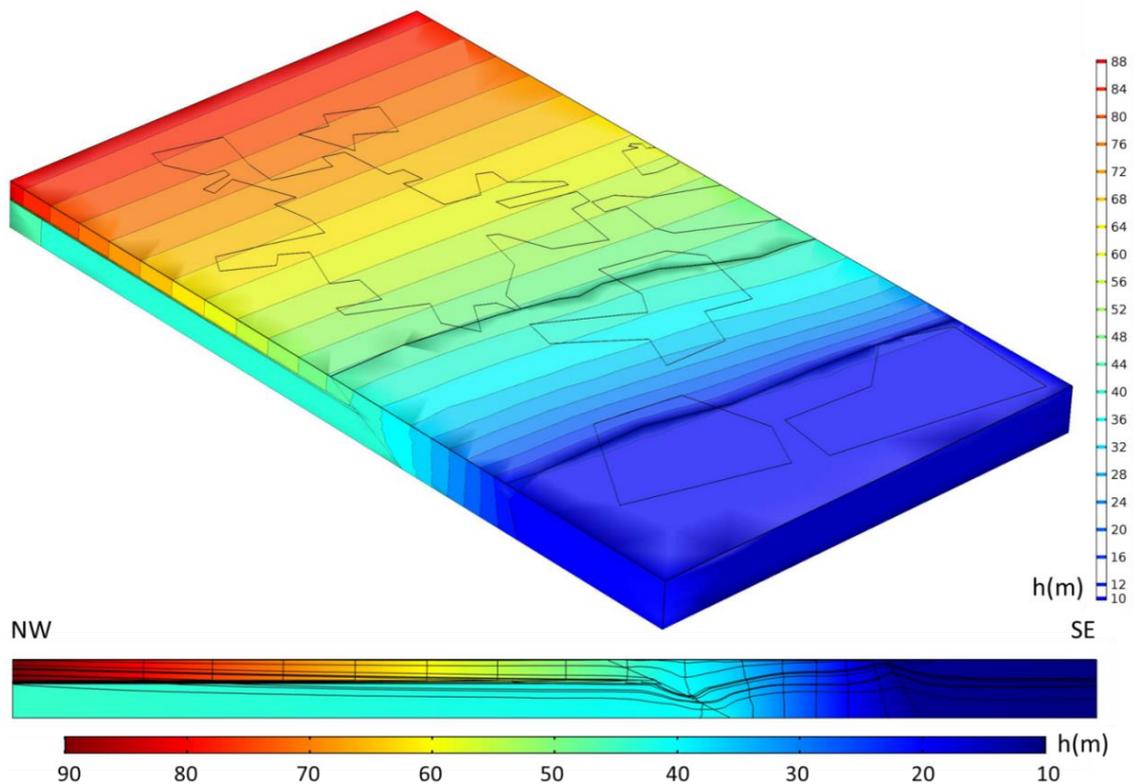


Figura 52. Isopiezas en 3D (arriba) y perfil 2D (abajo) con los resultados de la simulación de flujo estacionario. Acuífero superficial con niveles en un rango entre 100 metros y 60 m y acuífero profundo con niveles en el intervalo 55-10 metros.

La Figura muestra el ajuste entre los niveles calculado por el modelo y los niveles medidos. En dicha figura puede observarse como de los cinco puntos, cuatro presentan un buen ajuste, mientras que el punto MA0216 presenta unas diferencias elevadas entre el valor real y el simulado. En base a la piezometría expuesta en la sección anterior y los datos de los que se dispone, parece que este punto muestra niveles superiores a los del acuífero en el que se encuentra. Esto puede ser debido a heterogeneidades en los materiales o a la presencia de un acuífero superficial no comprendido en el modelo. El punto MA0688 situado en las cercanías del punto MA0216 presenta un nivel mucho más bajo que si ajusta con el modelo.

Por otro lado, se ha realizado una simulación transitoria que tiene en cuenta la simulación estacionaria como valores iniciales. El objetivo principal de esta simulación es reproducir tendencias de evolución de los niveles. La Figura muestra el resultado de la simulación transitoria. El punto MA0180 y MA0688 presentan un buen ajuste entre los niveles calculados con el modelo y los niveles medidos. Con respecto a los puntos MA0182 y MA0181 los niveles no ajustan con tanta precisión como los otros dos puntos anteriores, sin embargo, la variación máxima de niveles en el tiempo es similar a la medida.

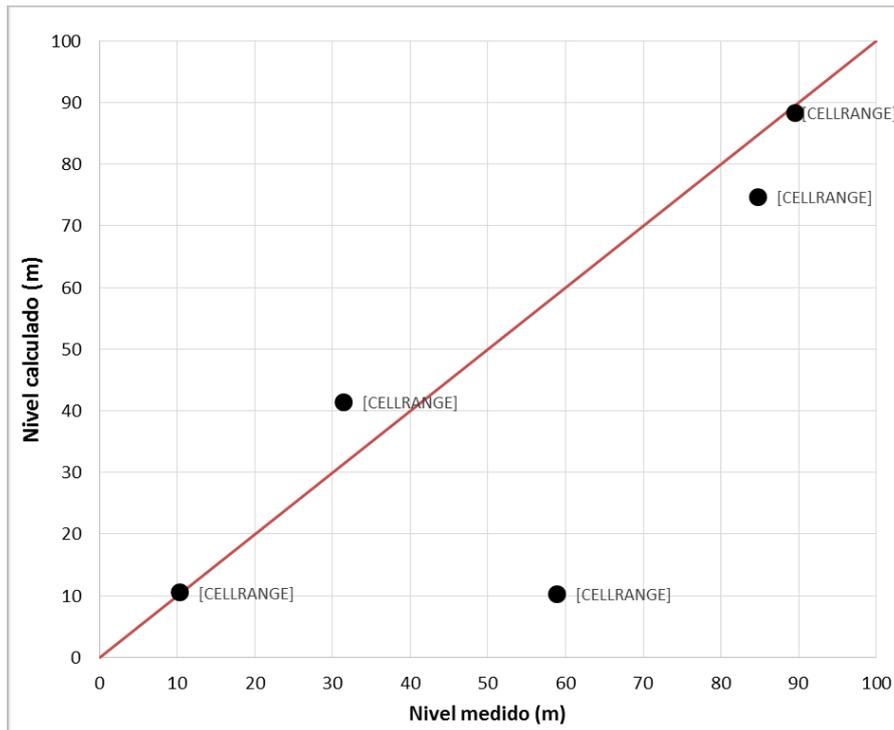


Figura 53. Comparación entre los valores medidos y los valores simulados en el modelo para los resultados del modelo estacionarios. Datos de octubre de 2010.

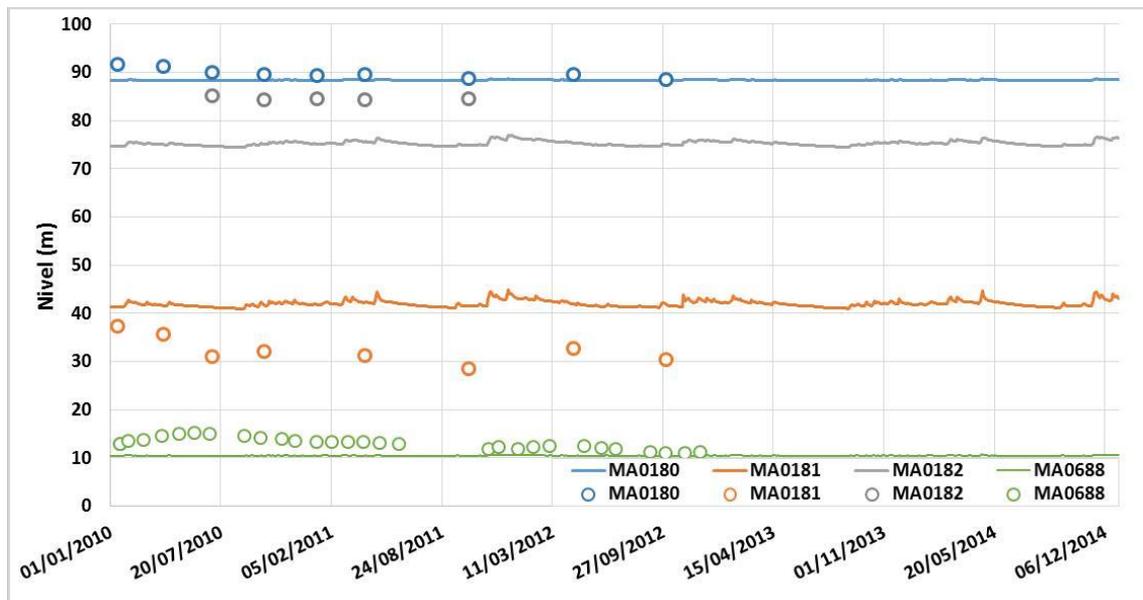


Figura 54. Evolución del nivel freático en 3 puntos del dominio modelado. En continuo el resultado del modelo, en puntos los datos medidos.

### Transporte reactivo

Los resultados de la simulación para un periodo de 5 años permiten entender el comportamiento y la evolución de la calidad de las aguas en el acuífero mediante los procesos que se han modelizado.

Con respecto a la mezcla entre diversas aguas, esta puede observarse a través de la evolución del cloruro en el acuífero. La concentración de cloruros en el agua regenerada es mayor que en las aguas del acuífero por lo que puede utilizarse para evaluar la zona de afección del riego. La Figura 55 muestra la evolución del cloruro en el área modelada para un periodo de cinco años. Pueden distinguirse dos áreas principales, la zona noroeste con los tres materiales diferenciados y la zona sureste con los materiales calcáreos jurásicos y miocenos. En la primera zona, la mezcla de las aguas del acuífero con agua regenerada (ENDM 3 para los dos primeros años y ENDM 4 para el resto) es elevada en el acuífero superficial, pero mucho menor en el acuífero mioceno debido al efecto del acuitardo. La presencia del acuitardo genera también un retardo en la llegada del cloruro (del riego) al acuífero profundo. Sin embargo, en la zona sureste, formada solo por materiales calcáreos, la evolución de la pluma de agua de riego es más homogénea en profundidad. Al igual que en la zona norte el flujo es principalmente subhorizontal, tal y como se aprecia en la evolución de la pluma.

En la Figura 55 puede observarse también que el cambio de aguas regeneradas de riego produce un aumento en la concentración de cloruro en las áreas cercanas a las zonas de riego, si bien la extensión de la zona de influencia del retorno de riego sigue siendo muy similar. En la figura también puede observarse la distribución espacial de la pluma de cloruro generada por el riego con agua regenerada. Las zonas con mayor concentración de cloruro se encuentran debajo de las zonas regadas. En la zona noroeste, esta área, presenta poca extensión lateral y vertical quedando restringida al acuífero superficial. En cambio, en la zona sureste la extensión de la pluma es mucho mayor y se alcanza el borde del acuífero sin diluirse.

También se pone de manifiesto que el riego con agua regenerada supone un ascenso en la concentración de Cl.

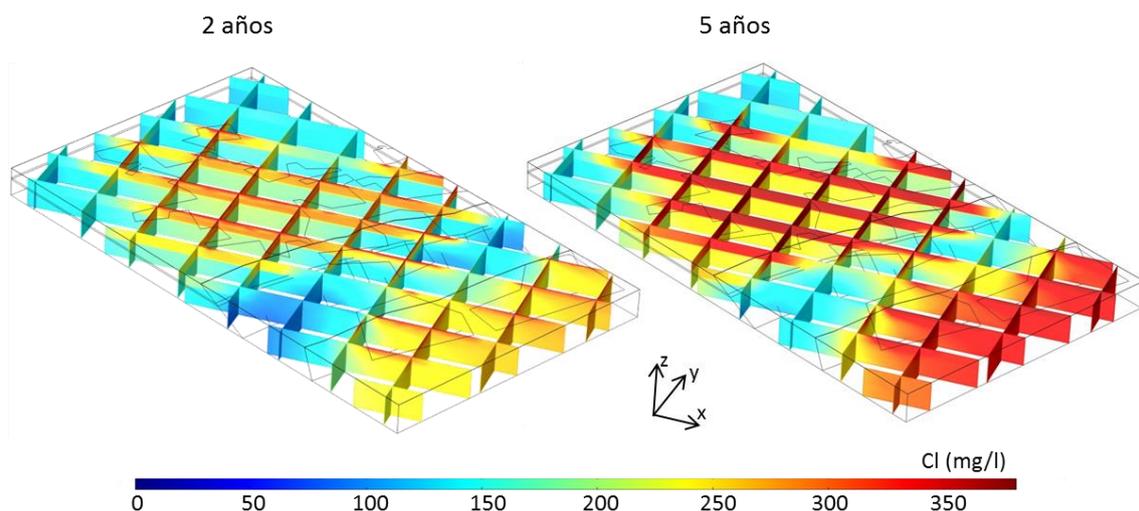


Figura 55. Distribución espacial del cloruro. El norte viene marcado por la dirección Y del eje localizado en el centro de la imagen.

En el caso del carbono orgánico disuelto (DOC) (Figura 56) se observa como la zona afectada por el riego con agua regenerada es menor que la zona afectada por cloruros

debido al efecto de la degradación de la materia orgánica. El cambio en el tipo de agua regenerada para el riego supone un aumento en la concentración de materia orgánica introducida en el modelo (Figura 56) y un aumento de la extensión de la pluma.

La Figura 56 muestra el nivel de todo el acuífero, como la pluma de materia orgánica está restringida a los acuíferos libres y no llega al acuífero confinado por efecto del acuitardo. El flujo de agua a través del acuitardo es muy reducido, lo que provoca que el agua tenga el tiempo suficiente para oxidar la materia orgánica disuelta. En cambio, en las zonas donde la velocidad del agua es más elevada, la extensión de la pluma de materia orgánica es mayor.

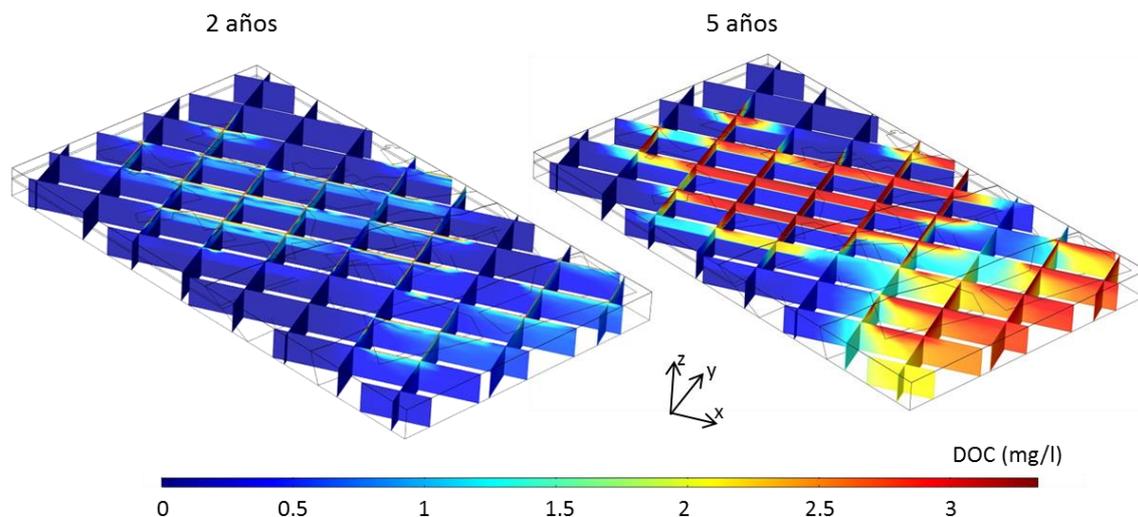


Figura 56. Distribución espacial de la materia orgánica. El norte viene marcado por la dirección Y del eje localizado en el centro de la imagen.

El oxígeno disuelto (TDO) es consumido por la materia orgánica y no evoluciona dentro del acuífero, quedando restringido a las áreas cercanas a las zonas regadas. En la Figura 57 se observa como el cambio de agua de riego produce un descenso en la extensión de la pluma de oxígeno debido al aumento de la materia orgánica disuelta en el agua de riego.

En el caso del nitrato, la concentración de nitrato en las aguas regeneradas es de cero, lo que puede explicarse por un proceso de desnitrificación debido a degradación de materia orgánica en la balsa de almacenamiento (en la bibliografía se dispone de información acerca de observaciones de estratificación de las aguas con anoxia en la zona más profunda). La entrada de agua con una concentración de nitrato de 0 mg/l y la desnitrificación ligada a la degradación de materia orgánica hacen descender la concentración en el acuífero a valores de alrededor de 5 mg/l en la zona sureste del dominio y en el agua del acuífero plio-cuaternario. Este proceso pone de manifiesto un potencial impacto positivo del riego con agua regenerada en el acuífero debido a la reducción de la concentración de nitratos en el acuífero (el valor base del acuífero libre plio-cuaternario es de 99 mg/l aproximadamente). Esta reducción es debida a procesos de dilución y a procesos de desnitrificación producidos por la oxidación de la materia orgánica disuelta. En la Figura 58 se observa como el cambio de agua

regenerada, que supone un aumento en la extensión de la pluma de materia orgánica y aumenta el área desnitrificada (color azul) por la oxidación de ésta.

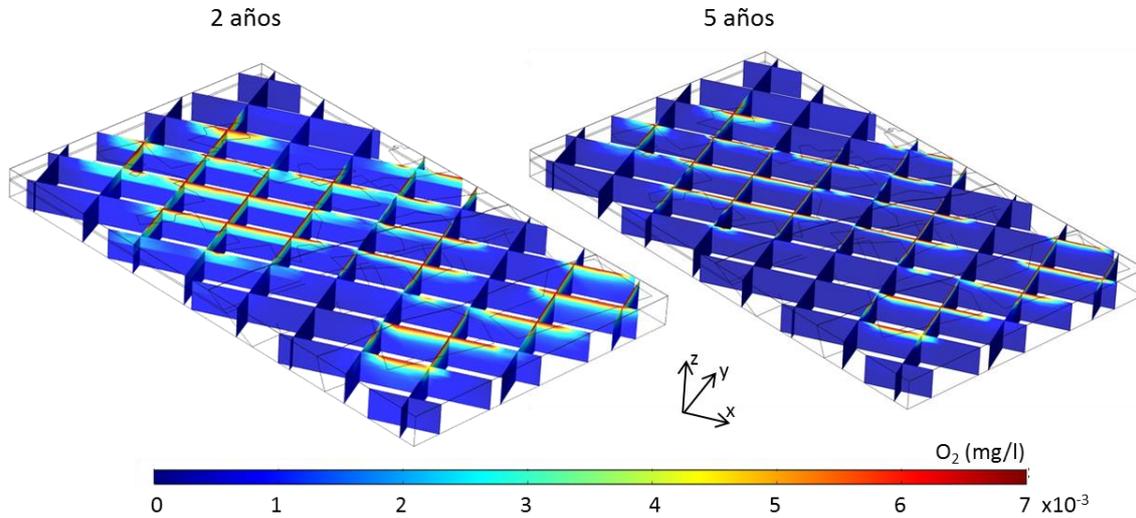


Figura 57. Distribución espacial del oxígeno disuelto. El norte viene marcado por la dirección y del eje localizado en el centro de la imagen.

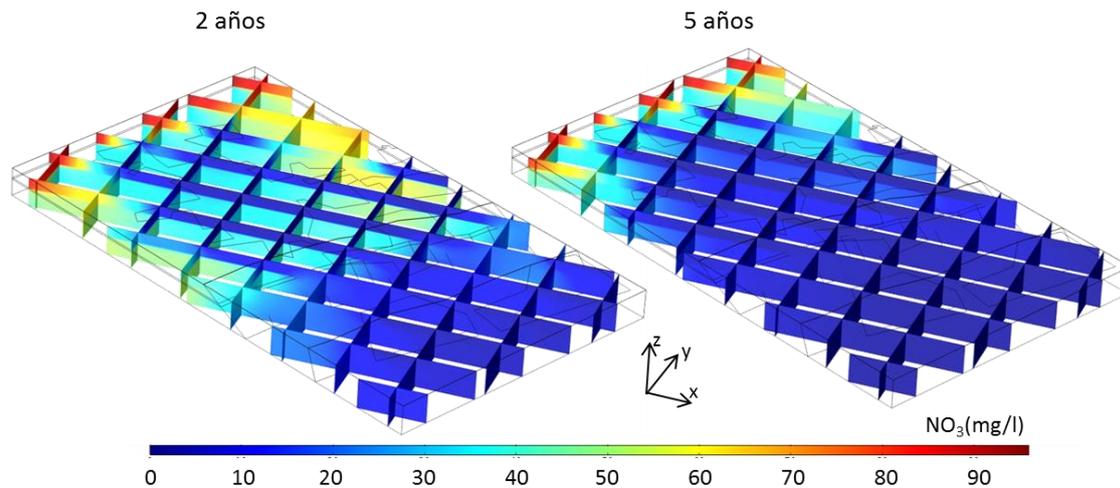
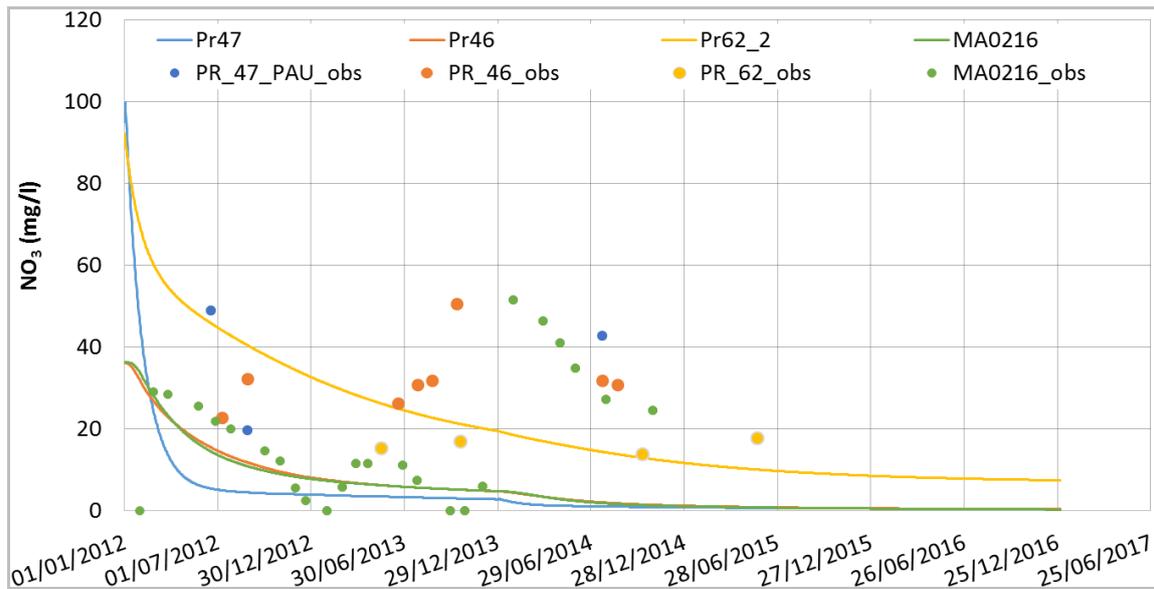


Figura 58. Distribución espacial del nitrato. El norte viene marcado por la dirección y del eje localizado en el centro de la imagen.

La Figura 59 muestra la comparación entre la concentración de nitrato medida y la calculada por el modelo. Se observa que el punto PR 62 localizado en el acuífero profundo mioceno presenta unos niveles de nitrato similares a los simulados. El punto MA0216 presenta unos valores similares para los dos primeros años, pero a partir del segundo año presenta un súbito ascenso que no reproduce el modelo. El punto PR46, situado en la zona sureste del modelo, presenta valores mayores que los simulados, este punto está localizado cercano al punto MA0216 y al igual que en el caso del cloruro parece no verse afectado por los efectos del agua regenerada. Este hecho podría explicarse por la existencia de un acuífero superficial ligado a los materiales cuaternarios expuestos en la Figura 45, que conduzcan el agua subterránea de retorno de riego hacia el norte, siguiendo el sentido del flujo regional.



sitrato en distintos puntos del modelo para 5 años de simulación. En continuo el resultado del modelo, en puntos los datos medidos.

La Figura 61 muestra la evolución temporal de la concentración de sulfato en el área de muestreo. Durante los dos primeros años la concentración de sulfato en el agua regenerada es ligeramente superior a la del acuífero libre, y la pluma generada por el riego no alcanza una elevada extensión. Sin embargo, a partir del segundo año el agua de riego presenta una concentración de sulfatos elevada (alrededor de 750 mg/l). Los resultados de las analíticas, expuestos en el anexo 1, muestran que la mayoría de los puntos de los que se tiene información (PR 47, PR 62, PR 46) ajustan para los dos primeros años. A partir del segundo año, las concentraciones de sulfato calculadas por el modelo resultan mayores que los datos observados. La elevada concentración de sulfato en el agua de riego puede generar la generación de caliches yesíferos (costras de yeso) en las parcelas regadas, lo que disminuiría la concentración de sulfato en las aguas subterráneas. Este proceso no está comprendido en el modelo conceptual implementado en el modelo.

Por otro lado, el punto MA0216, al igual que ocurría con el resto de elementos analizados, no presenta un buen ajuste, por su desconexión hidráulica con la zona modelada.

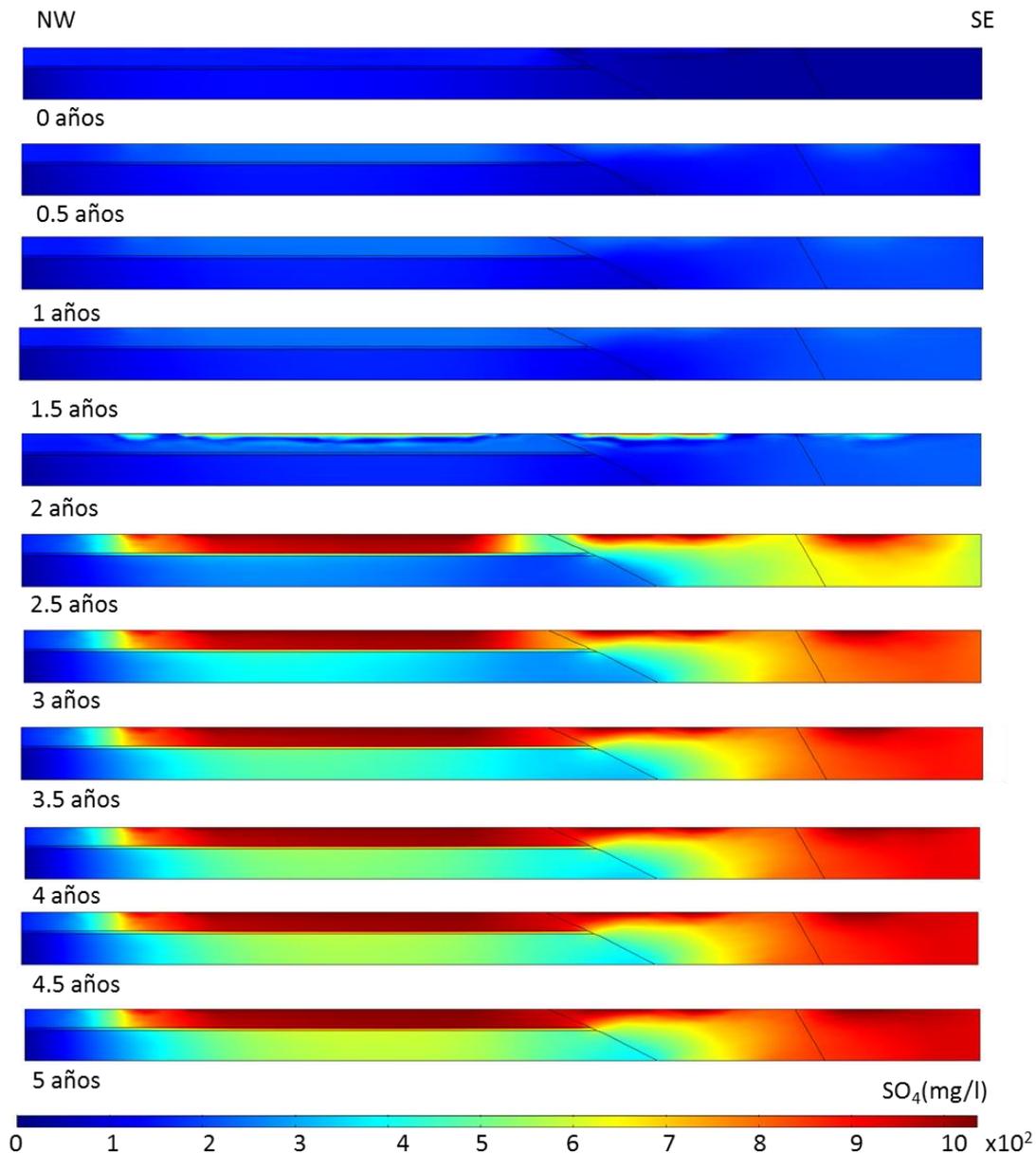


Figura 60. Evolución del sulfato en un corte transversal NW-SE para un tiempo de simulación de 5 años.

Por último, en el caso del hierro, la Figura 62 muestra que la dilución de este en el acuífero es muy efectiva y la pluma generada por el agua de riego tiene una extensión muy pequeña. Además, puede observarse el efecto de la adsorción de hierro en los materiales. En este caso debido a la adsorción de hierro se observa que el cambio de agua de riego genera un cambio progresivo en la concentración de hierro disuelta entre los tiempos 2, 2,5 y 3 años producida por la adsorción de este en los distintos materiales.

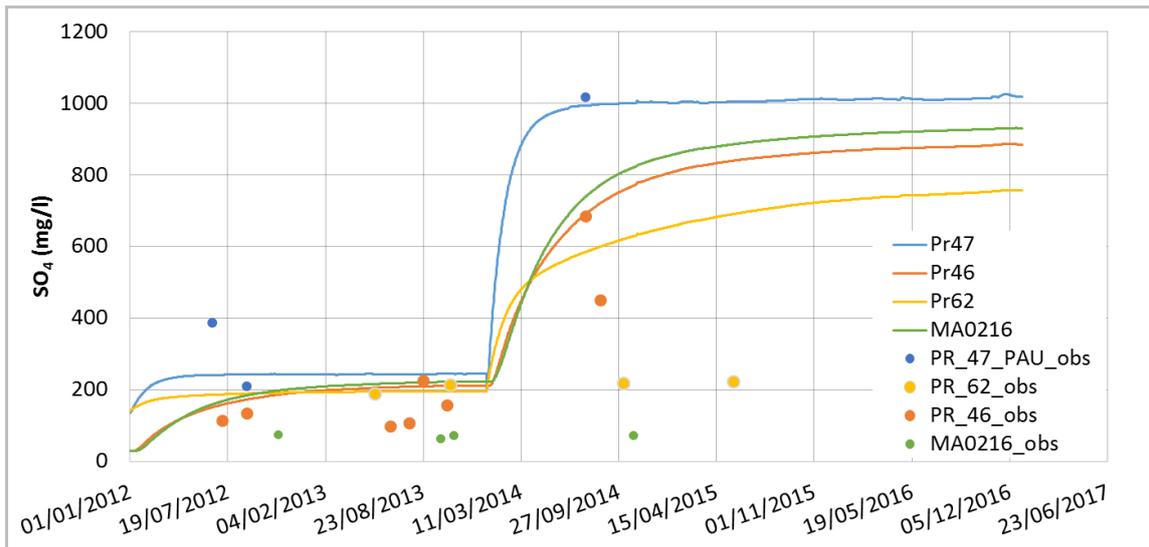


Figura 61. Evolución de la concentración de sulfato en distintos puntos del modelo para 5 años de simulación. En continuo el resultado del modelo, en puntos los datos medidos.

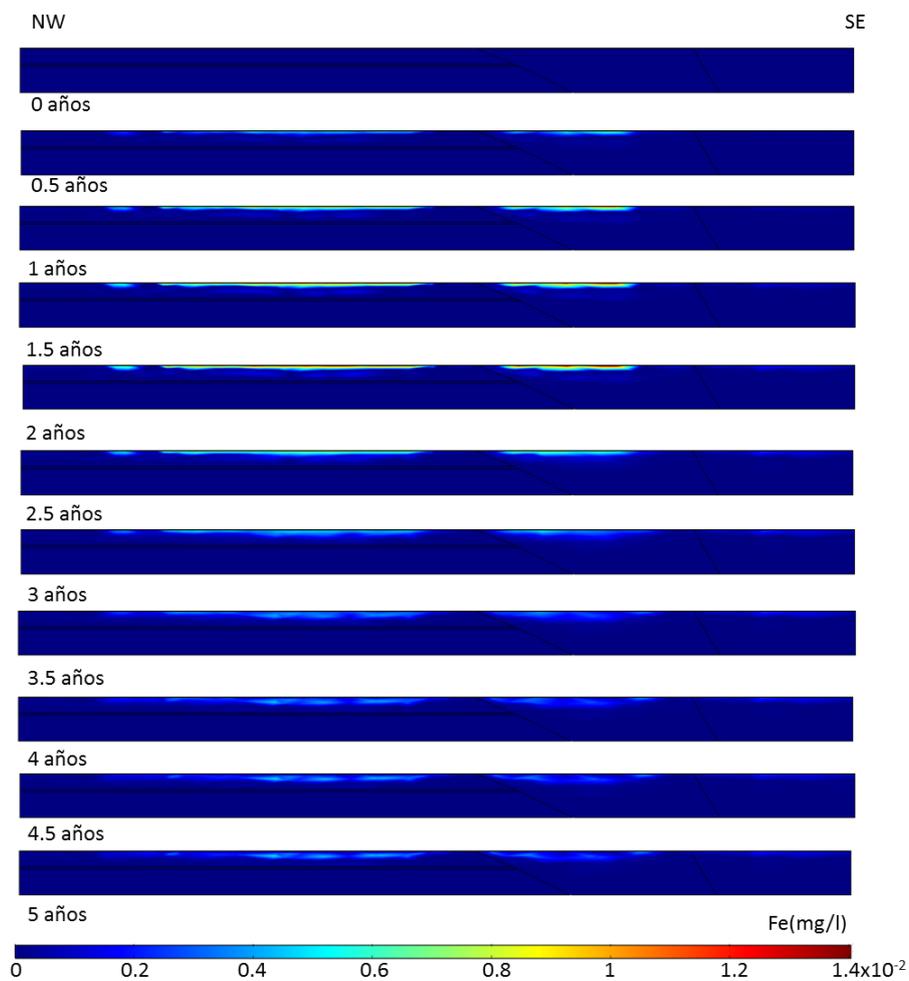


Figura 62. Evolución del hierro en un corte transversal NW-SE para un tiempo de simulación de 5 años.

## 5.6 RECOMENDACIONES PRÁCTICAS

Las recomendaciones prácticas alcanzadas, relacionados con la hidrogeología y el regadío, pretenden dar respuesta a cuestiones tales como:

- ¿En qué proporción la evolución normal de las aguas subterráneas está alterada por procesos antrópicos?
- ¿Cuál debe ser el diseño del pozo ideal para que las aguas infiltradas alcancen al acuífero, suficientemente filtradas y depuradas por el propio terreno?

### 5.6.1 Diseño de pozos junto a balsas de regulación como elemento de seguridad y recarga gestionada “de oportunidad”

Se da el caso de que, muchas veces, las balsas de abastecimiento de agua (para consumo urbano o para regadío) están construidas, o se van a construir, en lugares donde la evacuación de aguas almacenadas resulta muy difícil o simplemente imposible, bien por falta de drenajes superficiales o bien por la presencia de infraestructuras que lo impidan. Hasta el momento el problema se viene resolviendo mediante el sistema de construir los aliviaderos de las balsas para evitar daños materiales.

Para construir un sondeo o pozo como elemento adicional a este tipo de balsas que permitan evacuar excedentes en situaciones de inundación y recargar con ellos los acuíferos, resulta preceptivo realizar un estudio hidrogeológico, con objeto de conocer la viabilidad de la actuación, diseñar el elemento auxiliar y evaluar los parámetros hidrogeológicos necesarios para el cálculo de los caudales de recarga. Es preciso, por tanto, evaluar las posibilidades de recarga y conocer la calidad de las aguas indígenas, con objeto de estudiar posibles procesos de interacción.

Conforme a experiencias realizadas por el Grupo Tragsa en la UHG 08-22, Las Serranías (entorno mediterráneo), el medio receptor ha sido el acuífero regional, cuyo nivel estático en la zona de construcción de la balsa y del sondeo, se encuentra en torno a 300 m de profundidad.

El sondeo de evacuación y recarga debe tener el emboquille emplazado a una cota similar o inferior a la base de la balsa, siendo éste un importante criterio de emplazamiento.

El diseño constructivo de estas captaciones debe ser “a la carta” para cada situación específica. Las Figuras 63 y 64 presentan una visión general y el esquema específico real para el sondeo Arnachos 1, en Chulilla, Valencia.

La columna litológica y la orden de entubado de la captación se lleva a cabo mediante procedimientos hidrogeológicos convencionales, con especial atención a las profundidades donde se produce pérdida de lodos o de agua durante la perforación. La entubación es un factor limitante en los sondeos de recarga al aumentar las pérdidas de carga, por tanto el diseño más habitual es el entubado mediante tuberías

de ranura continua. Las características de la perforación requieren una buena cimentación del emboquille del sondeo.

Una vez terminado el sondeo, deben llevarse a cabo ensayos de infiltración con el que poder estimar los parámetros de permeabilidad, transmisividad, etc. del acuífero y de la formación que atraviesa el sondeo receptora de los excedentes de la balsa.

El ensayo de infiltración más habitual es el denominado “Ensayo de Lefranc”, en su modalidad de carga variable. Los fundamentos del método se basan en la introducción de un caudal conocido en el sondeo y la observación del comportamiento del nivel freático en el tiempo. Con estos datos, se calcula el ascenso del nivel piezométrico para un caudal determinado, con objeto de determinar el caudal de inyección óptimo (en el caso del ejemplo alcanzó los 1.000 l/s).

Más tarde se lleva a cabo la conexión del aliviadero de la balsa con el sondeo de infiltración mediante una tubería de chapa de acero de gran diámetro.

Como criterios para su operatividad, la carga hidráulica introducida en el sondeo provoca una mayor infiltración en el acuífero, por lo que aumentaría el valor de la permeabilidad. Este valor no se puede cuantificar ya que el método solo permite realizar los cálculos cuando el régimen en el sondeo es laminar, y con una alta carga hidráulica (como al principio del ensayo) el régimen producido es turbulento.

Otros factores importantes son mecanismos para reducir la entrada de aire y la colmatación. Dado que el agua procede de la balsa donde se ha llevado a cabo una decantación importante, la toma no debe estar en la zona con mayor concentración de partículas ni de aire. Así mismo su conducción deberá llevarse a cabo mediante tubería, evitando su caída libre, con objeto de evitar daños al revestimiento y sobrepresiones por “golpe de ariete”.

Los piezómetros de observación tienen un diseño convencional, siendo preferible su entubación con tubería de PVC o material resistente al posible ataque químico.



Figuras 63. Detalle del cabezal de inyección del sondeo Arnachos 1, en Chulilla, Valencia. Fotos por cortesía de J.M. Montes.

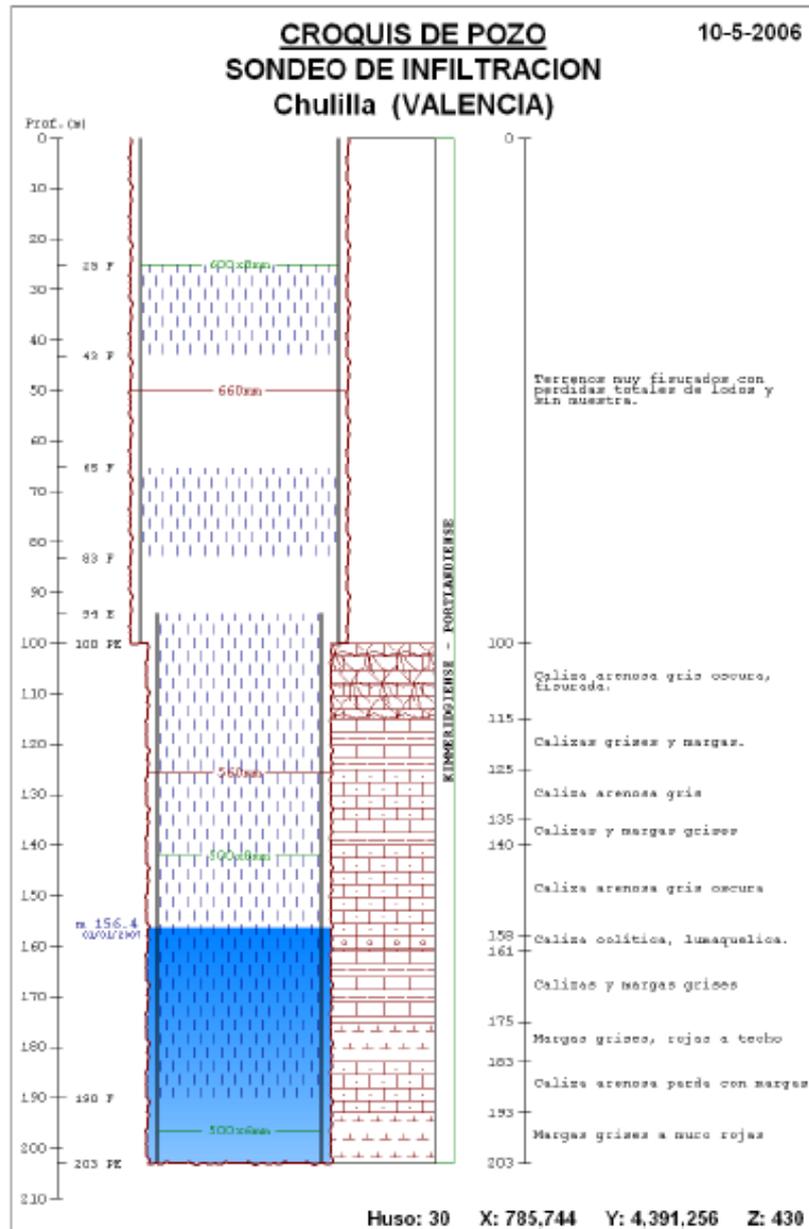


Figura 64. Columna litológica y diseño de la captación Arnachos 1, Chulilla, Valencia.

## 5.6.2 Posibilidades de recarga gestionada de excedentes con distintos dispositivos

### Pozos de infiltración-percolación

Los sistemas de recarga artificial mediante pozos, sondeos, etc., suelen emplearse en terrenos donde el uso de sistemas superficiales es inadecuado, ya sea por disponer de poco espacio o por tratarse de acuíferos poco transmisivos o que presenten alternancia de niveles permeables e impermeables. Algunas de las técnicas de recarga artificial en profundidad incluidas en este grupo genérico son los drenes y galerías, pozos, minisondeos y sondeos de inyección, ASR/ASTR (Acuifer Storage & Recovery / AS Transfer R) y la inyección a través de simas y dolinas.

## Pozos abiertos de infiltración

Este tipo de dispositivo de recarga artificial es utilizado cuando existen capas superficiales de baja permeabilidad sobre acuíferos más idóneos para la técnica MAR. También, dado su carácter puntual, cuando la disponibilidad de terreno en superficie es baja y no es posible construir dispositivos de dispersión.

El dispositivo consiste en uno o varios pozos de “gran diámetro” y de poca profundidad, aproximadamente de 5 a 15 m (Bouwer et al., 1997). Tanto las paredes laterales como el fondo del pozo deben ser lo más estrechas posibles para favorecer al máximo la infiltración. Es aconsejable rellenar el pozo con gravillas y arenas gruesas para favorecer la infiltración y reducir los costes de mantenimiento en caso de obstrucción. El agua de recarga artificial se inyecta o se vierte desde la superficie, siendo lo más apropiado, que la parte superior del pozo este cubierta y protegida de la luz solar, animales y personas.

La reutilización de estructuras ya existentes, como son pozos abandonados o minas ya en desuso para recargar el acuífero, abarata significativamente los costes de la obra.



Figura 65. Esquema de un dispositivo de pozos abiertos de infiltración y pozos profundos.

Este tipo de dispositivo, aunque es más efectivo en algunos casos que las técnicas de dispersión, puede sufrir problemas de contaminación en función de la calidad del agua de recarga artificial, ya que no tiene lugar el filtrado natural de los sólidos en suspensión, bacterias, etc. que sí ocurre en las técnicas de dispersión superficial, salvo que se intercalen dispositivos específicos, como filtros o decantadores, lo que resulta una opción más que recomendable.

En general los fosos y trincheras presentan altos costes de construcción en relación a los volúmenes de agua que consiguen recargar, por lo que su uso se suele limitar a los casos idóneos o a estructuras ya disponibles en forma de canteras abandonadas, pozos de grava, etc.

La reutilización de aguas regeneradas requiere un monitoreo frecuente y estudiar las posibilidades que esta fuente de agua pueda originar en las aguas locales.

En general estos pozos de infiltración, no deben emplearse en lugares donde los pozos de abastecimiento se encuentren a menos de 10 m de profundidad o donde el subsuelo esté compuesto por formaciones calcáreas o rocas fracturadas.

### Pozos profundos y minisondeos

Este tipo de instalaciones suelen emplearse en terrenos donde el uso de sistemas superficiales es inadecuado, ya sea por disponer de poco espacio o por tratarse de acuíferos poco transmisivos o con alternancia de niveles permeables e impermeables.

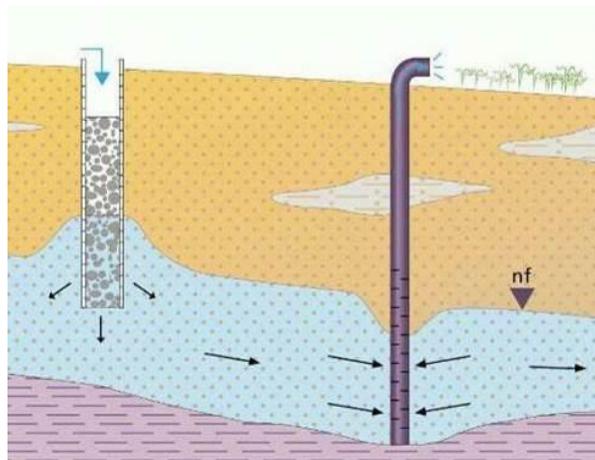


Figura 66. Esquema de un dispositivo de pozos profundos.

La principal diferencia con los “pozos abiertos de infiltración” es la profundidad de los mismos (Figura 66), que depende de la permeabilidad y sobre todo del espesor de los estratos de baja permeabilidad que recubren la “formación objetivo” que se pretende recargar.

El resto de las características en cuanto a revestimiento, relleno, mantenimiento, calidad de las aguas de recarga, costes, etc., son muy similares a los anteriores, salvo las diferencias debidas a que los diseños constructivos suelen tener un diámetro inferior, con lo que difieren los materiales, sistemas de construcción, etc.

En cuanto a los minisondeos, frecuentes en acuíferos detríticos de grano fino libres o semiconfinados y superficiales, solo cabe decir que suelen recibir ese nombre los sondeos menores de 30 m. Presentan unas características muy similares a las de los sondeos, por lo que se trata de un tipo de dispositivo que “cabalga” entre ambas tipologías.

A la recarga inducida intencional del acuífero cabe añadir el efecto de la recarga accidental por excedentes de riego, bien sea tradicional o más tecnificado (subs superficial o subterráneo).

Un ejemplo de reutilización de aguas de riego en España son los azarbes. Las redes de azarbes permiten recoger las aguas sobrantes del riego y conducir las a otros puntos de utilización situados aguas abajo.

Se trata de redes de gran importancia, pues al drenar el terreno evitan su encharcamiento y la consiguiente salinización. Su construcción, explotación y mantenimiento están sujetos a los mismos criterios y condicionantes que las redes de distribución, aunque requieren limpiezas más frecuentes por la proliferación de plantas hidrófilas.



Figura 67. Esquema de un sistema de recarga artificial a través de un sistema de riego tradicional.

El riego subterráneo, a diferencia del riego subsuperficial, consiste en la aplicación de agua en zonas más profundas que éste último. La aplicación del método pretende conseguir, bien la creación de franjas húmedas a la profundidad deseada, bien acuíferos colgados o bien la creación de niveles freáticos artificiales (Figura 68).



Figura 68. Esquema de un sistema de recarga artificial a través de un sistema de riego subsuperficial o subterráneo.

Como precaución, debería instalarse un sistema de drenaje para evitar subidas accidentales del nivel freático (como por ejemplo en un período de lluvias anormalmente largo) para evitar la posible asfixia radicular en un determinado cultivo (Martínez, 2008).

### **5.6.3 Propuesta de elementos complementarios relacionados con la hidrología**

#### **Los humedales artificiales como elemento asociado a zonas regadas con aguas regeneradas**

Los humedales artificiales son amplias superficies de agua poco profundas y con vegetación propia de pantanos o humedales naturales. Proporciona gran poder de filtración y eliminación de nutrientes gracias a la acción de las plantas.

Se debe asegurar el flujo de agua anual, y las especies vegetales deben ser autóctonas. La dimensión debe ser al menos 3 veces el volumen a tratar, asegurando 2 semanas de retención.

La profundidad oscila entre 0,6 m y 3,0 m. Se deben colocar pozos de decantación para evitar dragados completos. Nunca se debe aportar escorrentía urbana a humedales naturales.

El humedal artificial puede ser de flujo libre o de flujo subsuperficial. Una alternativa a estudiar es su integración en elementos constructivos. Por ejemplo, un caso real es una rotonda de 30 m de diámetro, en zona periurbana, donde confluyen varios viales y se plantea un humedal artificial para almacenamiento, infiltración y depuración de las aguas de escorrentía superficial de los viales y del entorno.

#### **5.6.4 Autodepuración del terreno. Algunas opciones de actuación**

La forma de eliminar el nitrógeno en acuíferos arenosos se basa en un sistema de inyección/reposo de residuos que favorecen las reacciones de nitrificación/desnitrificación. Mediante este proceso, el nitrógeno es eliminado casi por completo, quedando restos en forma de nitratos. Su distribución tiende a aumentar con la profundidad hasta los 15-20 metros, a partir de la cual se incrementan las reacciones de desaireación. Los procesos de dilución por las aguas de recarga han manifestado importantes disminuciones en la concentración, mientras que en zonas alejadas de su influencia se ha apreciado un incremento.

El fósforo se elimina favoreciendo la precipitación de fosfato cálcico.

La eventual carencia en hierro y magnesio que presentan algunas aguas de regadío para las necesidades de las plantas desaparece con el regadío con aguas regeneradas.

Resulta absolutamente recomendable la instalación de filtros o sistemas parecidos para el tratamiento de los efluentes a nivel de Comunidades de Regantes usuarios de aguas regeneradas. Algunas propuestas son:

- Pequeñas balsas de oxidación para la neutralización de los posibles gérmenes remanentes. Este método tiene la desventaja de que en zonas de alta evaporación la velocidad de producción de efluentes sobrepasa a la capacidad de este método para eliminarlos.

- Tratamiento suelo-acuífero (SAT): el método consiste en la percolación del efluente a través de una capa de suelo suficientemente gruesa, que actúa como un medio mineral granular, con los suficientes poros como para alojar una abundante microflora. Su utilización óptima es en zonas permeables. A este método se le suma la capacidad desinfectante del suelo.
- Desinfección por altas concentraciones de bacterias fijadoras fijadas a un medio granular con gran superficie de contacto, tamaño de poro y aireación permanente para favorecer el metabolismo de las bacterias.

Se crea así un ambiente en donde se puede desarrollar una biomasa de alta concentración que producirá una retención físico-química de sólidos en suspensión y microorganismos.

La purificación por medios biológicos (filtro verde o membranas biológicas) es una simple utilización del suelo que acelera el efecto producido durante la lenta infiltración del efluente en el terreno.

## 5.7 CONCLUSIONES

Conforme a los resultados del proyecto, cabe destacar los siguientes aspectos:

El fuerte filtrado y retención de partículas e iones más gruesos en el suelo edáfico reduce a niveles casi imperceptibles la llegada de vectores procedentes del regadío con aguas regeneradas a la zona saturada subyacente, habida cuenta del escaso caudal aplicado y del efecto del suelo.

El efecto sobre suelos y acuíferos presenta procesos colmatantes de distinta naturaleza, si bien ambos llevan a cabo un importante papel de filtrado y depuración, sin apenas indicios que pongan en riesgo su “capacidad de acogida”. Estas conclusiones son consecuencia de las observaciones y recopilación de datos de un período de cinco años. No obstante, el efecto sobre estos vectores deberá ser estudiado en un período de tiempo superior mediante técnicas de modelización.

Gracias a los resultados obtenidos tras un lustro de desarrollo de este proyecto, el Grupo Tragsa empieza a apostar por el uso de aguas regeneradas, creando además sinergias favorables en las Comunidades de Regantes, potenciando las inversiones por parte de la Administraciones en regadíos que utilicen este tipo de aguas, y ampliando los esquemas topológicos de gestión hídrica convencionales.

Los resultados obtenidos permiten además recomendaciones de diseños constructivos específicos para pozos y sondeos perforados en zonas regadas con aguas regeneradas y elementos adicionales de gestión hídrica que propician el incremento del almacenamiento del agua en los acuíferos.

Se han identificado posibles impactos del riego en relación con:

- **El medio geológico (parámetros hidráulicos):** El riego con agua regenerada con elevada concentración de sulfatos puede propiciar la precipitación de algunos minerales produciendo el descenso de la porosidad y la permeabilidad del

acuífero. Los minerales sulfatados pueden generar un aumento de la salinidad del suelo y del acuífero e incluso llegar a precipitar costras en las parcelas regables. Es recomendable llevar a cabo un control riguroso de este riesgo.

- **La recarga:** Los resultados del modelo apuntan una evolución rápida de la composición del acuífero, alcanzando rápidamente un estado pseudoestacionario.
- **La calidad del agua de riego:** Las aguas regeneradas introducen concentraciones de materia orgánica y de metales pesados en el acuífero. El modelo predice la atenuación de estas concentraciones por procesos de dilución y por procesos de degradación en el caso de la materia orgánica; y por dilución y adsorción en el caso de los metales pesados. La infiltración de materia orgánica también favorece al proceso de desnitrificación. Este proceso, junto a la mezcla con aguas con baja concentración de nitratos, produce una mejora cualitativa de las aguas subterráneas para riego.

Se ha detectado como un posible riesgo para el suelo y las aguas subterráneas la elevada concentración de sulfato en las aguas regeneradas a partir del 2014. Esta elevada concentración puede generar la formación de costras evaporíticas en el suelo afectando a su fertilidad. Tal suposición se ve refrendada porque, aunque la concentración de sulfato en las aguas de los hidrantes es elevada, el aumento de la concentración de sulfato en el acuífero no es tan alto como el que aporta el modelo.

Con respecto a la modelización, desde un punto de vista hidrogeoquímico se han diferenciado cuatro polos de interacción en la zona de Inca, dos pertenecientes a las aguas tipo para cada uno de los materiales acuíferos (terrágenos y calcáreos) y las otras dos correspondientes a la composición del agua de riego. Del estudio de los datos hidroquímicos se han podido identificar dos procesos que controlan la composición química de las aguas del acuífero: disolución y precipitación de minerales e intercambio iónico de Ca/Na para los iones mayoritarios. Dos procesos adicionales a tener en cuenta son la degradación de la materia orgánica y su consecuente anoxia, desnitrificación, etc. a través del ciclo Redox; y la adsorción de metales pesados de las aguas regeneradas.

El desarrollo de un modelo en tres dimensiones que contenga los principales rasgos geológicos permite entender el flujo de agua subterránea, así como observar la evolución de las aguas regeneradas en el acuífero. Estos resultados han puesto de manifiesto una leve salinización del acuífero por la recarga con agua regenerada. Dichos resultados pueden observarse también en las analíticas disponibles, sin embargo. Centrándonos en la evolución del ion cloruro, la concentración aumenta de 125 mg/l a 300 mg/l aproximadamente en las áreas cercanas a las zonas regadas. La salinización se produce principalmente en las zonas más superficiales del acuífero, en especial en los acuíferos libres calcáreos (SE de la zona) y en el acuífero libre Plio-Cuaternario (noroeste). El acuífero confinado mioceno situado al noroeste de la zona de estudio presenta un aumento leve de la concentración de cloruros. Estos incrementos están dentro del rango común de concentraciones, y se puede afirmar que la salinización del acuífero no es elevada.

En el caso de la materia orgánica introducida mediante el riego con agua regenerada, la afección sobre el acuífero queda restringida a los acuíferos libres debido a su rápida

degradación. La materia orgánica contribuye a la desnitrificación del acuífero, ya sea por procesos de o dilución. La degradación de materia orgánica también afecta a la concentración de oxígeno disuelto en el acuífero, que queda restringido a las zonas más superficiales. En el caso de los metales pesados, las bajas concentraciones del agua de riego se diluyen en las aguas subterráneas con rapidez.

La recarga de agua regenerada genera un descenso en la concentración de nitratos en el agua subterránea llegando a alcanzar los cero mg/l en algunos sectores. Este descenso produce una mejora en la calidad de las aguas.

Aunque los resultados son “esperanzadores”, deberán ser evaluados en etapas posteriores, tras alcanzar resultados concluyentes en el largo plazo.

## 5.8 BIBLIOGRAFÍA

- Åkesson M, Börgesson L, Kristensson O, 2010. Sr-Site Data report. THM modelling of buffer, backfill and other system components. SKB-TR-10-44. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- American Work Association Water Pollution Control Federation. 1981. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater.
- Appelo y Postma. 2013. Issues in Geology and Mineralogy, 2013. Scholarly editions, Atlanta, USA.
- Ayers, R.S., Westcot, D.W., 1985. Water Quality for Agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper 29. Rome, 174 pp.
- Bitton, K. 1998. Formula Handbook for Environmental Engineers and Scientists.
- Bouwer, H. y Maddock, T, III 1997. “Making sense of the interaction between groundwater and streamflow” Rivers 6(1):19–31.
- BOE. Real Decreto 1620/2007. Boletín Oficial del Estado, 8 de diciembre de 2007.
- Buil, B. 2002. Estudio geoquímico de los procesos de interacción agua-roca sobre sistemas geotermales de aguas alcalinas en los granitoides del complejo plutónico de la Maladeta (Huesca-Lérida). Tesis. Universidad de Zaragoza, 2002.
- Cabrera, M. D., 2007. Distribución del fitoplancton en la Laguna de la Cruz y su relación con los nutrientes. Tesis doctoral. Valencia: Universitat de Valencia.
- COMSOL, 2015a. COMSOL Multiphysics Ref. Guide. Version 5.2. COMSOL Inc.
- COMSOL, 2015b. Introduction to Application Builder. Version 5.2. Burlington, MA.
- Crane & Moore, 1984. Bacterial pollution of groundwater: A review.
- Custodio, E y Llamas, M.R. 1983. Hidrología Subterránea. Ed Omega. Barcelona.
- Del Olmo Zamora, P., López, M.A., Ramirez del Pozo, J. y Aguilar, M.J.1991. Mapa geológico, hoja MAGNA N°671. IGME.
- Dunne, T. and Leopold, L.B. 1978. Water in Environmental Planning. W.H. Freeman and Company. New York.
- EARSAC, 2013. Memoria anual del Proyecto de I+D+i EARSAC. Documento no publicado disponible para consulta en la biblioteca de Tragsa-Madrid.
- EARSAC, 2015. Estudio hidrogeológico del impacto a las aguas subterráneas del regadío mediante aguas residuales depuradas en INCA.
- Isidoro, D., Grattan, S.R., 2011. Predicting soil salinity in response to different irrigation practices, soil types and rainfall scenarios. Irrigation Science, 29:197–211.
- IGME. 2000. Identificación de acciones y programación de actividades de recarga artificial de acuíferos en las cuencas intercomunitarias. MCT.
- ITGE. 1990. Estudio metodológico de los procesos de contaminación bacteriológica de las aguas subterráneas. Acuíferos del Norte de España.

- ITGE. 1998. Conceptos básicos de microbiología de las aguas subterráneas.
- Letey, J., Hoffman, G.J., Hopmans, J.W., Grattan, S.R., Suarez, D., Corwin, D.L., Oster, J.D., Wu, L., Anaheim, C. 2011. Evaluation of soil salinity leaching requirement guidelines. *Agricultural Water Management*, 98: 502–506.
- López-García, JM y Mateos Ruiz, RM. 2003. La intrusión marina en los acuíferos de la isla de Mallorca. *Tecnología de la intrusión marina en acuíferos costeros*.
- MIMAM. 2000. Libro Blanco del Agua en España 2000 (LBAE). MIMAM. Madrid.
- MIMAM. 2001. Caracterización de las fuentes agrarias de contaminación de las aguas por nitratos. Dirección General de obras hidráulicas y calidad de las aguas.
- Parkhurst D. y Appelo, C.A. 1999. User's guide to PHREEQC V-2. A computer program for speciation, batch-reaction, one dimensional transport, and inverse geochemical calculations. *Water resources Investigations*, 99-4259. Denver, 1999.
- Pescod, M.B. y Arar, A. 1985. Treatment and Use of Sewage Effluent for Irrigation. *Proceedings of the FAO Regional Seminar on the treatment and use of sewage effluent for irrigation*. Cyprus, Oct. 1985.
- Pintado X, Ledesma A & Lloret A. 2001. Backanalysis of thermo-hydraulic bentonite properties from laboratory tests. *Engineering Geology* 64 2002 91–115.
- Plan Hidrológico de *les Illes Balears*, 2009, revisado en 2016.
- Sallink M W, Ayora C. & Olivella S. 2005. User's guide for RetrasoCodeBright RCB. Department of Geotechnical Engineering and Geo-Sciences, UPC, Spain.
- Talling, J.F., 2003. Phytoplankton – zooplankton seasonal timing ant the “clear-water phase” in some English lakes. *Freshwater Biology*. 48: 39 – 52. 2003.
- Van Genuchten, M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892–898.
- Villar M V, Martín P L, Bárcena I, García-Siñeriz J L, Gómez-Espina R & Lloret A, 2012. Long-term experimental evidences of saturation of compacted bentonite under repository conditions. *Engineering Geology* 149–150 2012 57–69.
- Yim, S.P., Sullivan, T. Milian, L., Decker, R. & Mann, B. 2014. Sorption K-d Measurements in Support of Dose Assessments for Zion Nuclear Station Decommissioning-14228. WM2014 Conference 2014, Phoenix, Arizona, USA.

## 6 IMPACTO AMBIENTAL



**EFFECTOS AMBIENTALES, RELACIONES AMBIENTALES, EFECTOS DIRECTOS E INDIRECTOS Y SU EVALUACIÓN...**

## **APARTADO 6. ESTUDIOS DE IMPACTO AMBIENTAL DE REGADÍOS CON AGUAS REGENERADAS**

Este apartado ha sido agregado a la publicación con objeto de facilitar los materiales necesarios para acometer un estudio de impacto ambiental en potenciales regadíos con aguas regeneradas. En la literatura se analizan los aspectos a tener en cuenta en cumplimiento de la legislación medioambiental. Al final del apartado se adjuntan matrices y listados de chequeo y otras herramientas habituales de ingeniería ambiental aplicable en actuaciones como las reseñadas.

### **6.1 EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL. CRITERIOS A TENER EN CUENTA**

La metodología para la determinación de impactos y su evaluación es paralela a la contemplada en la legislación vigente (ya adelantada en el apartado introductorio), y debe ser desglosada en los siguientes apartados:

- LEGISLACIÓN AMBIENTAL.
- ACCIONES DEL PROYECTO.
- IDENTIFICACIÓN DE IMPACTOS.
- VALORACIÓN DE IMPACTOS.
- MEDIDAS CORRECTORAS.
- PROGRAMA DE VIGILANCIA.

### **6.2 LEGISLACIÓN AMBIENTAL**

Los autores perciben el proceso de EIA en España como un proceso competencial que, en las últimas disposiciones legales, camina hacia su unificación.

Con objeto de enmarcar el procedimiento aplicable, se presenta la legislación vigente desglosada por su alcance (Nacional, Balear y sectorial, con mención expresa de las disposiciones derogadas, cuya influencia en el procedimiento es directa.

#### **Legislación de evaluación ambiental estatal**

- Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental.
- Real Decreto 1015/2013, de 20 de diciembre, por el que se modifican los anexos I, II y V de la Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad.
- Real Decreto 1131/1988, de 30 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento para la ejecución del Real Decreto Legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de Evaluación de Impacto Ambiental. (DEROGADO EL 12/DIC/2013).

- Ley 9/2006, de 28 de abril, sobre evaluación de los efectos de determinados planes y programas en el Medio Ambiente. (DEROGADO EL 12/DIC/2013).
- Ley 27/2006, de 18 de julio, por la que se regulan los derechos de acceso a la información, de participación pública y de acceso a la justicia en materia de medio ambiente.
- Real Decreto Legislativo 1/2008, de 11 de enero, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos. (DEROGADO EL 12/DIC/2013).
- Ley 6/2010, de 24 de marzo, de modificación del texto refundido de la Ley de Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos, aprobado por el Real Decreto Legislativo 1/2008, de 11 de enero. (DEROGADO EL 12/DIC/2013)

### **Legislación sectorial estatal aplicable**

- Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad.
- Ley 40/2010, de 29 de diciembre, de almacenamiento geológico de dióxido de carbono.
- Real Decreto 1274/2011, de 16 de septiembre, por el que se aprueba el Plan estratégico del patrimonio natural y de la biodiversidad 2011-2017, en aplicación de la Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad.
- Ley 40/2010, de 29 de diciembre, de almacenamiento geológico de dióxido de carbono.
- Real Decreto 11/1995 de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas.
- Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo, de desarrollo del Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas.
- Real Decreto 1290/2012, de 7 de septiembre, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, y el Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo, de desarrollo del Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas.
- Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera.
- Decreto 833/1975, de 6 de febrero, por el que se desarrolla la Ley 38/1972, de 22 de diciembre. (Este Decreto tiene derogados los anexos II y III por los anexos I y IV de la Ley 34/2007).
- Orden de 18 de Octubre de 1976, de prevención y corrección de la contaminación atmosférica de origen industrial.
- Real Decreto 100/2011, de 28 de enero, por el que se actualiza el catálogo de actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera y se establecen las disposiciones básicas para su aplicación. (Corrección de errores del Real Decreto 100/2011, BOE. nº83 de 7 de abril de 2011).
- Real Decreto 9/2005, de 14 de enero, por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados.

- Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.
- Real Decreto 1620/2007 de 7 de diciembre por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de aguas depuradas.
- Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas.

### **Legislación de Evaluación Ambiental Balear**

- Decreto 4/1986, de Implantación y Regulación de los Estudios de Evaluación de Impacto Ambiental.
- Decreto 85/2004, de 1 de octubre, por el que se modifica el Decreto 4/1986, de 23 de enero de implantación y regulación de los estudios de evaluación de impacto ambiental.
- Ley 11/2006, de 14 de septiembre, de Evaluaciones de Impacto Ambiental y Evaluaciones Ambientales Estratégicas en les Illes Balears.
- Ley 6/2009, de 17 de noviembre, de medidas ambientales para impulsar las inversiones y la actividad económica en les Illes Balears.
- Ley 12/2016, de 17 de agosto, de evaluación ambiental de les Illes Balears.

### **Legislación sectorial Balear aplicable**

- Ley 8/2012, de 19 de julio del turismo de les Illes Balears.
- Decreto Ley 1/2013, de 7 de junio, de medidas urgentes de carácter turístico y de impulso de las zonas turísticas maduras.
- ORDEN de 13 de julio de 1993 por la que se aprueba la Instrucción para el proyecto de conducciones de vertidos desde tierra al mar.
- Ley 1/1991, de 31 de enero, de espacios naturales y régimen urbanístico de las áreas de especial protección.
- Ley 5/2005, de 26 mayo, para la Conservación de los espacios de Relevancia Ambiental de les Illes Balears (LECO).
- Ley 1/2007 del 16 de marzo de contaminación acústica de les Illes Balears.
- Ley 3/2005, de 20 de abril, de protección del medio nocturno de les Illes Balears.
- Ley 6/99 de 3 de abril de les Directrices de Ordenación Territorial de les Illes Balears y medidas tributarias.
- Plan Territorial de Mallorca
- Plan Hidrológico de les Illes Balears. Aprobado por R.D. 378/2001.
- Decreto 49/2003 de 9 de mayo, por el cual se declaran las zonas sensibles en les Illes Balears.
- Decreto 23/2008 de 10 de octubre por el que se establecen las competencias y la estructura orgánica de las consejerías de la administración de la Comunidad autónoma de les Illes Balears.
- Ley 1/98 del 21 de diciembre de Patrimonio Histórico de les Illes Balears
- Decreto 14/2011, de 25 de febrero, de aprobación del Reglamento de intervenciones arqueológicas y paleontológicas de les Illes Balears.

- Decreto 53/2012 de 6 de julio, sobre vigilancia sanitaria de las aguas de consumo humano de les Illes Balears.

Por su especial relevancia y conexión con el tema se han extraído los artículos 21 y 24 del Plan Hidrológico de *les Illes Balears*:

*Artículo 21. Otras previsiones*

- 1. Se fomentará la utilización de aguas residuales depuradas que tengan la calidad adecuada para atender usos agrícolas existentes que en la actualidad se sirven con recursos subterráneos.*
- 2. Las demandas de abastecimiento urbano que no sea posible satisfacer mediante la aplicación de los criterios establecidos en los artículos anteriores, podrán atenderse mediante desalación de agua de mar.*
- 3. El futuro incremento de las demandas de agua para campos de golf u otros espacios recreativos similares se atenderá mediante las disponibilidades de aguas residuales depuradas o desalación de agua de mar.*
- 4. El mantenimiento de zonas verdes previstas en el Planeamiento urbanístico será atendido, en la medida de lo posible, mediante agua residual depurada.*

*Artículo 24.*

*\* Los 2.3 hm<sup>3</sup>/año de diferencia con los 33,6 hm<sup>3</sup>/año consolidables para usos de riego actuales deberán suplirse con aguas residuales depuradas.*

### **6.3 ACCIONES DE UN PROYECTO TIPO**

Gran parte de las acciones a tener en cuenta, en un esquema causal de aspectos agrarios y sus impactos ambientales derivados están definidas en la Figura 69, modificada de MAPA-Tragsatec, 2007.

- Red de riego.
- Estación de bombeo.
- Reposición de los caminos.
- Actuaciones en la balsa de regulación.
- Automatización del equipo de bombeo.
- Cambio del sistema de telecontrol de la red de riego.
- Estación de filtrado.

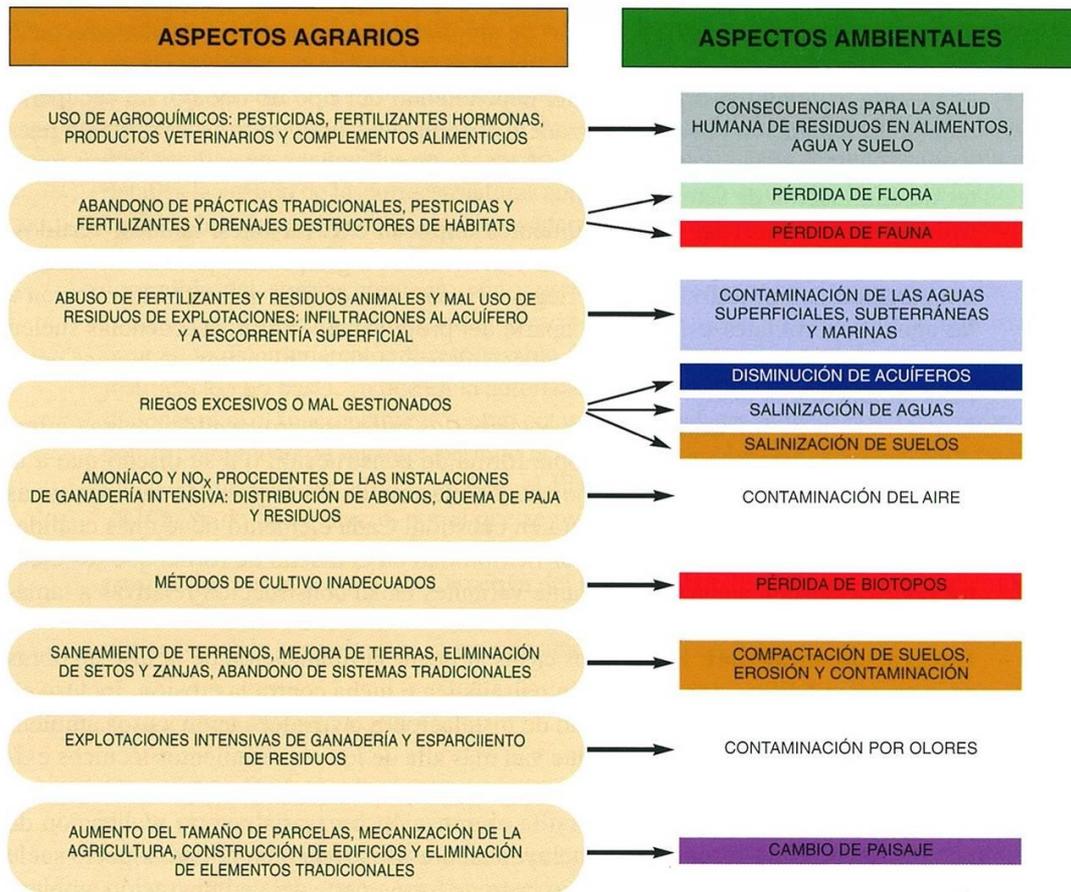


Figura 69. Relación entre impactos agrarios y sus aspectos ambientales relacionados. Modificado de MAPA-Tragsatec, 2007

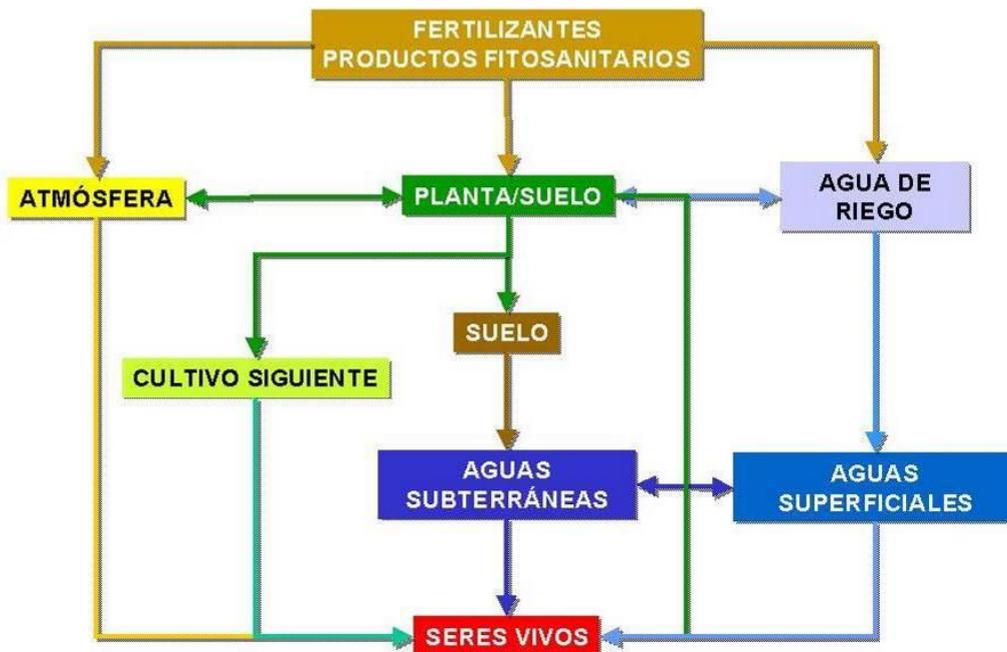


Figura 70. Principales vectores relacionados con la contaminación agraria difusa afectados por la actuación. Modificado de MAPA-Tragsatec, 2007.

### 6.3.1 Identificación de impactos

La identificación de impactos y valoración ha sido desglosada para la fase de construcción y de funcionamiento. Las medidas correctoras y algunas indicaciones para el programa de vigilancia y control se presentan cerrando este mismo apartado. Los principales aspectos considerados se presentan en forma de tablas:

- Estación de bombeo.
- Tendidos eléctricos.
- Tuberías.
- Uso de maquinaria.
- Vertederos, canteras.
- Instalaciones accesorias de obra.

#### Fase de construcción

La información se expone en forma de tabla de chequeo.

[Tabla 44: Listados de chequeo para impactos y actuaciones en proyectos de regadío, en especial con aguas regeneradas, conforme a los factores del medio. Fase de construcción \(página siguiente\).](#)

#### Fase de funcionamiento

- Funcionamiento de la balsa de riego.
- Funcionamiento de los tendidos eléctricos.
- Funcionamiento de la estación de bombeo.
- Funcionamiento de la tubería de conexión.
- Funcionamiento de las infraestructuras de regadío.
- Funcionamiento de la red de riego con aguas regeneradas.
- Funcionamiento de la red de drenaje.
- Uso de maquinaria agrícola.
- Laboreo y cambio de cultivo en las parcelas en riego.
- Utilización de fertilizantes.
- Utilización de pesticidas.

| FACTORES      | IMPACTO  | ACTUACIONES                             | LOCALIZACIÓN              | SIGNO    |
|---------------|--|---|---------------------------|----------|
| SUELOS        | Ocupación del terreno en construcción de la estación de bombeo                 | Localización de infraestructuras        | Estación de bombeo        | N        |
| SUELOS        | Inducción de erosión por movimiento de tierras                                 | Movimiento de tierras                   | Estación de bombeo        | N        |
| VEGETACIÓN    | Eliminación de vegetación por la construcción de estaciones de bombeo          | Eliminación de la vegetación            | Estación de bombeo        | N        |
| PAISAJE       | <b>Alteración de la calidad paisajística por nuevos elementos artificiales</b> | <b>Localización de infraestructuras</b> | <b>Estación de bombeo</b> | <b>N</b> |
| SOCIOECONOMÍA | Pérdida de terrenos cultivables por ocupación                                  | Construcción de infraestructuras        | Estación de bombeo        | N        |

| FACTORES            | IMPACTO  | ACTUACIONES                             | LOCALIZACIÓN                        | SIGNO    |
|---------------------|--|---|-------------------------------------|----------|
| AGUAS SUPERFICIALES | Emisión de partículas sólidas por construcción   | Movimiento de tierras                   | Zona en obras                       | N        |
| SUELOS              | Erosión inducida por infraestructuras y caminos  | Construcción de infraestructuras        | Zona Regable                        | N        |
| SUELOS              | Variación del modelado del terreno por movimiento de tierras                                     | Movimiento de tierras                   | Infraestructuras                    | N        |
| SUELOS              | Desestructuración de los horizontes edáficos   | Movimiento de tierras                   | Zona Regable                        | N        |
| SUELOS              | Aumento del riesgo de erosión por compactación   | Preparación del terreno                 | Zona Regable                        | N        |
| VEGETACIÓN          | Destrucción directa de la vegetación natural por desbroces, limpiezas y explanaciones            | Eliminación de la vegetación            | Infraestructuras                    | N        |
| VEGETACIÓN          | <b>Pérdida de vegetación riparia por actuaciones en cauces y cambios en régimen hidráulico</b>   | <b>Eliminación de la vegetación</b>     | <b>Cauces y riberas</b>             | <b>N</b> |
| VEGETACIÓN          | Pérdida de vegetación de secano por puesta en riego e infraestructuras                           | Puesta en riego                         | Secanos y barbechos                 | N        |
| VEGETACIÓN          | Pérdida de superficies de vegetación natural   | Eliminación de la vegetación            | Vegetación autóctona                | N        |
| FAUNA               | Aumento de la turbidez en hábitats piscícolas  | Movimiento de tierras                   | Río Tajo y Arroyos                  | N        |
| FAUNA               | Molestias a la fauna por ruidos y presencia de maquinaria  | Construcción de infraestructuras        | Zona Regable                        | N        |
| FAUNA               | Destrucción directa o indirecta de hábitats faunísticos por desbroces, limpiezas y explanaciones | Eliminación de la vegetación            | Infraestructuras                    | N        |
| FAUNA               | Aumento de la presión antrópica (Molestias, ruidos, circulación)                                 | Uso de maquinaria                       | Zona Regable                        | N        |
| PAISAJE             | Impacto visual de la construcción de infraestructuras  | Movimiento de tierras                   | Zona Regable                        | N        |
| PAISAJE             | Afección a monte bajo y matorral por la transformación   | Eliminación de la vegetación            | Vegetación autóctona                | N        |
| PAISAJE             | Introducción de barreras visuales contrastadas y lineales en el paisaje                          | Localización de infraestructuras        | Zona Regable                        | N        |
| PATRIMONIO          | Riesgo de pérdida de recursos arqueológicos y paleontológicos                                    | Movimiento de tierras                   | Zona Regable                        | N        |
| SOCIOECONOMÍA       | <b>Aumento del empleo por construcción de infraestructuras</b>                                   | <b>Construcción de infraestructuras</b> | <b>Núcleos urbanos (Municipios)</b> | <b>P</b> |
| SOCIOECONOMÍA       | <b>Alta aceptación social de la construcción de infraestructuras</b>                             | <b>Construcción de infraestructuras</b> | <b>Núcleos urbanos (Municipios)</b> | <b>P</b> |
| SOCIOECONOMÍA       | <b>Aumento de la actividad secundaria y terciaria por la construcción de infraestructuras</b>    | <b>Construcción de infraestructuras</b> | <b>Núcleos urbanos (Municipios)</b> | <b>P</b> |
| SOCIOECONOMÍA       | Disminución temporal de la actividad primaria durante la realización de obras de infraestructura | Construcción de infraestructuras        | Parcelas en cultivo                 | N        |
| SOCIOECONOMÍA       | <b>Cambio en la estructura y rentabilidad de las explotaciones agrarias</b>                      | <b>Cambio de cultivo</b>                | <b>Parcelas en riego</b>            | <b>P</b> |
| SOCIOECONOMÍA       | <b>Incremento de la producción final agraria por la puesta en riego</b>                          | <b>Construcción de infraestructuras</b> | <b>Núcleos urbanos (Municipios)</b> | <b>P</b> |
| SOCIOECONOMÍA       | <b>Consolidación del uso agrícola del suelo por la transformación</b>                            | <b>Construcción de infraestructuras</b> | <b>Parcelas en cultivo</b>          | <b>P</b> |
| SOCIOECONOMÍA       | <b>Aumento del gasto público en la zona</b>  | <b>Construcción de infraestructuras</b> | <b>Zona Regable</b>                 | <b>P</b> |
| SOCIOECONOMÍA       | <b>Revalorización de tierras</b>   | <b>Construcción de infraestructuras</b> | <b>Parcelas en cultivo</b>          | <b>P</b> |

### 6.3.2 Valoración de impactos

## Fase de construcción

En el mismo formato del apartado anterior.

Tabla 45: Listados de chequeo para la evaluación de los impactos y actuaciones en proyectos de regadío, en especial con aguas regeneradas, conforme a los factores del medio. Fase de construcción.

| FACTORES             | IMPACTO  | ACTUACIONES                             | LOCALIZACIÓN                        | SIGNO    | VALOR    |
|----------------------|--|---|-------------------------------------|----------|----------|
| ATMÓSFERA            | Emisión de polvo a la atmósfera por los movimientos de maquinaria de construcción y circulación de vehículos | Uso de maquinaria                       | Zona regable                        | N        | 3        |
| SUELOS               | Degradación edáfica por compactación   | Uso de maquinaria                       | Zonas en obras                      | N        | 3        |
| <b>SUELOS</b>        | <b>Generación de residuos por retirada de la capa asfáltica de algunos caminos</b>                           | <b>Vertidos</b>                         | <b>Zona Regable</b>                 | <b>N</b> | <b>1</b> |
| VEGETACIÓN           | Pérdida de vegetación riparia por actuaciones en cauces y cambios en régimen hidráulico                      | Eliminación de la vegetación            | Cauces y riberas                    | N        | 2        |
| <b>VEGETACIÓN</b>    | <b>Afección de la construcción de tuberías de riego a vegetación natural en bordes de caminos</b>            | <b>Eliminación de la vegetación</b>     | <b>Matorrales</b>                   | <b>N</b> | <b>1</b> |
| PAISAJE              | Alteración de la calidad paisajística por nuevos elementos artificiales                                      | Localización de infraestructuras        | Estación de bombeo                  | N        | 3        |
| <b>SOCIOECONOMÍA</b> | <b>Cambio en la estructura y rentabilidad de las explotaciones agrarias</b>                                  | <b>Cambio de cultivo</b>                | <b>Parcelas en riego</b>            | <b>P</b> | <b>1</b> |
| SOCIOECONOMÍA        | Aumento del empleo por construcción de infraestructuras  | Construcción de infraestructuras        | Núcleos urbanos (Municipios)        | P        | 2        |
| <b>SOCIOECONOMÍA</b> | <b>Alta aceptación social de la construcción de infraestructuras</b>   | <b>Construcción de infraestructuras</b> | <b>Núcleos urbanos (Municipios)</b> | <b>P</b> | <b>1</b> |
| SOCIOECONOMÍA        | Aumento de la actividad secundaria y terciaria por la construcción de infraestructuras                       | Construcción de infraestructuras        | Núcleos urbanos (Municipios)        | P        | 2        |
| SOCIOECONOMÍA        | Incremento de la producción final agraria por la puesta en riego   | Construcción de infraestructuras        | Núcleos urbanos (Municipios)        | P        | 2        |
| <b>SOCIOECONOMÍA</b> | <b>Consolidación del uso agrícola del suelo por la transformación</b>  | <b>Construcción de infraestructuras</b> | <b>Parcelas en cultivo</b>          | <b>P</b> | <b>1</b> |
| SOCIOECONOMÍA        | Revalorización de tierras  | Construcción de infraestructuras        | Parcelas en cultivo                 | P        | 3        |
| SOCIOECONOMÍA        | Aumento del gasto público en la zona   | Construcción de infraestructuras        | Zona Regable                        | P        | 3        |

## Fase de funcionamiento

La información se expone en forma de tabla de chequeo.

Tabla 46: Listados de chequeo para la evaluación de los impactos y actuaciones en proyectos de regadío, en especial con aguas regeneradas, conforme a los factores del medio. Fase de funcionamiento.

| FACTORES            | IMPACTO   | ACTUACIONES          | LOCALIZACIÓN                 | SIGNO | VALOR |
|---------------------|---|----------------------|------------------------------|-------|-------|
| AGUAS SUBTERRÁNEAS  | Disminución de la calidad de las aguas subterráneas por arrastre de sales por desagüe del riego             | Aporte de agua       | Acuífero                     | N     | 2     |
| AGUAS SUBTERRÁNEAS  | Recuperación del nivel freático original  | Aporte de agua       | Acuífero                     | P     | 1     |
| AGUAS SUBTERRÁNEAS  | Aumento del riesgo de contaminación para los acuíferos por aguas de peor calidad                            | Origen del agua      | Acuífero                     | N     | 1     |
| AGUAS SUBTERRÁNEAS  | Aumento de niveles de P y N, contaminación por metales pesados y procesos anóxicos                          | Uso de fertilizantes | Acuífero                     | N     | 2     |
| AGUAS SUBTERRÁNEAS  | Aumento de niveles de metales pesados y compuestos orgánicos complejos                                      | Uso de pesticidas    | Acuífero                     | N     | 2     |
| AGUAS SUPERFICIALES | Disminución de la calidad de las aguas superficiales por las sales y sólidos disueltas por el drenaje       | Aporte de agua       | Cauces y humedales           | N     | 1     |
| AGUAS SUPERFICIALES | Aumento del riesgo de contaminación para los arroyos por aguas de peor calidad                              | Origen del agua      | Cauces y humedales           | N     | 3     |
| AGUAS SUPERFICIALES | Aumento de niveles de metales pesados y compuestos orgánicos complejos                                      | Uso de pesticidas    | Cuenca                       | N     | 2     |
| SUELOS              | Cambios químicos en el suelo por aporte de sales en el agua de riego  | Aporte de agua       | Parcelas en riego            | N     | 1     |
| SUELOS              | Deterioro de la estructura del suelo por aporte de sodio  | Aporte de agua       | Parcelas en riego            | N     | 2     |
| VEGETACIÓN          | Aumento de la vegetación espontánea de lindes, ribazos y desagües   | Aporte de agua       | Setos y linderos             | P     | 3     |
| VEGETACIÓN          | Aumento del riesgo de presión sobre bosquetes y setos vivos por crecimiento de las parcelas                 | Laboreo              | Parcelas en riego            | N     | 1     |
| FAUNA               | Aumento de la disponibilidad de alimento en biomasa total   | Uso de fertilizantes | Parcelas en riego            | P     | 3     |
| FAUNA               | Contaminación por metales pesados tóxicos para animales (Cd, Mo, Se) por incremento en el uso de pesticidas | Uso de pesticidas    | Parcelas en riego            | N     | 1     |
| SOCIOECONOMÍA       | Creación de empleo por necesidades de laboreo e incremento de producción                                    | Laboreo              | Núcleos urbanos (Municipios) | N     | 2     |
| SOCIOECONOMÍA       | Reutilización de un residuo en una actividad productiva   | Origen de agua       | Zona Regable                 | P     | 1     |
| SOCIOECONOMÍA       | Acumulación de productos químicos en los vegetales cultivados   | Uso de pesticidas    | Zona Regable                 | N     | 2     |

## 6.4 MEDIDAS CORRECTORAS

### Fase de construcción

- Obras accesorias y maquinaria:
  - Control de la circulación de maquinaria de obras fuera de los puntos señalados para la realización de trabajos.
  - Selección de un área determinada para la localización de un parque de maquinaria lejos de cursos de agua y vegetación de valor.
  - Recuperación e integración de la zona seleccionada al finalizar las operaciones.
  - Riego de los caminos en época de estiaje y de vientos fuertes para evitar la generación de nubes de polvo.
- Enterramiento de las tuberías en la red de caminos:

- Detección de los puntos de cruce entre la red de caminos y los setos y muretes de interés para su correcta señalización al equipo de manejo de maquinaria para evitar daños accidentales.
- Descompactación mediante roturación de las zonas afectadas en la zona de maniobra de la maquinaria pesada.
- Retirada de la capa asfáltica y transporte a un depósito de residuos controlados.
- Retirada a un depósito adecuado de cualquier sobrante de tierra generado.
- Realización de las obras en puntos que cruzan sobre la red hidrológica permitiendo en todo momento el flujo natural.
- Construcción de la estación de bombeo:
  - Adecuación de las edificaciones (estación de bombeo) al estilo, color, textura y altura de las construcciones rurales circundantes.

### **Fase de funcionamiento**

- Aporte de aguas depuradas para riego:
  - Garantía de un nivel mínimo de calidad del agua de riego mediante análisis químico y biológico para minimizar los efectos sobre agrológicos, ambientales y sanitarios.
  - Prohibición del uso de aguas que no alcancen los límites permisibles para riego.
  - Respeto de los plazos para el fin del periodo de riego según cultivo para eliminar riesgos sanitarios.
  - Priorización de sistemas de riego localizado sobre aspersión y gravedad.
  - Control de las dosis de riego y lavado mediante la realización de campañas de información a los regantes.
  - Diseño de un correcto sistema de drenaje que evite encharcamientos.
- Laboreo y cambio de cultivo:
  - Prevención de la eliminación de los bosquetes y matorrales silvestres mediante su catalogación y protección en terrenos públicos y mediante fomento de ayudas a propietarios o adquisición por parte de la administración en el caso de las privadas.
  - Realización de prácticas de conservación de suelos.
  - Control de la superficie puesta en cultivo para prevenir ampliaciones en zonas con cubierta vegetal natural.
  - Respeto de las riberas de los arroyos de la cuenca.
  - Uso de fertilizantes.
  - Información al agricultor por parte de técnicos de la administración agraria sobre métodos de fertilización suficientes y poco agresivos.
  - Reutilización de los residuos ganaderos generados en el área para fertilización de terrenos agrícolas.
  - Realización de un registro de pozos y sondeos en la zona con sellado de los ilegales y establecimiento de perímetros de protección para los legales.
  - Uso de pesticidas.

- Prohibición de la aplicación de pesticidas pulverizados en días de fuerte viento.
- Fomento de control integrado y de métodos compatibles con el medio ambiente.
- Realización de campañas de información a los regantes sobre la correcta aplicación de plaguicidas: dosis, métodos, espectro, permanencia...

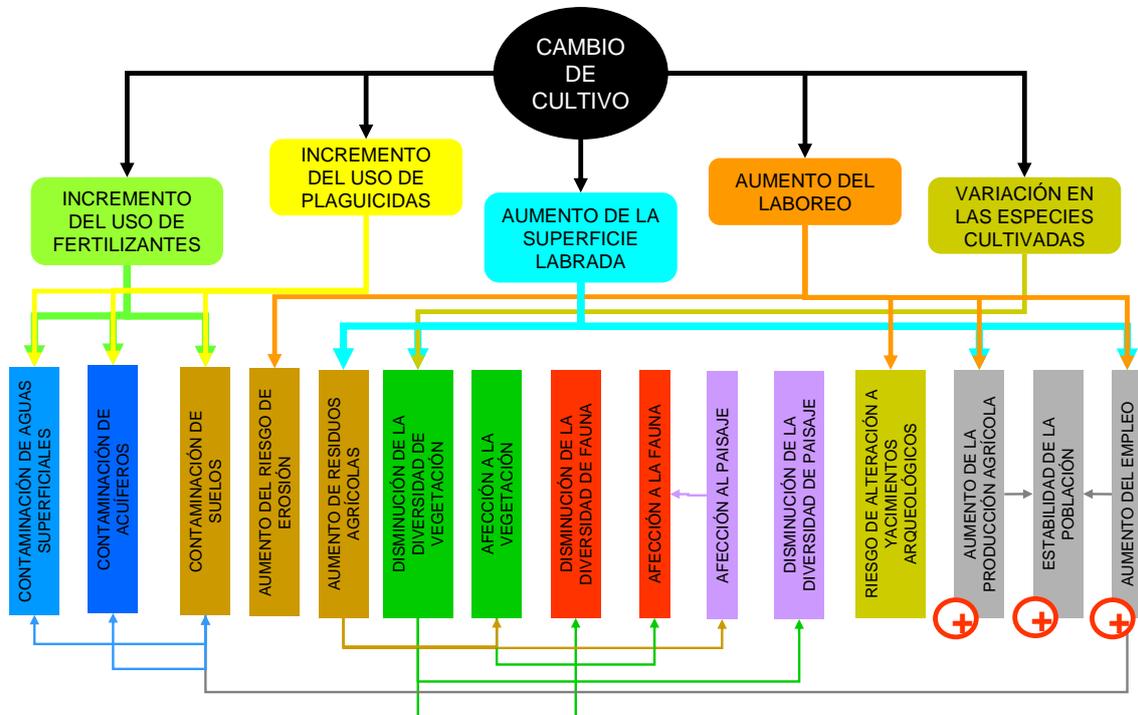


Figura 71. Impactos previsibles del cambio de cultivo y método de riego. Modificado de MAPA-Tragsatec, 2007.

Al final del apartado y como anexo 1 se adjuntan las tablas de chequeo para la evaluación de los impactos detectados, que pueden servir para estudios análogos.

## 6.5 PROGRAMA DE VIGILANCIA

- La garantía tanto de la reducción de efectos nocivos hasta límites admisibles y de la ratificación de los impactos positivos precisa de la realización de controles. La asiduidad y técnica depende de los objetivos marcados para la vigilancia.
- Certificación mediante acreditación de la adecuada gestión de los restos de capa asfáltica en un depósito de residuos legalmente establecido.
- Puesta en marcha de un sistema de control de la calidad de las aguas de riego, subterráneas y superficiales: pH, contenido en Na, Cloruros, nitratos, nitritos, fósforo, potasio, metales pesados y bacteriológico.
- Catálogo de sondeos y pozos con relación de propietarios, situación, estado, profundidad, nivel piezométrico, perímetro de protección.
- Control mediante encuesta anual de caudales de riego y superficies regadas (especie en cultivo, sistema de riego, consumo de agua, insumos, producción, rentabilidad, UTH...).

## 6.6 TABLAS DE CHEQUEO

Parámetros para el seguimiento ambiental por infraestructuras y parcelas en riego (Tabla 47), parámetros para el seguimiento ambiental por infraestructuras (Tabla 48), parámetros para el seguimiento ambiental de canales y acequias (Tabla 49) y parámetros para el seguimiento ambiental de pozos y sondeos (Tabla 50).

Tabla 47: Parámetros para el seguimiento ambiental por infraestructuras y parcelas en riego

| LOCALIZACIÓN  | FACTORES            | TIPO       | PARÁMETRO   |
|---|---------------------|------------|---|
| Infraestructuras  | FAUNA               | IMPACTO    | Superficie de hábitats faunísticos equivalentes a vegetación eliminada  |
|   | PAISAJE             | IMPACTO    | Calidad paisajística  |
| Núcleos urbanos (Municipios)  | SOCIOECONOMÍA       | IMPACTO    | Actividad económica   |
|   |                     |            | Balance demográfica y renta media   |
|   |                     |            | Balance migratorio  |
|   |                     |            | Demanda de riego encuestada   |
|   |                     |            | Densidad de población   |
|   |                     |            | Distribución de la renta  |
|   |                     |            | Empleo generado por las explotaciones   |
|   |                     |            | Empleo generado por las obras   |
|   |                     |            | Grado de aceptación por encuesta  |
|   |                     |            | Producción Final Agraria  |
|   |                     |            | Relación entre incremento de UTH agrarias y UTH servicios derivadas   |
|   |                     |            | Renta media   |
|   |                     |            | Renta y rentabilidad agraria  |
|   |                     |            | Ruido generado  |
| Situación de actividades anejas al regadío incluidos en el PGT: secaderos de cereal, fábricas de piensos compuestos, matadero, edificios para cooperativas agrarias |                     |            |   |
| Parcelas en cultivo   | SOCIOECONOMÍA       | IMPACTO    | Abandono de tierras   |
| Parcelas en riego   | SOCIOECONOMÍA       | IMPACTO    | Comparación entre explotaciones en características, dimensiones, producción final, producto neto y beneficio  |
|   |                     | IMPACTO    | Productividad agrícola  |
|   |                     | IMPACTO    | Renta agraria actual y futura   |
| Parcelas en riego   | SOCIOECONOMÍA       | MEDIDA     | Gasto energético en bombeo  |
|   |                     | VIGILANCIA | Encuesta directa a las explotaciones por personal especializado al cabo de 5 años de la Transformación: Nº de explotaciones, Nº de ha en riego por explotación, Carga ganadera asociada, Producción final agraria por explotación, beneficio por explotación, renta por explotación, valor medio por ha y U.T.H. (según magnitudes del PGT) |
| Parques de maquinaria   | SUELOS              | IMPACTO    | Contaminación por hidrocarburos y aceites   |
| Cauces y riberas  | AGUAS SUPERFICIALES | IMPACTO    | Profundidad útil de cauces  |
|   | VEGETACIÓN          | IMPACTO    | Turbidez y sólidos en suspensión  |
| Masas arbóreas  | VEGETACIÓN          | IMPACTO    | Superficie de vegetación riparia  |
|   | SUELOS              | IMPACTO    | USLE (C)  |
|   | VEGETACIÓN          | IMPACTO    | Superficie desarbolada  |
|   | FAUNA               | IMPACTO    | Superficie desarbolada  |
| Vegetación autóctona  | PAISAJE             | IMPACTO    | Superficie de matorral afectada por obras   |
|   | VEGETACIÓN          | IMPACTO    | Superficie de vegetación natural  |
|   | VEGETACIÓN          | VIGILANCIA | Estado de conservación de especies botánicas  |
|   | FAUNA               | IMPACTO    | Vegetación afectada por obras   |
| Replantaciones  | PAISAJE             | IMPACTO    | Diversidad y calidad paisajística   |
|   | VEGETACIÓN          | VIGILANCIA | Análisis del comportamiento de especies usadas, reposición de marras usando las óptimas y eliminación de <b>oportunistas</b> competidores   |
|   |                     | VIGILANCIA | Métodos de revegetación   |
| Replantaciones  | PAISAJE             | IMPACTO    | Superficie de repoblaciones afectada por obras  |
|   |                     | MEDIDA     | Superficie de pantallas durante transformación  |

| LOCALIZACIÓN   | FACTORES                          | TIPO  | PARÁMETRO  |  |
|--|-----------------------------------|---|--|--|
| Yacimientos arqueológicos  | PATRIMONIO                        | MEDIDA  | Existencia de restos arqueológicos   |  |
| Zona en obras  | GENERALES                         | MEDIDA  | EsIA sobre modificaciones del proyecto   |  |
|  |                                   | VIGILANCIA  | Concordancia entre proyecto y construcciones   |  |
|  |                                   |   | Existencia de informes anuales   |  |
|  |                                   |   | Existencia de informes especiales  |  |
|  |                                   |   | Informe semestral sobre el estado de las medidas en fase de transformación sobre suelo, paisaje, vegetación, fauna, patrimonio y aguas         |  |
| Informes mensuales sobre incidentes: climatología, visitas, descripción y valoración de obra realizada, modificaciones y resultados de control |                                   |   |  |  |
| Zona Regable   | GENERALES                         | MEDIDA  | Directrices ambientales sobre PCO  |  |
|  |                                   | Presupuesto de medidas correctoras  |  |  |
|  | VIGILANCIA                        | Informe anual sobre análisis de aguas (según MAPA), Superficies por aprovechamiento, volumen de agua de cada cultivo y calendario de riegos |  |  |
|  |                                   | Informe anual sobre estado de las medidas en fase de explotación relacionadas con agroquímicos y laboreo                                    |  |  |
|  | SUELOS                            | IMPACTO   | Índice de compactación   |  |
|  |                                   |   | Pérdida de horizontes edáficos   |  |
|  |                                   | MEDIDA  | Superficie ocupada por infraestructuras  |  |
|  | VEGETACIÓN                        | MEDIDA  | Localización de depósitos de tierras vegetales   |  |
|  |                                   |   | Superficie de las estaciones de bombeo y longitud de líneas  |  |
|  | FAUNA                             | IMPACTO   | Superficie ocupada por infraestructuras y regadíos   |  |
|  |                                   |   | Calidad paisajística   |  |
|  |                                   |   | Desaparición de especies sensibles   |  |
|  |                                   |   | Ruido en baudios   |  |
|  |                                   |   | Informes especiales sobre incidencias de obra particulares   |  |
|  |                                   |   | Informes mensuales sobre incidentes: climatología, visitas, descripción y valoración de obra realizada, modificaciones y resultados de control |  |
|  |                                   |   | Informes y análisis sobre contaminación  |  |
|  |                                   |   | Método de seguimiento de las medidas correctoras   |  |
|  |                                   |   | Vigencia de la Vigilancia ambiental  |  |
|  |                                   |   | PAISAJE  | IMPACTO                                |
|  | Visibilidad y calidad del paisaje |   |  |  |
|  | VIGILANCIA                        | MEDIDA  |  | Superficie ocupada por la Zona Regable |
|  |                                   | Visibilidad de infraestructuras   |  |  |
|  |                                   | Existencia de proyecto de restauración  |  |  |
| PATRIMONIO   | MEDIDA                            | Método de revisión de medidas correctoras   |  |  |
|  |                                   | Vigencia del PVA  |  |  |
| SOCIOECONOMÍA  | IMPACTO                           | Existencia de restos arqueológicos  |  |  |
|  |                                   | Superficie estudiada arqueológicamente  |  |  |
|  | VIGILANCIA                        | Productividad final agraria   |  |  |
| MEDIDA   |                                   | TIR y periodo de recuperación de la inversión   |  |  |
| Zonas de baja capacidad de acogida   | SUELOS                            | IMPACTO   | Superficie excluida de transformación en riego   |  |
|  |                                   | IMPACTO   | Encuesta directa: Nº de explotaciones, nº de ha en riego por explotación, carga ganadera, PFA, beneficio, renta, valor medio por ha y UTH      |  |
|  |                                   | MEDIDA  | Cubierta vegetal   |  |
| Zonas degradadas   | GENERALES                         | MEDIDA  | Localización de zonas excluidas  |  |
|  | PAISAJE                           | MEDIDA  | Superficie y localización de áreas excluidas   |  |
|  | PAISAJE                           | IMPACTO   | Estado de conservación de las zonas degradadas   |  |
| Zonas sensibles aptas para riego   | GENERALES                         | MEDIDA  | EsIA y DIA de proyectos derivados  |  |

Tabla 48: Parámetros para el seguimiento ambiental por infraestructuras

| LOCALIZACIÓN   | FACTORES  | TIPO   | PARÁMETRO  |
|--|---|--|--|
| Infraestructuras   | SUELOS  | IMPACTO  | Superficie ocupada por infraestructuras  |
|  |   |  | Cambios en curvas de nivel y geomorfología   |
|  | VEGETACIÓN  | IMPACTO  | Superficie de vegetación natural equivalente   |
|  |   | MEDIDA   | Superficies no vegetadas en el entorno de infraestructuras   |
|  | FAUNA   | MEDIDA   | Presencia de elementos de salvamento en red hidráulica   |
|  | PAISAJE   | IMPACTO  | Calidad intrínseca, incidencia visual y fragilidad   |
|  |   | MEDIDA   | Cubierta vegetal en torno a grandes infraestructuras   |
|  |   |  | Existencia de zonas degradadas   |
|  |   |  | Superficie vegetal replantada  |
|  | PAISAJE   | MEDIDA   | Visibilidad de infraestructuras  |
| Localización de infraestructuras y capacidad de absorción visual |   |  |  |
| Taludes y terraplenes  | AGUAS SUPERFICIALES   | IMPACTO  | Escorrentías a pie de taludes  |
|  | SUELOS  | IMPACTO  | Aparición de zonas desnudas o degradadas   |
|  |   | MEDIDA   | Cubierta vegetal de taludes  |
|  |   |  | Estado de conservación de taludes y terraplenes  |
|  | PAISAJE   | MEDIDA   | Longitud y pendiente de taludes  |
| Vallados   | FAUNA   | MEDIDA   | Métodos de señalización  |
|  |   |  | Red de pasos en Zona Regable   |
| Núcleos urbanos (Municipios)                                     | PAISAJE   | MEDIDA   | Perímetro arbolado   |
|  | SOCIOECONOMÍA   | IMPACTO  | Balace demográfico   |
|  |   |  | Empleo generado por las obras  |
|  |   | MEDIDA   | Grado de aceptación por encuesta   |
|  |   |  | Renta media  |
|  | MEDIDA  | Empleo generado por las obras  |  |
| Ruido nocturno   |   |  |  |
| Cauces y humedales   | AGUAS SUBTERRÁNEAS  | IMPACTO  | Afloramientos del acuífero   |
|  | AGUAS SUPERFICIALES   | IMPACTO  | Localización de puntos de estancamiento  |
|  |   | MEDIDA   | Sólidos en suspensión en el río Esla aguas debajo de las obras   |
|  | VEGETACIÓN  | MEDIDA   | Señalización de zonas y ejemplares a respetar  |
| Replantaciones   | VEGETACIÓN  | MEDIDA   | Estado de desarrollo de las revegetaciones   |
|  |   |  | Superficie revegetada  |
|  | VEGETACIÓN  | VIGILANCIA   | Climatología durante replantaciones  |
|  |   |  | Comprobación de 1 unidad de plantación por cada 50   |
|  |   |  | Control de germinación y nacencia a los 45 días de ejecución   |
|  |   |  | Cubierta vegetal   |
|  |   |  | Estado de conservación   |
|  |   |  | Muestreo en el 5% de las unidades propuestas al azar: Apertura del hoyo, enterrado, riego y distribución |
|  |   |  | Revisión de etiquetas de envases o certificado de garantía del fabricante                                |
|  | Visita semanal al depósito de plantas con revisión de especies, tamaños y sanidad |  |  |
| PAISAJE  | VIGILANCIA  | Dos revisiones (verano y primavera): revisión de la cobertura vegetal de taludes |  |
| Vegetación autóctona   | VEGETACIÓN  | IMPACTO  | Cubierta vegetal   |
|  |   |  | Diversidad vegetal   |
|  |   |  | Superficie ocupada por infraestructuras  |
|  | MEDIDA  | Cubierta vegetal   |  |

| LOCALIZACIÓN                    | FACTORES            | TIPO   | PARÁMETRO   |
|---------------------------------|---------------------|--|---|
|                                 |                     |  | Densidad y especies plantadas                                   |
|                                 |                     |  | Superficie afectada por obras                                   |
|                                 |                     | VIGILANCIA   | Instalación de tuberías, desagües y caminos sobre sabinar       |
|                                 |                     | FAUNA  | IMPACTO   |
|                                 |                     | MEDIDA   | Cronograma de la ejecución de obra y áreas de avutardas         |
| Parcelas en cultivo             | SOCIOECONOMÍA       | IMPACTO  | Superficie de cultivos afectada por obras                       |
|                                 |                     |  | Valor medio de terrenos agrícolas                               |
| Zona Regable                    | GENERALES           | MEDIDA   | Mecanismos de coordinación entre PVA y Obra                     |
|                                 |                     | VIGILANCIA   | Mecanismos de coordinación entre PVA y Obra                     |
|                                 | ATMÓSFERA           | IMPACTO  | Nivel de ruido en baudiós y generación de nubes de polvo        |
|                                 |                     | VIGILANCIA   | Mecanismos de control de impactos atmosféricos                  |
|                                 | SUELOS              | IMPACTO  | Pérdida de horizontes edáficos                                  |
|                                 |                     |  | Superficie afectada por salinización                            |
|                                 |                     |  | Superficie Agraria Útil (SAU)                                   |
|                                 |                     |  | USLE (C)  |
|                                 |                     | MEDIDA   | Superficie ocupada por infraestructuras                         |
|                                 |                     |  | Distribución de extracciones y aportes                          |
|                                 | VIGILANCIA          | Índice de compactación   |   |
|                                 |                     | Medidas correctoras aplicadas  |   |
|                                 | VEGETACIÓN          | IMPACTO  | Localización de depósitos de tierras vegetales                  |
|                                 | FAUNA               | IMPACTO  | Superficie eliminada por clases de vegetación                   |
|                                 |                     | MEDIDA   | Localización temporal y física de las obras                     |
|                                 | PAISAJE             | IMPACTO  | Cronograma de la ejecución de obra                              |
|                                 |                     |  | Estado de conservación de las zonas degradadas                  |
|                                 |                     | MEDIDA   | Visibilidad de infraestructuras                                 |
|                                 |                     |  | Valor paisajístico de infraestructuras                          |
|                                 | PATRIMONIO          | IMPACTO  | Visibilidad de infraestructuras                                 |
| MEDIDA                          |                     | Existencia de restos arqueológicos                                     |   |
| VIGILANCIA                      |                     | Aparición de restos durante las obras                                  |   |
| SOCIOECONOMÍA                   | MEDIDA              | Existencia de restos arqueológicos y forma de vigilancia especializada |   |
| Zonas sensibles                 | SUELOS              | IMPACTO  | Ruido en baudiós  |
|                                 |                     | VIGILANCIA   | Existencia de derrumbamientos y hundimientos en zonas yesíferas |
|                                 | VEGETACIÓN          | MEDIDA   | Localización y vulnerabilidad                                   |
|                                 | FAUNA               | IMPACTO  | Especies y cubierta vegetal de las áreas llanas revegetadas     |
|                                 | PAISAJE             | MEDIDA   | Evolución de la población de avutardas                          |
|                                 |                     |  | Perímetro arbolado  |
| Visibilidad de infraestructuras |                     |  |   |
| Zonas degradadas                | VEGETACIÓN          | MEDIDA   | Especies utilizadas en pantallas                                |
|                                 |                     |  | Estado de regeneración de zonas degradadas                      |
|                                 |                     |  | Cubierta vegetal  |
| Zonas en obras                  | GENERALES           | VIGILANCIA   | Época de plantación   |
|                                 |                     |  | Mecanismos de coordinación entre PVA y Obra                     |
|                                 | ATMÓSFERA           | IMPACTO  | Formación ambiental de dirección de obra                        |
|                                 |                     |  | Nivel de ruido en baudiós                                       |
|                                 | AGUAS SUPERFICIALES | MEDIDA   | Turbidez y sólidos en suspensión                                |
|                                 |                     | IMPACTO  | Turbidez (SS) de aguas en arroyos y drenajes                    |
|                                 | FAUNA               | IMPACTO  | Localización temporal y física de las obras                     |
| Superficie afectada por obras   |                     |  |   |
| PATRIMONIO                      | MEDIDA              | Existencia de vigilancia   |   |
|                                 |                     | Permanencia de un arqueólogo en equipo de obras                        |   |
| Zonas sin obras                 | SUELOS              | MEDIDA   | Existencia de rodadas   |

Tabla 49: Parámetros para el seguimiento ambiental de canales y acequias

| LOCALIZACIÓN        | FACTORES                                       | TIPO   | PARÁMETROS   |
|---------------------|--|--|--|
| Acequias            | SUELOS   | IMPACTO  | Visibilidad  |
|                     |  | MEDIDA   | Cubierta vegetal de taludes <15%   |
|                     |  |  | Cubierta vegetal de taludes de 15-20%  |
|                     |  |  | Cubierta vegetal de taludes de 20-25%  |
|                     | PAISAJE  | IMPACTO  | Longitud y pendiente de taludes  |
|                     |  | MEDIDA   | Fragilidad paisajística  |
| Canales principales | AGUAS SUPERFICIALES                            | IMPACTO  | Superficie vegetal replantada  |
|                     | SUELOS   | IMPACTO  | Cambios en drenaje natural (deseccaciones y encharcamientos)                 |
|                     |  |  | Superficies afectadas por encharcamiento                                     |
|                     |  | MEDIDA   | Flujo modificado del drenaje   |
|                     |  |  | Superficie de taludes y clases de tierra (altura y longitud de desmontes)    |
|                     |  |  | Cambios en curvas de nivel y geomorfología                                   |
|                     |  |  | Cubierta vegetal de taludes  |
|                     |  |  | Superficie afectada por acequias elevadas                                    |
|                     |  |  | Cubierta vegetal de taludes  |
|                     |  |  | Existencia de berma en desmontes   |
|                     |  |  | Pendiente del desmonte   |
|                     | Sistemas de canalización en desmonte           |  |  |
|                     | Existencia de rastros de erosión hídrica       |  |  |
|                     | Localización de depósitos de tierras vegetales |  |  |
|                     | VEGETACIÓN                                     | IMPACTO  | Superficies vegetadas eliminadas   |
|                     |  | MEDIDA   | Tasa de incendio de vegetación   |
|                     |  |  | Superficie afectada en alcornocal  |
|                     |  |  | Localización de pantallas vegetales entorno de pueblos                       |
|                     | FAUNA  | IMPACTO  | Vegetación afectada por maquinaria   |
|                     |  |  | Localización de barreras   |
|                     |  |  | Superficie de hábitats y vegetación afectados por canal                      |
|                     |  |  | Efectividad de pasos para fauna terrestre                                    |
|                     |  |  | Evolución de poblaciones de ánade real, lavandera blanca, carricero común... |
|                     |  |  | Compartimentación entre hábitats y frecuencia de ahogamientos                |
| MEDIDA              |  | Cubierta vegetal de pasos para fauna                             |  |
|                     |  | Existencia de medidas antiahogamiento                            |  |
|                     |  | Nº y tamaño de pasos   |  |
|                     |  | Perfil del canal y tasa de ahogamientos                          |  |
| PAISAJE             | VIGILANCIA                                     | Frecuencia de visitas de revisión de mecanismos antiahogamientos |  |
|                     | IMPACTO  | Superficie vegetal afectada por obras                            |  |
|                     |  | Visibilidad desde núcleos urbanos                                |  |
|                     |  | Cubierta vegetal de taludes                                      |  |
| MEDIDA              | Visibilidad de infraestructuras                |  |  |
|                     | AGUAS SUBTERRÁNEAS                             | IMPACTO  | Cambios en flujo hidrológico (caudales y freático)                           |
| Ríos y arroyos      | AGUAS SUPERFICIALES                            | IMPACTO  | Caudal del río tras la diversificación (mensual)                             |
|                     | AGUAS SUPERFICIALES                            | IMPACTO  | Cambios en drenaje natural (deseccaciones y encharcamientos)                 |
|                     | FAUNA  | IMPACTO  | Superficie de hábitats eliminada y especies afectadas                        |
|                     | VEGETACIÓN                                     | MEDIDA   | Cubierta vegetal de ribera   |
|                     |  |  | Localización de pantallas en sifones   |
| PAISAJE             | IMPACTO  | Visibilidad de la obra y fragilidad del entorno                  |  |
| Áreas sensibles     | SUELOS   | IMPACTO  | Existencia de rastros de erosión hídrica                                     |
|                     | VEGETACIÓN                                     | IMPACTO  | Superficie afectada por encharcamiento                                       |
|                     |  |  | Cubierta vegetal   |
|                     | PAISAJE  | IMPACTO  | Fragilidad paisajística  |
| MEDIDA              |  | Ajuste a trazados antiguos de acequias                           |  |

Tabla 50: Parámetros para el seguimiento ambiental de pozos y sondeos

| LOCALIZACIÓN  | FACTORES            | TIPO       | PARÁMETROS  |
|---|---------------------|------------|---|
| Acuífero  | AGUAS SUBTERRÁNEAS  | IMPACTO    | Concentración de metales pesados y complejos orgánicos  |
|   |                     |            | Concentración de N, P, K y DQO  |
|   |                     |            | Concentración de sales y nitratos   |
|   |                     |            | Modelo DRASTIC (Contaminación potencial)  |
|   |                     |            | Nivel piezométrico  |
|   |                     | MEDIDA     | Análisis químicos realizados  |
|   |                     |            | Existencia de red de vigilancia   |
|   |                     |            | Nº de pozos en activo y caudales extraídos  |
|   |                     | VIGILANCIA | Concentración de contaminantes y nivel freático   |
|   |                     |            | Concentración de nitratos y perímetros de protección establecidos   |
| Pozos   | AGUAS SUBTERRÁNEAS  | VIGILANCIA | Nº de pozos en activo y caudales extraídos  |
| Pozos antiguos  | PATRIMONIO          | MEDIDA     | Nivel piezométrico  |
|   |                     |            | Inventario de pozos antiguos  |
| Acuíferos cuaternarios  | AGUAS SUPERFICIALES | IMPACTO    | Concentración de metales pesados y complejos orgánicos  |
|   | AGUAS SUBTERRÁNEAS  | IMPACTO    | Concentración de metales pesados y complejos orgánicos  |
| Acuífero bajo las Zonas regadas a baja altura   | AGUAS SUBTERRÁNEAS  | MEDIDA     | Nivel piezométrico  |
| Zonas 6 aluviales de alta vulnerabilidad hidrogeológica (según cartografía)                                 | AGUAS               | MEDIDA     | Tipo de pesticidas por cultivo  |
| Acuíferos (Muestreos anuales del ITGE del acuífero 3º y 15 muestreos semestrales en 3 pozos de cada sector) | AGUAS SUBTERRÁNEAS  | VIGILANCIA | Esenciales: Tª, CE, volumen, pH, PO <sub>4</sub> , NO <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , NH <sub>4</sub> , SO <sub>4</sub> , HCO <sub>3</sub> , Cl, Ca, Mg, K, SiO <sub>2</sub> , DQO; Deseables: residuo seco, CO <sub>3</sub> , Cu, Zn, Bo, Pb, Cr, Li, Br, Fe, Ni, F y rastros de pesticida o fertilizante |
| Pozos cerca de granjas y edificios mensualmente en 4 puntos según cartografía                               | AGUAS SUBTERRÁNEAS  | VIGILANCIA | Tª, CE, Profundidad de Secchi, Q, Turbidez, pH, O <sub>2</sub> disuelto, P, N, Alcalinidad, Ca, Mg, Na, K, SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , Cl, Fe total, metales pesados, Mn, Mo, SH, Clorofila A, DBO <sub>5</sub> , C orgánico  |
| Humedales (Lagunas)   | AGUAS SUPERFICIALES | IMPACTO    | Superficie de lagunas   |
|   | VEGETACIÓN          | IMPACTO    | Superficie de orla freatófila en lagunas  |
|   | FAUNA               | IMPACTO    | Censos de anátidas o aves acuáticas   |

## 6.7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES MEDIOAMBIENTALES

Desde un punto de vista medioambientalista, el desarrollo de este proyecto ha permitido avanzar en el uso de fuentes alternativas de agua, lo que supone una contribución importante para que el regadío continúe evolucionando hacia un crecimiento sostenible y para la preservación del medio ambiente.

Aunque los resultados son “esperanzadores”, deberán ser evaluados en etapas posteriores, tras alcanzar resultados concluyentes en los efectos a largo plazo.

## 6.8 BIBLIOGRAFÍA

- Ayers, R.S., Westcot, D.W., 1985. Water Quality for Agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper 29. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 174 pp.
- Conselleria D'agricultura, Pesca i Alimentación. N.d. Plan de modernización del regadío en la Comunidad Valenciana. Generalitat Valenciana.
- Dunne, T. and Leopold, L.B. 1978. Water in Environmental Planning. W.H. Freeman and Company. New York.
- Letey, J., Hoffman, G.J., Hopmans, J.W., Grattan, S.R. Suarez, D., Corwin, D.L., Oster, J.D., Wu, L., Amrhein, C. 2011. Evaluation of soil salinity leaching requirement guidelines. *Agricultural Water Management*, 98: 502–506.
- MAPA-Tragsatec, 2004. Guía sobre evaluación de impacto ambiental de proyectos de consolidación y mejora de regadío. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.
- MAPA-Tragsatec, 2007. Guía sobre evaluación de impacto ambiental de proyectos de regadío. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid. 396 pg.
- MAPA-Tragsega, 2004. Guía de la Condicionalidad de la Política Agraria Común. Tragsega- MAPA. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid. NIPO 251-05-066-2. 226 pg.
- San Sebastián, J., 2004. Legislación de EIA estatal y autonómica en España. Aplicación de evaluación estratégica al regadío. Comunicación en JT Evaluación ambiental Estratégica. VII CONAMA, Madrid.

## 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES FINALES



***EFFECTOS DEL RIEGO CON AGUA REGENERADA EN SUELOS, ACUÍFEROS Y CULTIVOS...***

## APARTADO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES FINALES

El Grupo Tragsa, a través de sus proyectos de I+D+i en tecnologías del regadío, está trabajando en la tecnificación de las Comunidades de Regantes, favoreciendo una mejor gestión y explotación de sus redes colectivas de riego que permita reducir costes, y por tanto, obtener una mayor rentabilidad.

Asimismo, los avances perseguidos en el fomento del uso sostenible de otras fuentes alternativas de aguas suponen una contribución importante para el medio ambiente y para que el regadío continúe evolucionando hacia un crecimiento sostenido. En este contexto se han obtenidolas **conclusiones** y **recomendaciones finales** siguientes:

- 1) Para los distintos cultivos ensayados, se obtuvieron las siguientes conclusiones como resultado del riego con aguas regeneradas comparado con el uso de aguas de pozo:
  - a. **Vid:** Se observó un comportamiento fisiológico diferente en función de la variedad estudiada. Así, las vides de la variedad ‘Cabernet Sauvignon’ tuvieron un mejor estado hídrico y niveles más altos de intercambio gaseoso cuando fueron regadas con aguas regeneradas. Por el contrario las vides de la variedad autóctona ‘Prensal Blanc’ presentaron mayores niveles de intercambio gaseoso cuando fueron regadas con agua de pozo asociado a su mejor estado hídrico.
  - b. **Olivo:** El estado hídrico y las tasas de intercambio gaseoso de los olivos regados con aguas regeneradas fue mejor que el de los regados con agua de pozo.
  - c. **Cultivos hortícolas:** El rendimiento de los cultivos hortícolas fue, como norma general, mayor en los regados con agua regenerada. Además, presentaron un mejor estado fisiológico cuando fueron regados con aguas regeneradas, ya que tanto su estado hídrico como las tasas de intercambio gaseoso fueron incrementados.
- 2) Las aguas regeneradas representan un **aporte adicional** muy importante de **nutrientes** a los cultivos y un riesgo bajo de salinización de los cultivos y suelos. Pueden llegar a suponer un riesgo de eutrofización cuando son embalsadas.
- 3) Es necesario realizar un **seguimiento** periódico de las características físico-químicas y microbiológicas de las aguas regeneradas tal y como también exige el marco normativo (*RD 1.620/2007*) en una doble vertiente: por su **cumplimiento**; y por la necesidad de realizar **ajustes** frecuentes en los **programas de fertilización**, a fin de optimizar el uso eficiente de fertilizantes y maximizar el desarrollo vegetativo y productivo de los distintos cultivos.
- 4) **Recomendaciones prácticas** en función de los principales aspectos a considerar en los suelos:
  - a. **Salinidad:**

- Evitar la acumulación de sales en el suelo, usando acolchados en los casos que sea factible y aplicando fracciones de lavado cuando la concentración de sales del suelo pueda comprometer el desarrollo de los cultivos.

**b. Sodicidad:**

- Vigilar la aparición de síntomas indicadores de la pérdida de porosidad del suelo. Aquellas situaciones en las que la infiltración del agua sea defectuosa, produciéndose encharcamiento superficial o amplia extensión del área de humectación, pueden ser indicadoras de una pérdida de la estructura del suelo. En estos casos, la aplicación previa de materia orgánica puede ser un factor atenuador. El lavado de sales también tendrá un efecto beneficioso.

**c. Metales pesados:**

- Realizar un seguimiento cada 15 a 20 años, para comprobar las concentraciones de los metales pesados en el suelo.

5) En general se constata que los suelos regados con aguas regeneradas tienen contenidos en materia orgánica más elevados, atribuible a varios factores: el riego favorece la producción de biomasa vegetal, lo que conlleva un incremento en la generación de restos vegetales, que se traduce finalmente en un incremento de materia orgánica del suelo. Además, los sólidos en suspensión constituyen un material particulado, mayoritariamente orgánico, que constituye una **fuentes de materia orgánica** a considerar. Por otra parte, este incremento de materia orgánica en el suelo comporta un aumento del contenido de **nitrógeno orgánico**, asociado al humus del suelo y de la **capacidad de intercambio catiónico**.

6) En base a las experiencias alcanzadas en balsas de regulación, se han obtenido **criterios técnicos y recomendaciones** para el **diseño** de las balsas y **gestión** del agua almacenada:

a. En cuanto al **diseño de futuras balsas**, aquellas construidas con una relación entre superficie y volumen alta y con almacenamiento de agua en profundidades inferiores a los 3,5 metros impiden la estratificación estacional permanente, y por tanto, la aparición de anoxia en el fondo. También benefician la eliminación de una fracción de la carga bacteriana por radiación solar directa (efecto desinfectante de la radiación ultravioleta).

b. Por lo que concierne al tema del **uso y gestión**, el seguimiento y control del agua de entrada procedente de las EDAR's, debido a la importancia del tratamiento en origen, resulta determinante sobre los procesos posteriores de maduración del agua en la balsa. En relación a ello se ha comprobado la gran variabilidad del agua regenerada que llega a las balsas, detectando perturbaciones aisladas que pueden alterar el proceso de maduración.

c. Conveniencia de instalar **tomas flotantes** para la derivación o impulsión del agua, o, todavía mejor, a **distintas profundidades** de las balsas de riego, minimizando la toma directa desde el fondo. La selección avanzada o alternancia de la profundidad de toma del agua de la balsa evita tomar agua de las capas anóxicas y la resuspensión de los sedimentos que se remueven al captar el agua del fondo o por inversión térmica. Estos parámetros de gestión

permiten maximizar la calidad del agua que llega a los cultivos y reducir el desgaste y las obstrucciones del sistema de filtrado de la propia balsa.

- d. Otro parámetro clave para la gestión y uso del agua son los **tiempos de residencia y las tasas de renovación**, ya que tienen una gran incidencia sobre los principales parámetros de calidad del agua. En general se considera positivo tiempos de residencia por encima de 20 días.
  - e. Se recomienda el seguimiento de parámetros básicos de forma continuada como indicador de la calidad del agua:
    - Disco de Secchi, que es un método estandarizado y sencillo para obtener información sobre el nivel de transparencia del agua, que a su vez es un buen indicador de la turbidez, y por tanto, de los sólidos en suspensión y de la concentración de clorofila a.
    - Cuando se obtengan bajos valores de la transparencia, sería recomendable realizar mediciones de parámetros como la DBO<sub>5</sub>, concentración de oxígeno disuelto, sólidos en suspensión y clorofila “a” en diferentes profundidades de la columna de agua; así como la toma de muestras de fitoplancton para descartar la presencia de especies tóxicas en el agua.
    - Igualmente es conveniente llevar a cabo análisis microbiológicos de patógenos que figuran en la legislación, como las concentraciones de *E. Coli* y de otros no regulados pero que son de gran importancia, como los clostridios, por su elevada patogenicidad.
  - f. El uso de **sistemas flotantes** (islas o pequeñas balsas) con una comunidad vegetal cuyas raíces penetran en el agua de la balsa y llevan a cabo un consumo directo de nutrientes ha dado buenos resultados para situaciones con concentraciones excesivas. No obstante las **especies** deben ser **seleccionadas** atendiendo a su floración y polinización. El uso de papiro en “islas flotantes” ha tenido efecto purificador.
- 7) El **agua regenerada** interacciona con los suelos y acuíferos. Estos llevan a cabo un importante papel de filtrado y depuración, **sin** apenas **indicios** que pongan en **riesgo** su “**capacidad de acogida**” y autodepuración, salvo procesos colmatantes eventuales. Estas conclusiones son consecuencia de las observaciones y recopilación de datos de un período de cinco años. No obstante, el efecto sobre estos vectores podría operar en períodos de tiempo superiores, de ahí el estudio del efecto a largo plazo mediante modelización.
- 8) En los estudios de modelización realizados se ha observado dos **procesos** destacados a tener en cuenta:
- a. **Degradación de la materia orgánica.** Su afección sobre el acuífero queda restringida a los acuíferos libres, debido a su rápida degradación. La presencia de **materia orgánica**, junto a una muy baja concentración de nitrato en el agua regenerada, **contribuye a la desnitrificación del acuífero**, ya sea por procesos de dilución o de oxidación.

- b. **Adsorción de metales pesados** procedentes de las aguas regeneradas. A pesar de este proceso de adsorción, no se han detectado procesos ni de persistencia ni de acumulación de metales pesados.

Por otra parte, los resultados han puesto de manifiesto una **leve salinización del acuífero** por la recarga con agua regenerada. El incremento de **ión cloruro** queda dentro del rango común de concentraciones de agua de pozo para todas las zonas de estudio.

- 9) En cuanto a la recarga y la consecuente modificación de la **calidad del agua subterránea**, los resultados del **modelo** predicen una evolución temporal de la composición del acuífero rápida, alcanzándose un **estado pseudoestacionario**. **A partir del quinto año** funciona en régimen permanente, sin experimentar cambios adicionales en el largo plazo sobre los acontecidos en el primer lustro.
- 10) Los resultados obtenidos permiten además **recomendaciones de diseños constructivos** de dispositivos específicos para recarga en zonas regadas con aguas regeneradas: **pozos y sondeos** perforados. Por ejemplo, es recomendable un sellamiento superficial adecuado, empaques de grava de granulometría media a gruesa, tramos filtrantes con filtros de amplia apertura, etc.
- 11) Algunos **parámetros de gestión** permiten incrementar el almacenamiento del agua en los acuíferos, como aplicar mayores **dosis de lavado** en periodos de abundancia de recursos y/o realizar acciones de **recarga inducida** con **excedentes** cuando se cumplan los requerimientos técnicos y legales.
- 12) Desde el punto de vista de los estudios y evaluaciones de impacto ambiental, se han identificado los distintos **posibles impactos del riego con agua regenerada**, en relación con el medio geológico, la tasa de recarga (natural e intencional), la calidad del agua de riego, procesos de mezcla de aguas, etc. Estos se han agrupado en **tablas específicas** que pueden ser consultadas.
- 13) El uso de **aguas regeneradas** para **riego** está potenciando **sinergias favorables en las Comunidades de Regantes**, fomentando las inversiones por parte de las Administraciones y particulares (al tener una mayor garantía de suministro de agua) e incorporando nuevos elementos a los esquemas de gestión hídrica convencionales.

Tras cinco años de experimentos realizados en el marco de este proyecto, los resultados han demostrado que la (re)utilización de aguas residuales regeneradas para el riego no ha provocado alteraciones significativas ni en los cultivos, ni en el suelo, ni en los acuíferos.



Próxima versión resumida y adaptada de esta publicación:

**EL REGADÍO CON AGUAS REGENERADAS.  
EFECTOS SOBRE SUELOS, ACUÍFEROS Y CULTIVOS.**

**GUÍA PARA PROFESIONALES Y USUARIOS FINALES**





Esta publicación surge como resultado del proyecto de I+D+i EARSAC (Efecto del regadío con aguas regeneradas sobre los suelos, acuíferos y cultivos) desarrollado, coordinado y financiado por el Grupo Tragsa en cinco zonas piloto en Islas Baleares.

El proyecto se enmarca en la línea estratégica de I+D+i de gestión hídrica y calidad de las aguas, arrojando luz sobre las posibilidades de utilizar aguas regeneradas para el riego. Esta publicación resume los principales resultados del proyecto.



GrupoTragsa

Octubre, 2019