EL REGADÍO CON AGUAS REGENERADAS. EFECTOS SOBRE SUELOS, ACUÍFEROS Y CULTIVOS

GUÍA PARA PROFESIONALES Y USUARIOS FINALES

Tragsa
GrupoTragsa

EARSAC

EL REGADÍO CON AGUAS REGENERADAS. EFECTOS SOBRE SUELOS, ACUÍFEROS Y CULTIVOS.
GUÍA PARA PROFESIONALES Y USUARIOS FINALES.

Grupo Tragsa, Febrero de 2020.
Publicación multiautor
Edita: Grupo Tragsa. C/ Maldonado 58, 28006, Madrid
Tf. +34 91 3226000
ISBN: 978-84-09-18697-6
Depósito legal: Exento (publicación digital)
Distribución digital: http://www.tragsa.es / http://www.dina-mar.es
Contacto editor: imasd@tragsa.es
Diseño portada: Jon San Sebastián (Tragsatec)

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

EQUIPO REDACTOR

Grupo Tragsa:
Enrique Fernández Escalante (Dr. en Hidrogeología, Tragsa, coordinador)
Sergi Mulet Aloras (Ing. Agrónomo, Tragsa)
Rodrigo Calero Gil (Ing. Agrónomo, Tragsa)
Luis Antonio Galán Benzal (Ing. Industrial, Tragsa)

Universidad de las Islas Baleares, Departamento de Biología:
Jaume Solivellas Prats (Ecólogo)
Gabriel Moyà Niell (Dr. en Ecología)
Jaume Vadell Adrover (Dr. en Biología)

CEBAS-CSIC:
Emilio Nicolás Nicolás (Dr. Ing. Agrónomo)
Pedro Nortes Tortosa (Dr. Ing. Agrónomo)

Amphos 21:
Diego Sampietro Lardíes (Hidrogeólogo)
Jorge Molinero Huguet (Dr. en Hidrogeología).

PRÓLOGO

Esta publicación ha surgido como un segundo 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 desde 2011 en cinco zonas piloto de las Islas Baleares: *Santa Maria del Cami*, *Inca*, *Ariany* y *Consell* en Mallorca y *Es Mercadal* en Menorca. Está especialmente enfocada a profesionales y usuarios finales de las aguas regeneradas para la agricultura.

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, evaluando la garantía de seguridad alimentaria y los impactos indirectos y diferidos en distintos factores del medio.

Además de los resultados estudiados sobre el impacto que provoca el riego con agua regenerada sobre los cultivos, suelos y acuíferos, se han introducido recomendaciones prácticas para la conexión con las redes de riego.

La publicación resume algunos de los resultados del proyecto con carácter eminentemente pragmático.

El Grupo Tragsa agradece la intervención y ayuda del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPAMA) del Gobierno de España, y en el ámbito Balear, de la *Conselleria de Medi Ambient, Agricultura i Pesca*, la *Conselleria de Salut*, del *Institut Biotecnològic de les Illes Balears* (IBIB) y de las Comunidades de Regantes de las respectivas zonas regables, así como a los autores y colaboradores participantes.

La publicación ha sido desarrollada a través de la Subdirección de Innovación y Desarrollo de Servicios del Grupo Tragsa, en plena coordinación con la Gerencia de Zona de las Islas Baleares.

EL REGADÍO CON AGUAS REGENERADAS. EFECTOS SOBRE SUELOS, ACUÍFEROS Y CULTIVOS.
GUÍA PARA PROFESIONALES Y USUARIOS FINALES.

Estudio de la viabilidad agronómica de las aguas regeneradas en las Islas Baleares.

EL REGADÍO CON AGUAS REGENERADAS. EFECTOS SOBRE SUELOS, ACUÍFEROS Y CULTIVOS.

GUÍA PARA PROFESIONALES Y USUARIOS FINALES.

INDICE GENERAL

1- ESTUDIO DE LA VIABILIDAD AGRONÓMICA DE LAS AGUAS REGENERADAS EN MALLORCA (ISLAS BALEARES).
2- EFECTO SOBRE LOS CULTIVOS
3- EFECTO SOBRE LOS SUELOS
4- BALSAS DE REGULACIÓN
5- EFECTO SOBRE LOS ACUÍFEROS
6- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
7- BIBLIOGRAFÍA

ÍNDICE

1 **EL REGADÍO CON AGUAS REGENERADAS EN LAS ISLAS BALEARES** 1
1.1 ANTECEDENTES. LA REUTILIZACIÓN DE LAS AGUAS 1
1.2 LA AGRICULTURA EN LES ILLES BALEARS. CONTEXTO DE LA ACTUACIÓN 1
1.2.1 Situación de la reutilización en les *Illes Balears* 2
1.2.2 Futuro de la agricultura y la reutilización en les *Illes Balears* 3
1.3 METODOLOGÍA 5

2 **ESTUDIOS AGRONÓMICOS DE REUTILIZACIÓN DE AGUAS REGENERADAS EN LA AGRICULTURA DE LAS ISLAS BALEARES** 7
2.1 PARCELAS ACONDICIONADAS PARA LA I+D+I CON AGUAS REGENERADAS 7
2.1.1 METODOLOGÍA Y PROTOCOLOS A REALIZAR EN LAS PARCELAS PILOTO 9
2.2 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DE REUTILIZACIÓN DE AGUAS REGENERADAS EN MALLORCA 16
2.2.1 RECOMENDACIONES 17

3 **INCIDENCIA DEL RIEGO CON AGUAS REGENERADAS EN EL SUELO** 19
3.1 INTRODUCCIÓN 19
3.2 METODOLOGÍA, CONDICIONES AMBIENTALES Y SU CARACTERIZACIÓN 19
3.2.1 CARACTERIZACIÓN EDÁFICA 19
3.3 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DEL SUELO 21
3.3.1 SALINIDAD DEL SUELO 21
3.3.2 FRACCIÓN DE LAVADO 21
3.3.3 SODICIDAD Y DISPERSIÓN DE ARCILLAS Y DE LOS AGREGADOS DEL SUELO 22
3.3.4 ACUMULACIÓN DE METALES PESADOS EN EL SUELO 23
3.3.5 CONTAMINANTES EMERGENTES 23
3.3.6 ORGANISMOS PATÓGENOS EN EL SUELO 24
3.4 CONCLUSIONES. EFECTO DEL RIEGO CON AGUAS REGENERADAS SOBRE LA FERTILIDAD DEL SUELO 24

4 **LAS BALSAS DE RIEGO COMO ELEMENTO DE REGULACIÓN** 27
4.1 INTRODUCCIÓN 27
4.2 ESTUDIO DE LA BALSA COMO ELEMENTO DEPURADOR 27

4.3 EVOLUCIÓN DEL AGUA DE LA BALSA EN EL ESPACIO Y EN EL TIEMPO....28
4.4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES....31

5 **EFECTO DEL REGADÍO CON AGUAS REGENERADAS SOBRE LOS ACUÍFEROS**....33
5.1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS....33
5.2 CONTEXTO....33
5.3 OBJETIVOS....34
5.4 METODOLOGÍA....34
5.4.1 CARACTERIZACIÓN INICIAL PARA EL ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LAS AGUAS REGENERADAS EN LOS ACUÍFEROS....35
5.4.2 CAPACIDAD DE AUTODEPURACIÓN DEL TERRENO....35
5.4.3 MODELIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA....36
5.5 RESULTADOS. DISTRIBUCIÓN Y EVOLUCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN....38
5.5.1 RESULTADO DE LA MODELACIÓN....38
5.6 CONCLUSIONES....40
5.7 RECOMENDACIONES PRÁCTICAS....42
5.7.1 MEZCLA DE LAS AGUAS REGENERADAS CON AGUAS PROCEDENTES DE OTRAS FUENTES....42
5.7.2 DISEÑO DE POZOS JUNTO A BALSAS DE REGULACIÓN COMO ELEMENTO DE SEGURIDAD Y RECARGA GESTIONADA "DE OPORTUNIDAD"....42
5.7.3 POSIBILIDADES DE RECARGA GESTIONADA DE EXCEDENTES CON DISTINTOS DISPOSITIVOS....43
5.7.4 HUMEDALES ARTIFICIALES COMO ELEMENTO ASOCIADO A ZONAS REGADAS CON AGUAS REGENERADAS....45

6 **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**....46

7 **BIBLIOGRAFÍA**....50
7.1 ACCESOS WEB....51

1 EL REGADÍO CON AGUAS REGENERADAS EN LAS ISLAS BALEARES

1.1 ANTECEDENTES. LA REUTILIZACIÓN DE LAS AGUAS

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^3, 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 actual de agua se distribuye en diferentes sectores (urbano, agrícola, industrial, refrigeración, recreativo, etc.), siendo la demanda de la agricultura 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. En estas condiciones, y sobre todo en las regiones con situación de déficit hídrico estructural, como es la Cuenca Mediterránea, el uso del agua regenerada en la agricultura adquiere una gran relevancia, al estar alineada con la gestión eficiente de los recursos hídricos.

Según Iglesias (2009), en nuestro país se regeneraban y reutilizaban aproximadamente 368,2 hm^3/año, siendo el uso mayoritario el agrícola, con unos 261,4 hm^3/año, lo que representa aproximadamente el 70,9% del total. Este uso agrícola tiene especial relevancia en las Cuencas del Segura y Júcar, con un 98 % del volumen total del agua reutilizada destinada a este uso (103,00 y 97,62 hm^3/año de aguas regeneradas en las Cuencas del Segura y Júcar respectivamente).

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

El sector primario ha ido perdiendo peso progresivamente en la economía balear regional, de modo que, actualmente, aporta cerca del 1,5% del total. La progresiva

reducción del sector también se refleja en sus indicadores laborales, con una reducción progresiva de agricultores. Ambos hechos han incidido de forma muy negativa en el desarrollo de la agricultura, sobre todo la de regadío.

El regadío es un elemento clave en la agricultura mediterránea. La disponibilidad de agua decreciente y su encarecimiento han provocado un abandono progresivo y creciente del sector agrícola, poniendo en peligro su sostenibilidad. Hay que subrayar que en los 10 últimos años la Superficie Agraria Útil (SAU) en *les Illes Balears* se ha visto reducida en casi 32.000 hectáreas (Figura 1).

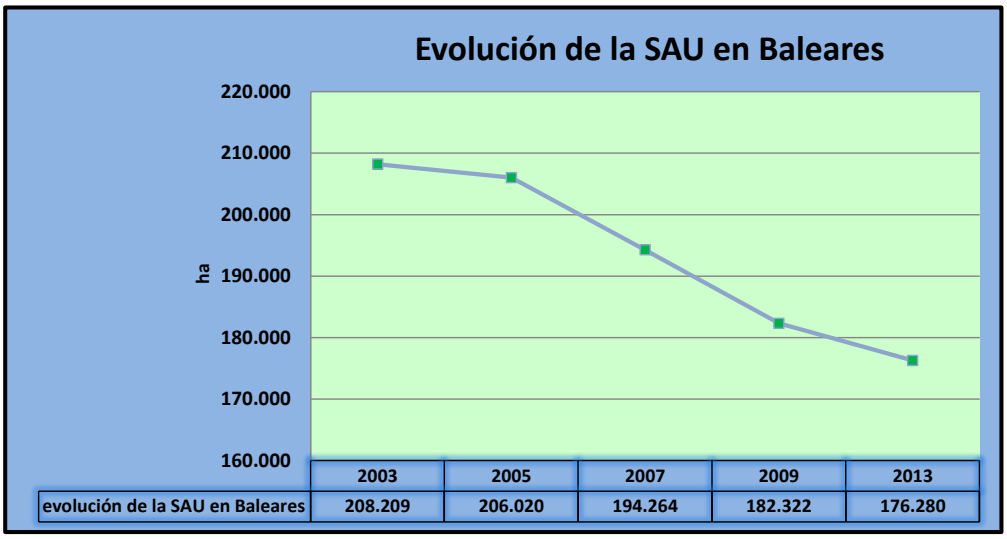


Figura 1. Evolución de la Superficie Agraria Útil (SAU) en *les Illes Balears*.

Las razones que han provocado este descenso han sido, por un lado, la mayor competencia por acceder al suelo y al agua, ante la creciente presión urbana, residencial y turística; y por otro, la mayor rentabilidad del abastecimiento urbano o industrial al uso agrícola y agroindustrial, entre otras.

1.2.1 Situación de la reutilización en les *Illes Balears*

En *les Illes Balears* los recursos hídricos se han estimado en torno a 612,88 hm^3/año. De ellos, 189,34 hm^3/año son movilizables en periodos de pluviometría normal, con una importante disminución durante las sequías.

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

	Superficiales		Subterráneos		Totales	
	Potenciales	Disponibles	Potenciales	Extraído	Potenciales	Disponibles / Extraidos
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
Balears	**121,00**	**7,20**	**491,98**	**182,14**	**612,88**	**189,34**

La capacidad de depuración de aguas residuales sobrepasa los 100 hm^3 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^3, destinados principalmente a la agricultura (Santarrufina, 2007).

La explotación de los acuíferos de algunos sectores del litoral mediterráneo se ha traducido en situaciones cercanas a la "sobreexplotación". Este hecho ha motivado procesos de intrusión marina, con la salinización incipiente de algunos acuíferos baleares, como es el caso de Campos y del *Pla de Sant Jordi*, en Mallorca, o para la práctica totalidad de los de Ibiza.

En Mallorca, la salinización de acuíferos ya provocó una serie de actuaciones para contrarrestar este impacto desde 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^3.

Aquí es muy importante destacar que el efecto ha sido completamente positivo, puesto que se ha observado una tendencia clara a la recuperación de los niveles del agua y un apreciable descenso del contenido de sal en las aguas subterráneas, así como un cierto retroceso de la intrusión marina. También indicar que no se ha producido ninguna alteración destacable en el suelo agrícola, salvo un ligero aumento del contenido en materia orgánica, lo que agrega un efecto beneficioso para determinados suelos.

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

Según datos recogidos en el Plan Hidrológico de *les Illes Balears* (2013), en el año 2011 se utilizaban para riego 24,5 hm^3 procedentes de Estaciones Depuradoras y estaba en proyecto el aprovechamiento de 11,5 hm^3 adicionales.

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".

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 de Régimen Especial de *les Illes Balears* 30/1998. 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 con acciones para solucionar ciertos problemas que afectaban al archipiélago balear relacionados con el consumo de agua.

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

El Plan Nacional de Regadíos, Horizonte 2008, aprobado el 23 de diciembre de 2002, incluía en su articulado una superficie de 2.250 ha destinadas a regadíos con aguas regeneradas en *les Illes Balears*.

La Figura 2 recopila las actuaciones ya operativas declaradas de *interés general* que aprovechan el agua regenerada de las plantas depuradoras y balsas de almacenamiento para riego.

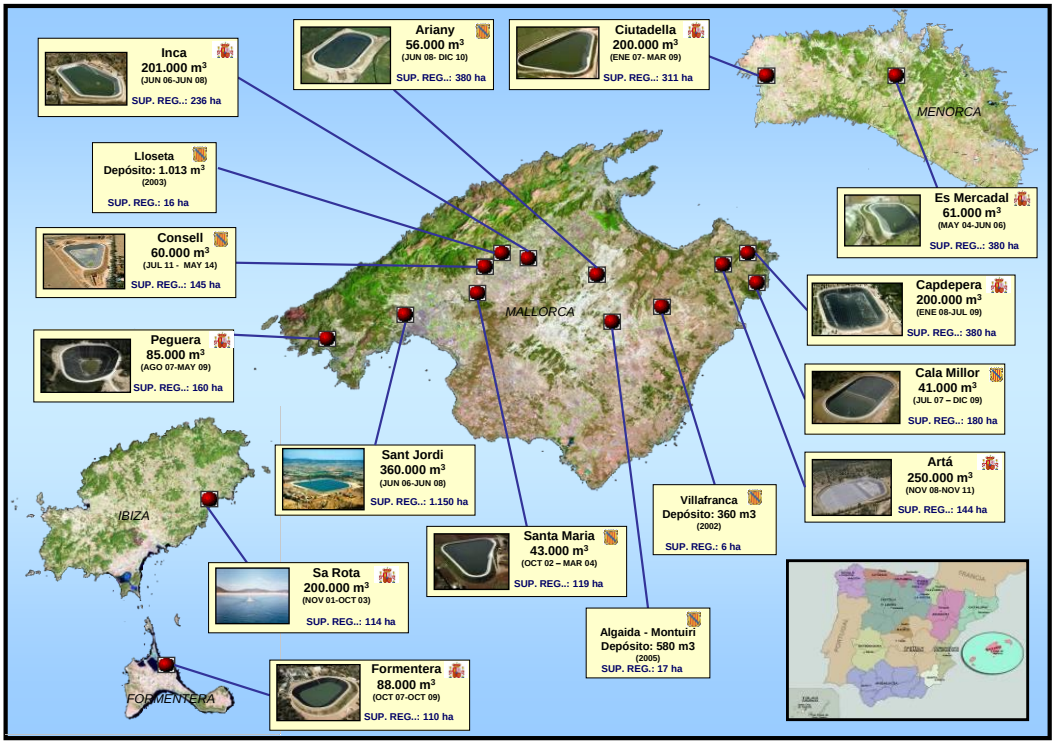


Figura 2. Actuaciones finalizadas que aprovechan el agua regenerada para riego.

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 regeneradas* en España.

Sin embargo, a pesar de cumplir con la normativa vigente, se ha observado que es necesario concienciar a los usuarios finales de las bondades de la reutilización, al haberse detectado una cierta resistencia al cambio por parte de los agricultores. Para ello se ha considerado que una de las opciones más serias era la ejecución de estudios prácticos basados en un sustrato científico sólido.

1.3 METODOLOGÍA

El proyecto fue dividido en cinco líneas de trabajo, cada una con una metodología específica:

Para estudiar los efectos que tiene la utilización de las aguas regeneradas sobre la fisiología de la **PLANTA**, la producción y la calidad de la cosecha, se han establecido diferentes parcelas piloto con diferentes especies: cultivos leñosos de vid, olivos jóvenes y cultivos hortícolas, sometidos a distintos tratamientos. Se han realizado medidas periódicas de los parámetros de control de la situación hídrica de la planta, niveles de intercambio gaseoso en sus hojas (=foliar), medidas de crecimiento vegetativo y crecimiento del fruto para los distintos tratamientos. Asimismo, se han practicado análisis foliares para evaluar el estado nutricional de la planta.

El estudio y evaluación de la incidencia sobre el **SUELO** del riego con aguas residuales depuradas (=regeneradas) se ha hecho caracterizando los suelos antes del riego y estudiando su evolución, mediante la toma de muestras y su análisis en laboratorio. En cada caso se ha determinado el índice de estabilidad estructural, salinidad y pH conforme a métodos oficiales.

El estudio de la evolución de la calidad del agua de riego almacenado en las **BALSAS DE REGULACIÓN** se ha realizado mediante muestreos periódicos en varios perfiles verticales. La toma de muestras se llevó a cabo con barca neumática, y las pruebas en laboratorio fueron de detalle, incluyendo análisis de nutrientes y metales. Además, se ha estudiado la evolución de la calidad del agua antes de la entrada en la balsa regulación, en la propia balsa, a la salida y en el hidrante o boca de riego.

Para el estudio del efecto del riego en los **ACUÍFEROS** se ha ampliado y mejorado la información de piezometría y calidad de las aguas ya disponible. Se han analizado las aguas subterráneas en, al menos, tres pozos de cada sector en cada circuito de interacción desde “aguas arriba”, donde no hay regadío, hacia abajo, según el flujo de las aguas subterráneas y a través del subsuelo de las zonas regables.

La quinta línea integra las cuatro precedentes, con objeto de obtener conclusiones y recomendaciones integradas y enfocadas a la gestión.

2- EFECTO SOBRE LOS CULTIVOS

EFECTOS DE LA UTILIZACIÓN DE AGUAS REGENERADAS EN CULTIVOS HORTÍCOLAS Y FRUTALES EN MALLORCA (ISLAS BALEARES)

2 ESTUDIOS AGRONÓMICOS DE REUTILIZACIÓN DE AGUAS REGENERADAS EN LA AGRICULTURA DE LAS ISLAS BALEARES

Los estudios se han realizado para las zonas y cultivos siguientes:

2.1 PARCELAS ACONDICIONADAS PARA LA I+D+I CON AGUAS REGENERADAS

Zona de Inca

Pruebas en terrenos de cultivos colindantes a la EDAR de Inca, en una zona regable de 255 ha, con más del 90% del terreno con opción a regar con agua de la EDAR.

Los sistemas de riego usados han sido 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.

En *Son Catiu* (Inca), se seleccionó una “parcela piloto” de la variedad Picual de tres años de edad en 2011 (Figura 3), en la que se dispusieron 5 filas que se regaron con agua de pozo. Otros olivos se regaron con aguas regeneradas procedentes de la EDAR a través de la toma de la parcela.

Figura 3. Detalle de la parcela de olivos jóvenes de la variedad ‘Picual’ (2011).

Muy cerca de la parcela anterior de *Son Catiu* (Inca), se han realizado experiencias en una “parcela piloto” para la plantación de hortícolas como sandía usando agua regenerada y subterránea procedente de un pozo en la misma parcela (Figura 4).

Figura 4. Imagen de la parcela de cultivo de sandía.

Zona de *Santa Maria del Camí*

Riego en ambos márgenes de la carretera de Inca en los terrenos cercanos a la depuradora. La superficie regada es de unas 119 ha, en 92 fincas y 57 regantes. Riego sobre vides adultas para vinificación propiedad de la “Bodega Angel”, variedad *Cabernet Sauvignon*, y la autóctona *Prensal Blanc*, regadas con agua regenerada y de pozo.

Zona de *Maria de la Salut-Ariany*

La zona agrícola en los términos municipales de María de la Salut, Sineu y *Ariany*, con fincas muy parceladas, y una superficie total de 160 ha. 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. Los cultivos existentes en la zona son mayoritariamente forrajeros, cereal, almendro, hortícolas y, testimonialmente, parcelas de cítricos y frutales.

La ‘parcela piloto’ fue dotada de cultivos hortícolas: tomate, pimiento, melón y pepino, regados con agua regenerada y de pozo (Figura 5). En 2012 se regó sin realizar ninguna práctica de abonado, y en 2013 se realizó una aplicación de fertilizantes, ajustando las dosis para cubrir el programa de fertirriego mejor para cada cultivo.

Figura 5. Imagen de la parcela piloto en *Ariany*.

Zona de *Consell*

Hay una cuarta zona en Consell con árboles frutales, actualmente en observación.

Tabla 2. Parcelas de estudio, cultivos ensayados y tipo de agua aplicado.

ZONA	CULTIVO	TIPO DE AGUA
Zona de Inca	Olivos Picual	Agua de pozo y regenerada
	Hortícolas (sandía)	Agua de pozo y regenerada
Santa Maria del Camí	Vid	Agua de pozo y regenerada
Maria de la Salut-Ariany	Hortícolas (tomate, pimiento, melón y pepino)	Agua de pozo y regenerada
Consell	Albaricoquero	Agua de pozo y regenerada
	Olivos Picual	Agua de pozo y regenerada

*La ubicación de las plantas se ha presentado en la figura 2.

2.2 METODOLOGÍA Y PROTOCOLOS A REALIZAR EN LAS PARCELAS PILOTO

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 (*Maria de la Salut-Ariany*, Inca y *Santa Maria del Camí*).

Los protocolos realizados en las 'parcelas piloto' consistieron en el ensayo, cada año, de un tratamiento de riego para cada calidad de agua, satisfaciendo los requerimientos hídricos del cultivo (100% ETc). La programación del riego fue semanal a partir de los cálculos de evapotranspiración de referencia (ET_0).

Durante toda la duración del proyecto se analizó la calidad agronómica del efluente de aguas regeneradas procedentes de la EDAR, mediante medidas físico-químicas y microbiológicas periódicas, ajustando los resultados a las necesidades de abonado de los cultivos.

Asimismo, 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). Además, se realizaron análisis foliares, y en cultivos hortícolas, se evaluó la producción total en las plantas seleccionadas sometidas a cada tratamiento.

2.2.1 TIPO DE AGUA

Los parámetros de calidad evaluados y la frecuencia de muestreo se ajustaron al *Real Decreto 1620/2007*, que regula además el origen y usos previos del agua regenerada, su destino final y su modo de empleo. La Tabla 3 expone los criterios de calidad para la reutilización de las aguas según su uso.

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, estando el riego de hortícolas encuadrado en la categoría CALIDAD 2.1 y el de frutales en CALIDAD 2.3 del Real Decreto.

En la Zona de **Inca**, el valor medio de los diferentes años mostró niveles de pH y conductividad eléctrica (CE) muy similares tanto en el agua de pozo como en el agua procedente de la EDAR. La turbidez se encontraba por debajo del límite establecido. Cabe destacar el alto contenido en potasio de las aguas regeneradas, en torno a 30 ppm (frente a unos 5 ppm de las aguas de pozo), dosis sobradas para cubrir las necesidades de este elemento durante su ciclo de desarrollo. En cuanto al calcio, las aguas regeneradas presentaron concentraciones en torno a 60 ppm, en torno a la mitad de las aguas de pozo. Igualmente, 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 cercanos a 30 ppm frente a las bajas concentraciones presentes en las aguas regeneradas. Los fosfatos aparecieron en abundancia en el agua regenerada, con valores medios de unos 4 ppm durante cinco años. Esta concentración supone un riesgo de eutrofización de las aguas al ser embalsadas, pero también un importante aporte nutricional para los cultivos.

En la zona de **Santa Maria del Camí**, el pH mostró niveles similares entre las dos fuentes de agua. En cuanto a la conductividad, las aguas de pozo registraron niveles medios inferiores o cercanos 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 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), y valores inferiores en los tres años siguientes. La concentración de potasio fue análoga a la registrada en Inca, pero la de calcio fue inversa, con aguas más duras que las procedentes de pozo. Los niveles de magnesio de las aguas regeneradas fueron bastante similares en ambas fuentes de agua. Los nitratos y fosfatos registraron tendencias paralelas a las registradas en la estación previa.

Tabla 3. Valores máximos admisibles establecidos en el RD 1620/2007.

USO DEL AGUA PREVISTO	VALOR MÁXIMO ADMISIBLE (VMA)				OTROS
	NEMATODOS INSTESTINALES	E. COLI	SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN	TURBIDEZ	
USOS AGRÍCOLAS					
CALIDAD 2.1 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. *Legionella spp*.: 1000 UFC/L: (si existe riegos de aerosolización)
CALIDAD 2.2 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. b) Riego de pastos para consumo de animales productores de leche o carne. 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. *Taenia saginata* y *Taenia solium*: 1 huevo/L (si se riegan pastos para consumo de animales productores de carne)
CALIDAD 2.3 a) Riego localizado de cultivos leñosos que impida el contacto del agua regenerada con los frutos consumidos en la alimentación humana. b) Riego de cultivo de flores ornamentales, viveros, invernaderos sin contacto directo del agua regenerada con las producciones, 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

En la Zona de **Maria de la Salut-Ariany**, el pH medido fue significativamente superior en el agua regenerada (hasta 9,0), frente al del agua de pozo (7,4) en 2012. La turbidez de ambas fuentes fue baja. El potasio en línea con los previos, con concentraciones cercanas a 40 ppm frente a 10 ppm de las aguas de pozo. El calcio presentó niveles mayores en aguas regeneradas que en las de pozo, con niveles medios de más de 130 ppm. Los valores de magnesio también fueron 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. Los niveles de fosfatos no fueron relevantes, con valores medios cercanos a 7 ppm durante los 5 años de ensayos.

Finalmente, la Zona de **Consell** ha registrado valores medios de pH y CE 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 (aunque importantes) de potasio (13 ppm). Los fosfatos también constituyen una fuente nutritiva importante para los cultivos, pero un riesgo de eutrofización elevado cuando estas aguas regeneradas sean embalsadas.

2.2.2 CULTIVOS

Las mediciones periódicas para determinar el estado hídrico y producción de los cultivos fueron el potencial hídrico de tallo y los niveles de intercambio gaseoso en las hojas (fotosíntesis y conductancia en sus estomas). A continuación se describen las acciones en cultivos leñosos y en los hortícolas en las distintas zonas.

CULTIVOS LEÑOSOS

En cuanto a las medidas del **estado hídrico de la planta**, las plantas regadas con agua regenerada presentaron mejor estado hídrico al de las plantas regadas con aguas de pozo.

Los niveles de **intercambio gaseoso** mostraron diferencias significativas en el último año de medidas exclusivamente. La evolución del estado nutricional del cultivo tuvo niveles normales de casi todos los nutrientes foliares (potasio y fósforo). En cuanto a los micronutrientes, el boro ha estado siempre por debajo del umbral de suficiencia, fijado en 20 ppm en las plantas para ambas fuentes de agua.

Los niveles de calcio (Ca), potasio (K), cinc (Zn) y manganeso (Mn) foliar siempre fueron superiores en los olivos regados con agua regenerada.

Vid

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. Por el contrario, las vides de la variedad autóctona *'Prensal Blanc'* presentaron un mejor estado hídrico cuando fueron regadas con agua de pozo.

Los niveles de **intercambio gaseoso** mostraron un patrón de comportamiento muy similar al estado hídrico. En cuanto a la **influencia del tipo de agua** en los constituyentes foliares, ambas variedades mostraron mayores niveles foliares de nitrógeno, calcio, magnesio y micronutrientes y menores en fósforo y potasio en las plantas regadas con agua regenerada. Con respecto al **estado nutricional**, no se

alcanzaron los niveles normales en P, K, Mg y Zn foliar en las vides regadas con ambas fuentes de agua.

HORTÍCOLAS

Sandía

Los niveles de **intercambio gaseoso** en las plantas de sandía regadas con agua regenerada presentaron un mejor comportamiento fisiológico que las regadas con agua de pozo.

Respecto a la evolución del **estado nutricional**, los niveles de los macroelementos nitrógeno-fósforo-potasio (N-P-K) se situaron por debajo de sus umbrales de suficiencia, mientras que los niveles de calcio excedieron su rango normal. El magnesio (Mg) y el resto de microelementos estuvieron dentro del rango foliar de suficiencia. Hay que destacar que el contenido foliar de bioelementos fue superior en las plantas regadas con agua regenerada, a excepción del K y del Mn, cuyos niveles foliares fueron ligeramente inferiores en este tipo de agua.

Respecto al **rendimiento del cultivo**, la producción regando con agua regenerada se incrementó de manera importante, situándose en un 12% más con respecto al cultivo regado con agua de pozo, debido a la mayor actividad fisiológica de las plantas regadas con esta fuente de agua.

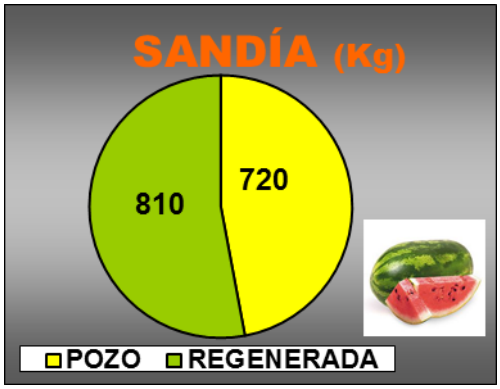


Figura 6. Producción de sandía regada con ambas fuentes de agua (200 plantas).

Pimiento

En **estado hídrico** de las plantas de pimiento regadas con aguas regeneradas fue superior con respecto al tratamiento regado con agua de pozo, si bien los niveles de intercambio gaseoso fueron significativamente inferiores

Respecto al análisis del **estado nutricional**, los niveles de N foliar en plantas regadas con aguas regeneradas fueron mayores, a pesar de que los nitratos de estas aguas eran menores que en las aguas de pozo. En cambio, los niveles foliares de P fueron superiores. 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. Los niveles de calcio y

magnesio se encontraron en el rango normal de concentración. Se registraron deficiencias en hierro (Fe) y cinc (Zn).

La **producción** en el cultivo del pimiento regado con agua regenerada experimentó la mayor bajada de todos los cultivos, cerca de un -20% respecto al cultivo regado con agua de pozo. El agua regenerada había bloqueado la asimilación de elementos por la planta, y por tanto, afectó al rendimiento (Figura 7).

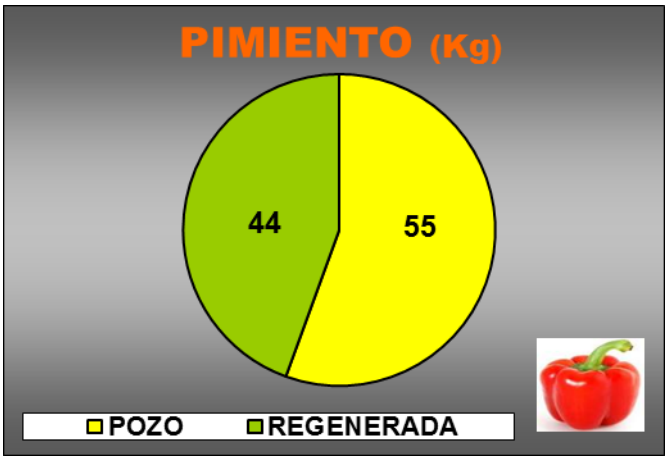


Figura 7. Producción de pimiento regado con ambas fuentes de agua (40 plantas).

Tomate

El **estado hídrico** de las plantas de tomate regadas con aguas regeneradas fue superior con respecto al tratamiento regado con agua de pozo.

Los niveles de **intercambio gaseoso** no tuvieron diferencias significativas, excepto para los niveles de fotosíntesis neta, que subieron significativamente. Este hecho parece indicar una mejor adaptación de estas plantas al riego con agua regenerada, una vez que el cultivo se encuentra en una fase de crecimiento más avanzada.

En cuanto a su **estado nutricional**, los niveles de N foliar en plantas regadas con aguas regeneradas fueron mayores, a pesar de que estas aguas contienen menores concentraciones de nitratos con respecto a las aguas de pozo. Igual comportamiento registraron, a nivel foliar, el potasio, el calcio y el fósforo, siempre por encima del umbral de suficiencia. Los niveles de micronutrientes indicaron niveles de suficiencia para todos ellos, excepto para el Cu foliar, situado bajo el umbral de suficiencia (50 ppm). 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.

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 (Figura 8).

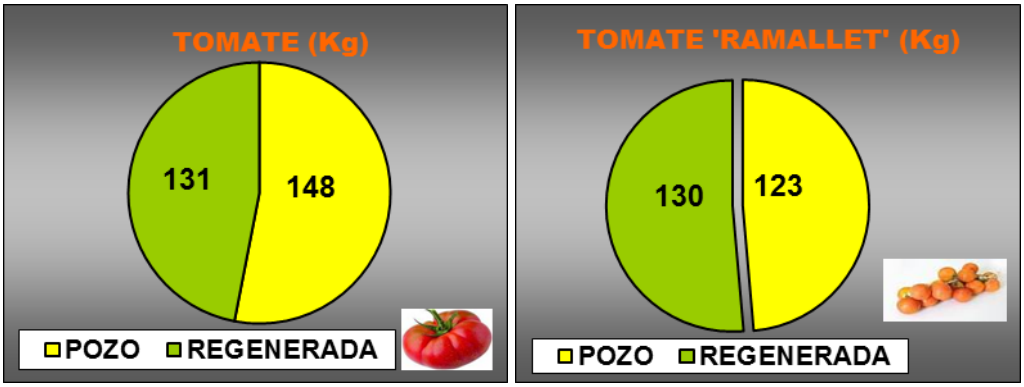


Figura 8. Producción del cultivo de tomate en ambas variedades regado con ambas fuentes de agua (40 plantas).

Pepino

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, indicando un comportamiento similar a nivel fisiológico en las plantas en ambos tipos de aguas.

Respecto al **análisis del estado nutricional**, las plantas de pepino presentaron menores niveles de N cuando fueron regadas con agua regenerada. Los niveles foliares de P en ambas fuentes de agua fueron muy parecidos. En cuanto al potasio foliar, las plantas regadas con aguas regeneradas presentaron menores niveles de este elemento que las regadas con aguas de pozo, aun así se situaron por debajo del 4%. 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.

La **producción en el cultivo** del pepino regado con agua regenerada también experimentó una importante bajada de rendimiento (Figura 9), siendo ésta un 15% menor respecto al cultivo regado con agua de pozo. Una posibilidad es la alta sensibilidad de estas plantas a la absorción de nutrientes procedentes de las aguas regeneradas a pH muy alcalinos, como el del agua regenerada (alrededor de nueve) o también a la falta de N en las fases iniciales de su desarrollo.

Melón

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.

En cuanto a su **análisis del estado nutricional**, las plantas de melón presentaron niveles de nitrógeno foliar similares y normales con ambos tipos de agua. Los niveles de P en ambas fuentes de agua fueron muy parecidos, quedando por debajo del nivel de suficiencia (0,3%), con ambos tipos de agua. En cuanto al potasio foliar, tuvo niveles bajos por debajo del 4% en ambos casos. Las concentraciones de calcio y magnesio estuvieron en rango normal. Los micronutrientes indicaron niveles de

suficiencia en todos ellos, siendo mayores en las plantas regadas con aguas regeneradas.

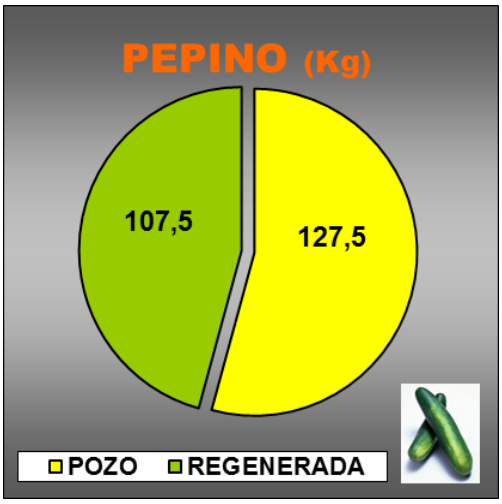


Figura 9. Producción de pepino regado con ambas fuentes de agua (80 plantas).

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 (Figura 10). Las causas de este incremento también son similares a las del cultivo del pepino.

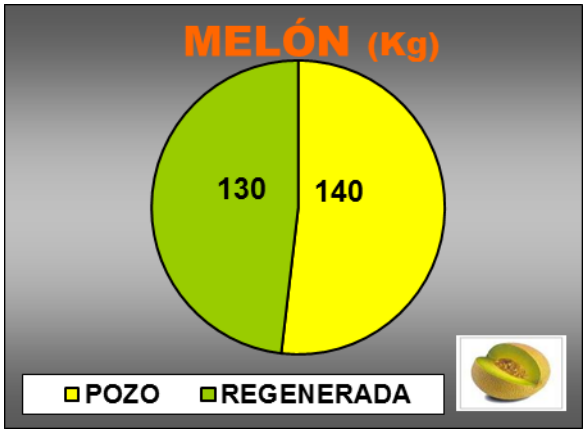


Figura 10. Producción de melón regado con ambas fuentes de agua (80 plantas).

La incidencia de enfermedades como el 'oídio', fue menor en las plantas regadas con aguas regeneradas.

2.3 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DE REUTILIZACIÓN DE AGUAS REGENERADAS EN MALLORCA

1) En 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.

2) 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.

3) El estado hídrico de los olivos regados con aguas regeneradas fue mejor que el de los regados con agua de pozo, así como las tasas de intercambio gaseoso.

4) Los cultivos hortícolas regados con aguas regeneradas presentaron un mejor estado fisiológico, tanto por su estado hídrico como por su intercambio gaseoso. El pepino mostró un comportamiento similar ante ambas fuentes de agua.

5) El rendimiento de los cultivos hortícolas fue, en 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 un 35,8% en el caso de agua regenerada. El pepino, sin aplicar fertilizantes adicionales, 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, el pepino y melón redujeron ligeramente la producción bajo esta fuente de agua sin aporte extra de fertilizantes.

2.3.1 RECOMENDACIONES

1) Las aguas regeneradas representan un aporte adicional muy importante de nutrientes a las plantas 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 para cada cultivo y correcciones de pH de las aguas de riego en algunas fases del ciclo del cultivo.

3) Se recomienda realizar un seguimiento periódico de las características físico-químicas y microbiológicas de las aguas regeneradas, tal y como exige el marco normativo (RD 1620/2007), tanto por su cumplimiento, como por la necesidad de realizar ajustes frecuentes en los programas de fertilización y maximizar el desarrollo vegetativo y productivo de los distintos cultivos.

3- EFECTO SOBRE LOS SUELOS

3 INCIDENCIA DEL RIEGO CON AGUAS REGENERADAS EN EL SUELO

3.1 INTRODUCCIÓN

Los efectos del riego sobre el suelo dependen 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.

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, etc.

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 su aptitud agrícola, su adecuación a las exigencias del riego.

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. 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 algunos elementos minerales necesarios para el crecimiento vegetal, al mismo tiempo que facilita la disponibilidad de calcio y magnesio para las plantas, y limitan la incorporación de sodio a través del agua de riego.

El sodio es un elemento asociado a la salinidad de las aguas de riego. Se presenta en concentraciones mayores en las aguas residuales y regeneradas que en las de suministro urbano. Este elemento tiene un efecto dispersante sobre el suelo, que puede afectar a la estabilidad de sus agregados.

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 los metales pesados, su movilidad se traduce en un riesgo de que se incorporen a la cadena trófica proporcionalmente.

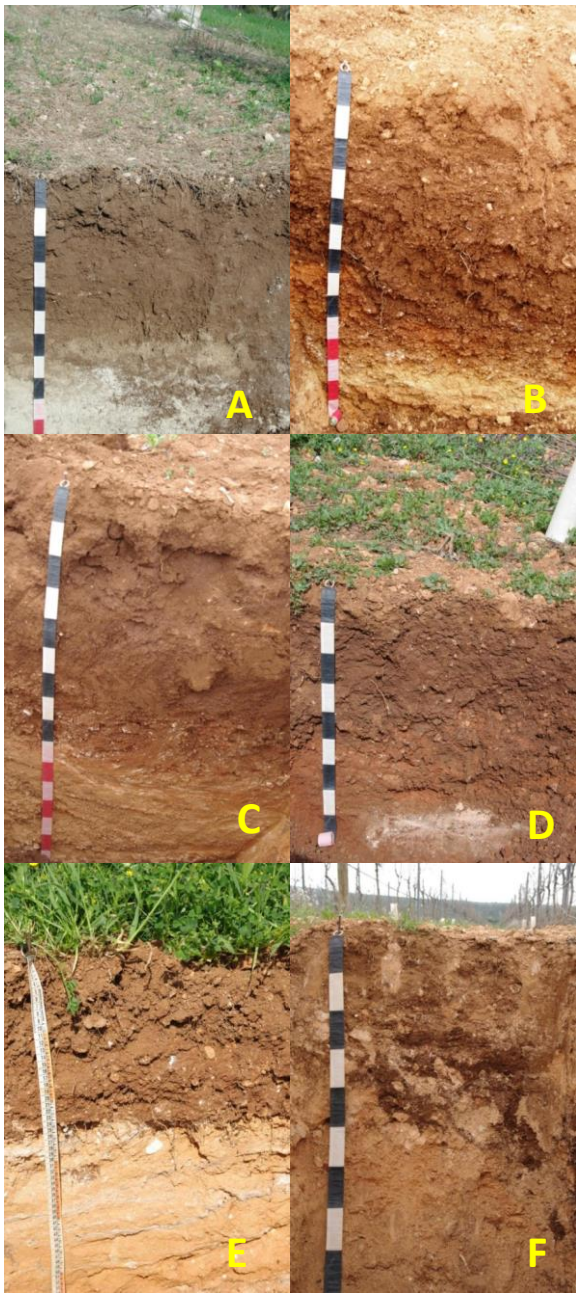


Figura 11. La adecuación de los suelos al cultivo y riego con aguas regeneradas varía en función de sus características. Las calicatas permiten diagnosticar con detalle las particularidades del suelo, que condicionarán el desarrollo radicular, la infiltración y la retención de agua. Los suelos agrícolas donde se ha realizado el estudio responden a tipologías muy comunes en la isla de Mallorca: Calcaric Cambisols (A, C y D) y Calcisols (B, E y F).
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.

3.3 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DEL SUELO

3.3.1 SALINIDAD DEL SUELO

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.

3.3.2 FRACCIÓN DE LAVADO

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 sales (Corwin et al., 2007; Letey et al., 2011). Al agua de riego "extra" aplicada para arrastrar parte de las sales se conoce como "fracción de lavado". La eliminación relativa de sales será tanto mayor cuanto más agua se infiltre.

El efecto beneficioso para los cultivos de la eliminación de sales en el suelo tiene algunas consecuencias ambientales negativas. Primeramente, la aplicación de una fracción de lavado conlleva aumentar el consumo de agua. Como segundo aspecto, las sales lavadas en el suelo son incorporadas al agua subterránea, reduciendo su calidad. Además, la mayor percolación incrementa 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, y este recupera los niveles mínimos por percolación natural, creándose un ciclo dentro del año en el que el suelo recupera, aparentemente, la situación de partida antes del riego (Figura 12).

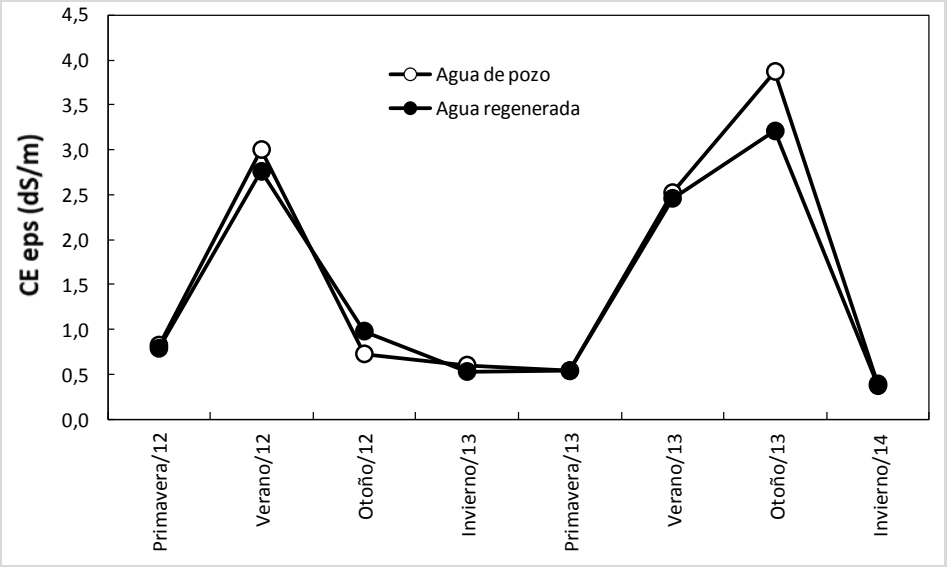


Figura 12. Evolución de la conductividad eléctrica del extracto de pasta saturada (CE eps) en dos tratamientos: parcelas regadas con aguas regeneradas y parcelas regadas con agua de pozo (subterránea). Maria de la Salut (Mallorca).

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

1) Conocer las características del agua regenerada en su totalidad.

2) Elegir cultivos tolerantes al contenido de sales previsto.

3) 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 en el suelo pueda comprometer el desarrollo de los cultivos.

4) Gestionar el agua regenerada, teniendo en cuenta que es un recurso escaso y su uso inadecuado repercute en la calidad del suelo y en el agua del acuífero.

3.3.3 SODICIDAD Y DISPERSIÓN DE ARCILLAS Y DE LOS AGREGADOS DEL SUELO

El sodio constituye un elemento conflictivo en los suelos agrícolas, cuyo perjuicio supera a los beneficios que pueda ocasionar.

La desestructuración de los agregados provoca una disminución de la porosidad, especialmente de los macroporos. Esto dificulta la circulación del agua y el aire, disminuyendo el suministro de oxígeno al sistema radicular. Al mismo tiempo, al disminuir la porosidad, la tasa de infiltración de agua disminuye, por lo que el suelo es más vulnerable a la erosión hídrica.

La presencia de calcio y magnesio son factores que frenan los efectos negativos del sodio. Al ser iones divalentes y con aptitud estructurante, contrarrestan los efectos perjudiciales del sodio. Por este motivo, los suelos calcáreos limitan la concentración de sodio.

3.3.4 ACUMULACIÓN DE METALES PESADOS EN EL SUELO

Los metales pesados son elementos que se encuentran en el medio ambiente, habitualmente en concentraciones bajas. Los vertidos domésticos y, sobre todo, los industriales son la principal fuente de metales pesados. Estos elementos químicos quedan adsorbidos mayoritariamente a los lodos, siendo las concentraciones del agua regenerada, normalmente baja.

Conforme a la experiencia del riego con aguas residuales depuradas en la isla de Mallorca desde la década de 1970, 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).

Como práctica preventiva, es recomendable disponer de un estudio analítico del suelo antes de iniciar el riego regular, para conocer las concentraciones de partida y, tras realizar análisis de seguimiento, conocer el impacto y establecer medidas correctoras.

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 de metales pesados en la red de saneamiento y que los procesos de depuración son correctos.

3) Realizar un seguimiento de las concentraciones de metales pesados en el suelo y su evolución al menos cada 15-20 años.

3.3.5 CONTAMINANTES EMERGENTES

Existe una gran diversidad de 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.

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 y en los organismos, llegando a la cadena trófica. En algunos casos 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.

Las recomendaciones básicas en el manejo del agua de riego regenerada, para evitar la incidencia de 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 EN EL SUELO

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 elevada.

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.

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).

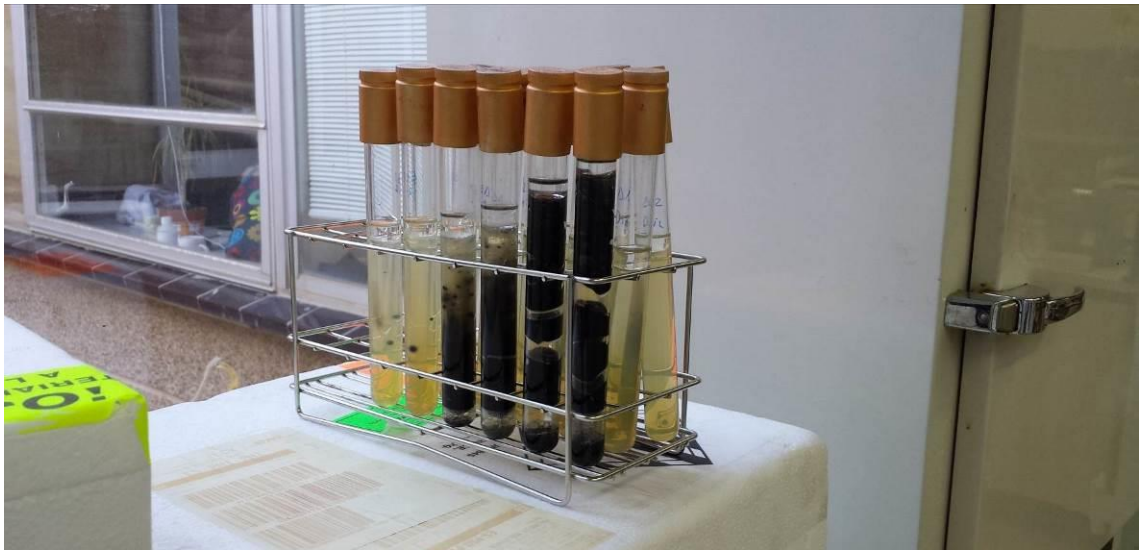
En general se constata que los suelos regados con aguas residuales tienen contenidos en materia orgánica más elevados, atribuible a varios factores: el riego favorece la producción de biomasa vegetal por lo que se produce un incremento en la generación de residuos, que se traduce finalmente en un incremento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

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

4- BALSAS DE REGULACIÓN



4 LAS BALSAS DE RIEGO COMO ELEMENTO DE REGULACIÓN

4.1 INTRODUCCIÓN

Los distintos procesos de tratamiento a los que se puede someter el agua residual (secundario, terciario) condicionarán el origen y la calidad del agua de entrada en las balsas de regulación. Así, es preciso conocer el nivel de depuración del agua afluente, determinante de la carga orgánica, microbiológica y de la concentración de nutrientes.

En general, las aguas regeneradas tienen una componente artificial y una tendencia a naturalizarse y a alcanzar el equilibrio químico, por lo que son aguas “inestables”.

Las depuradoras objeto de estudio llevan a cabo distintos métodos de tratamiento sobre aguas de origen doméstico, habiendo además una pequeña componente industrial para la de Inca. La tasa de renovación del agua es, en general, elevada; con escasos tiempos de residencia, adaptados a las demandas de agua.

Por lo tanto, la calidad del agua depende de la eficiencia de la depuración, y también, del volumen y frecuencia de entrada de agua en la balsa y de su tiempo de residencia. Estos factores determinarán su evolución y grado de maduración dentro de la balsa.

4.2 ESTUDIO DE LA BALSA COMO ELEMENTO DEPURADOR

Las balsas de regulación, con un importante volumen de agua almacenada, se convierten, pese a su origen artificial, en sistemas acuáticos donde se desarrollan procesos naturales.

Su riqueza en nutrientes supone una buena base para el desarrollo de comunidades biológicas, que representan la producción primaria del sistema, seguida de consumidores primarios, esencialmente el zooplancton. En lo alto de la red trófica de las balsas se encuentran los peces (*Cyprinus carpio* o carpa común) que, especialmente en sus fases primarias, se alimentan de los pequeños crustáceos y protozoos que conforman de forma mayoritaria la fracción del zooplancton. De esta forma 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. A modo de ejemplos, los nutrientes juegan un papel importante como sumidero de nitratos; las comunidades bacterianas disminuyen las concentraciones de clorofila, sólidos en suspensión, turbidez y de la DBO_5, con aclarado del agua, etc. La transformación de la materia orgánica puede ser controlada mediante la pesca de una fracción de la población de carpas ocasionalmente.

El funcionamiento anormal del sistema, por ejemplo algún defecto en el tratamiento de depuración de la EDAR, puede provocar importantes perturbaciones. Por ejemplo, en

la balsa de Inca en octubre de 2014, una perturbación provocada por la entrada excesiva de materia orgánica provocó concentraciones altas de nitritos y una gran mortandad de carpas.

Las condiciones de hipoxia o incluso anoxia debidas al déficit de oxígeno y las condiciones reductoras generan gases tipo sulfhídrico y metano, fuente de malos olores, haciendo del fondo de la balsa un medio hostil para los organismos aerobios.

En base a lo dicho, la calidad del agua a utilizar es diferente dependiendo de la profundidad de la toma del agua y del periodo del año.

4.3 EVOLUCIÓN DEL AGUA DE LA BALSA EN EL ESPACIO Y EN EL TIEMPO

En primer lugar hay que señalar el efecto de dilución que tiene el agua almacenada en la balsa sobre al agua de entrada. En la zona próxima a la entrada del agua es donde más se nota la incidencia del afluente. En general la calidad del agua almacenada en la balsa no es homogénea ni en la horizontal ni en la vertical.

Cuando las entradas tienen lugar de forma continuada y el agua alcanza el nivel del desagüe, se puede crear un flujo superficial directo, lo que motiva un tiempo de residencia del agua de entrada muy bajo, insuficiente para madurar y mejorar sus condiciones iniciales (e.g. Ariany, verano de 2013).

La estratificación térmica e hidroquímica del agua provoca una consiguiente compartimentación ligada a la profundidad de las balsas de forma estacional. Los gradientes térmicos, que también lo son de densidad, son más estables cuanto mayor sea la profundidad, ya que se ven menos afectados por las variaciones de la temperatura ambiental, incluso diariamente (Figura 13). Los procesos de mezcla diaria por enfriamiento superficial se dan de forma más generalizada en balsas de menor profundidad.

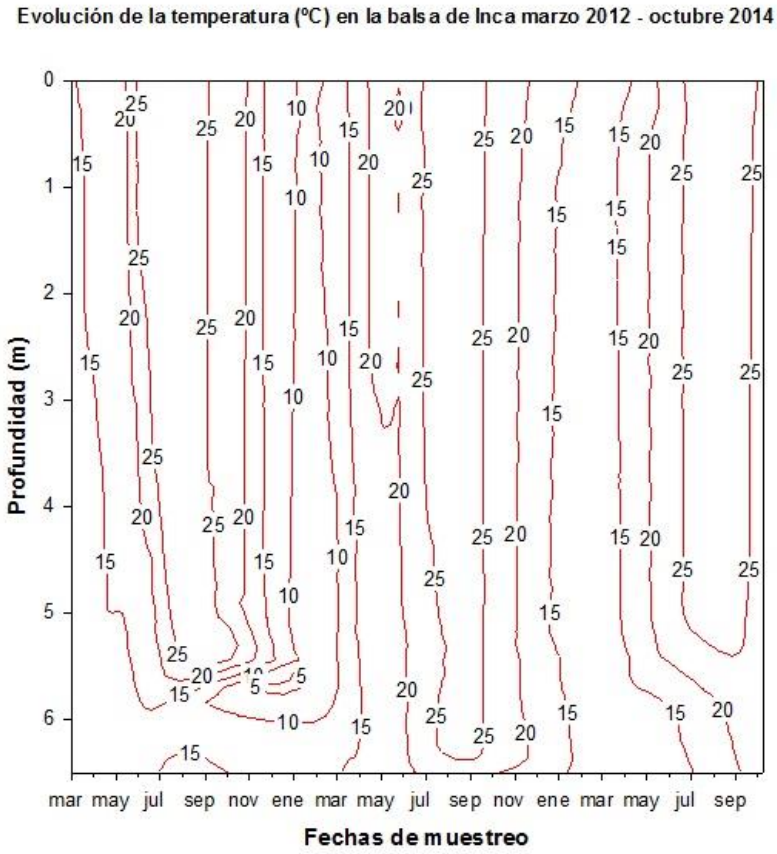


Figura 13. Representación gráfica de las isotermas registradas durante los años de estudio en la balsa de Inca, donde se pueden apreciar las estratificaciones térmicas que tienen lugar durante los meses más cálidos con diferencias que llegan a los 10°C entre la superficie y el fondo de la balsa.

Este tipo de compartimentación térmica tiene una incidencia importante sobre la distribución de las sustancias disueltas a lo largo de la columna de agua, entre las cuales el oxígeno disuelto es el que muestra mayores diferencias entre los estratos (Figura 14). La falta de difusión de este gas y su consumo continuado pueden provocar su déficit en la zona más profunda de las balsas.

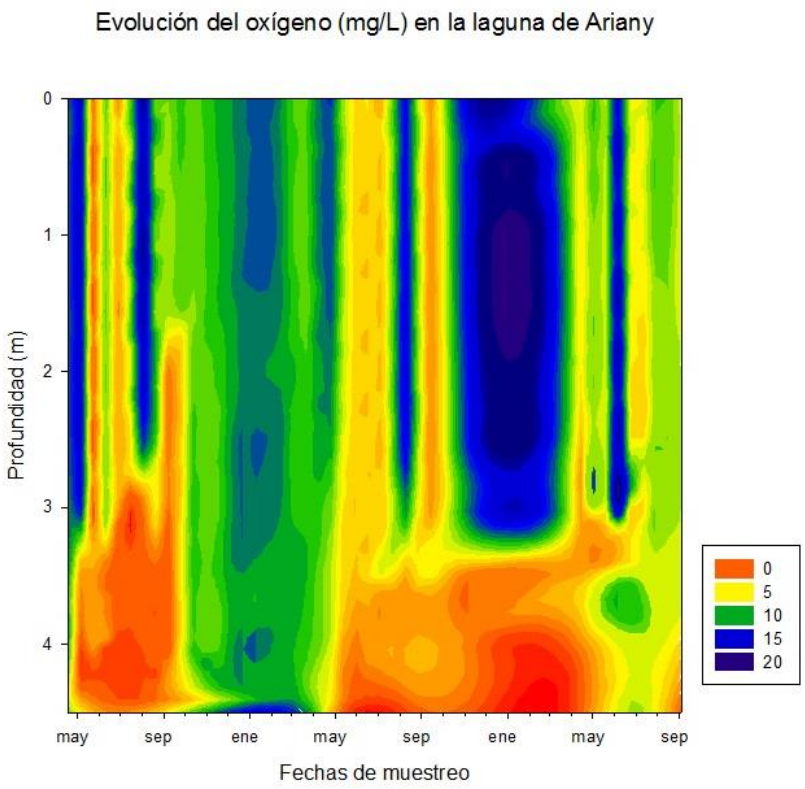


Figura 14. Evolución del oxígeno (mg/L) en la balsa de Ariany entre los meses de abril de 2012 y septiembre de 2014, en que se puede ver la inestabilidad de la estratificación de la columna de agua, y la consecuente disminución de la concentración de oxígeno en toda la columna de agua. La anoxia en el fondo durante los meses de invierno es atribuida al programa de cálculo.

Una estrategia para evitar la estratificación o minimizar su efecto, probada con éxito en la balsa de Inca, fue disminuir la altura de la columna de agua durante el período cálido. Con ella se favorece que pequeños enfriamientos superficiales produzcan la mezcla de todo el perfil vertical.

El otro tipo de medidas a aplicar están relacionadas con la tasa de renovación del agua. Las entradas constantes de agua en la balsa, especialmente durante las épocas más cálidas, se traducen en una menor maduración del agua, y por tanto, en valores altos de todos los parámetros que rigen la utilización de las aguas regeneradas para riego; sólidos en suspensión, DBO_5 y las cargas bacterianas. Tiempos de residencia mayores (y tasas de renovación inferiores), se traducen en reducciones de la carga orgánica y de la turbidez.

Por lo que respecta a la carga microbiológica, destacar que los clostridios, pueden aumentar sus concentraciones durante las primeras fases, encontrando en las condiciones anóxicas un ambiente ideal para desarrollarse. Con mayores tiempos de residencia disminuyen.

4.4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se propone una serie de criterios y recomendaciones con vistas al diseño de las balsas y al uso y gestión del agua almacenada.

El diseño de futuras balsas debe priorizar la relación superficie/volumen, de modo que sea lo mayor posible, favoreciendo la eliminación de parte de la carga bacteriana por la radiación solar incidente de forma pasiva. El almacenamiento de agua en balsas de profundidades inferiores a 3,5 metros reduce la estratificación estacional, y por tanto, la aparición de anoxia en el fondo, de consecuencias indeseadas.

En el caso 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, reduciendo así la anoxia y los malos olores. Una opción adicional es la instalación de tomas flotantes para captar el agua (las balsas suelen tener la toma fija en el fondo). Las tomas a distintas profundidades son un criterio de diseño importante para balsas ya operativas y para nuevos diseños, permitiendo elegir la mejor profundidad para la toma en cada momento mejorando la calidad del agua mediante un proceso selectivo. Así, no es preciso recurrir a métodos químicos para controlar la población algal, lo que alarga la vida útil de sus filtros.

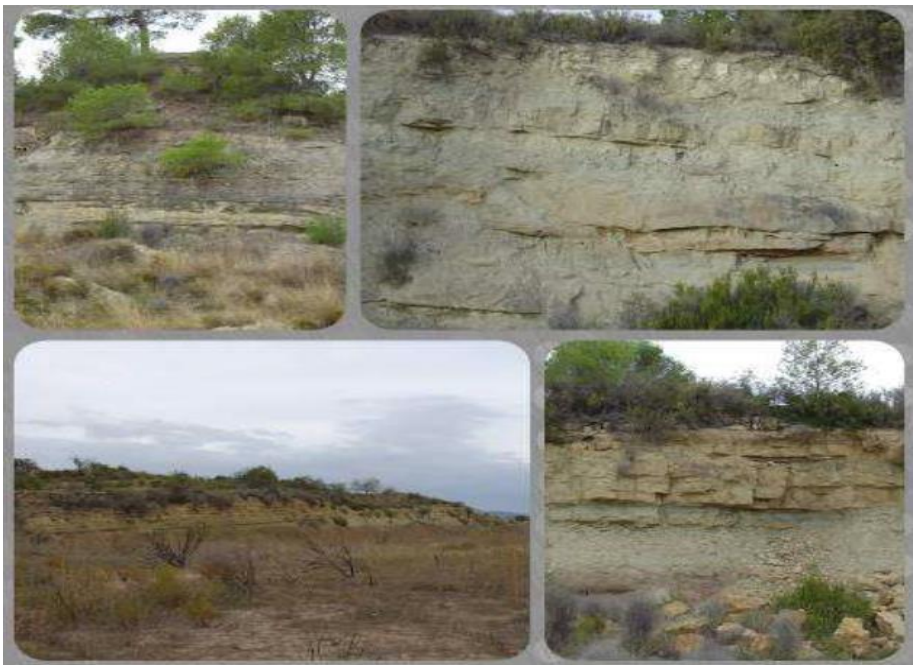
El agua procedente de un tratamiento terciario ha mostrado unas condiciones más constantes y una menor carga orgánica y bacteriana que la proveniente de un tratamiento secundario. Algunas perturbaciones puntuales pueden alterar el proceso de maduración, de ahí la importancia de tener un cierto control sobre las características del agua de entrada. Las balsas más grandes permiten una mayor atenuación de los efectos que pueda causar la entrada de agua procedente de la EDAR en volúmenes significativos.

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. Ello supone adaptar el sistema a variaciones en la gestión de la demanda y la mezcla de aguas dentro de la balsa, ya que el caudal de entrada es difícil de controlar. Con tiempos de residencia más largos, por ejemplo entre 20 y 23 días, se mejorarían los estándares de calidad y los costes de tratamiento para la desinfección del agua.

Es recomendable el seguimiento de algún parámetro indicador de la calidad del agua de forma continuada y a distintas profundidades. Por ejemplo, mediciones periódicas de la turbidez mediante el disco de *Secchi*. Igualmente son preceptivos los análisis microbiológicos de patógenos, no solo los requeridos en el RD 1620/2007, como las concentraciones de E.coli, sino también de otros como los clostridios.

En todo caso los gestores de las balsas deberán buscar un equilibrio entre la mejora de la calidad del agua y la aportación de nutrientes a los cultivos en el riego, mediante acciones en el caudal de entrada, tiempos mínimos de residencia, profundidad de la toma, intervenciones en la altura de la lámina de agua, uso de filtros y aditivos, etc.

5- EFECTO SOBRE LOS ACUÍFEROS



5 EFECTO DEL REGADÍO CON AGUAS REGENERADAS SOBRE LOS ACUÍFEROS

5.1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El empleo de técnicas y herramientas hidrogeoquímicas representa una metodología para 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.

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 alteración de la calidad natural a lo largo del tiempo.

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 modelación.

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 de cada actuación, que varía según la Comunidad Autónoma donde se practiquen este tipo de acciones. En las Islas Baleares está regulada 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^3/año de diferencia con los 33,6 hm^3/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 deberá estudiar su viabilidad legal como etapa previa.

5.3 OBJETIVOS

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 añadir:

1) Recopilación de la información disponible relativa a la calidad de las aguas subterráneas del entorno.

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.

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.

5) Determinación de las mejores prácticas para minimizar el efecto adverso sobre los acuíferos, en caso de detectarse alguno.

El fin último será la evaluación del impacto, la propuesta de actuaciones específicas para minimizarlo y el diseño de parámetros de gestión prácticos.

5.4 METODOLOGÍA

El plan de trabajo ha sido secuencial y consistente en la recopilación de toda la información disponible de piezometría, mejora del conocimiento de los límites físicos del acuífero, de su estructura tridimensional y funcionamiento, cartografías hidrogeológicas de detalle, cierre del balance hídrico, calidad de las aguas, y todos aquellos parámetros precisos para su posterior modelización.

Se han analizado periódicamente las aguas subterráneas en tres o más pozos de cada sector. Estos puntos de agua han sido seleccionados desde "aguas arriba", donde no hay regadío, hacia abajo según el sentido del flujo subterráneo bajo la zona regada, para monitorear el "circuito de interacción".

Las líneas de flujo han sido deducidas mediante cartografías hidrogeológicas detalladas propias. Se han considerado las variaciones con el acuífero funcionando en régimen natural y afectado, registrando variaciones estacionales.

5.4.1 CARACTERIZACIÓN INICIAL PARA EL ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LAS AGUAS REGENERADAS EN LOS ACUÍFEROS

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 evolución hidrogeoquímica de las aguas denota la existencia de dos tipos de flujo, uno superficial y otro a través de acuíferos profundos conectados hidráulicamente. Las mezclas de aguas de ambos son frecuentes, especialmente en los sondeos de Inca.

El flujo superficial y subálveo presenta aguas jóvenes, con escaso tiempo de permanencia en el acuífero, escasa salinización y alta vulnerabilidad ante procesos contaminantes. Los acuíferos más vulnerables son los de recubrimiento cuaternario sobre diferentes sustratos, que funcionan en régimen libre y con el nivel freático muy cerca de la superficie (en ocasiones a menos de 1 m). Su calidad química es deficiente para el consumo y riego (exceso de cloruros, sulfatos, nitratos y ocasionalmente nitritos y por su contenido microbiológico debido a las labores agrícolas, etc.)

Por debajo de estos recubrimientos aparecen, con frecuencia, acuíferos de materiales del Oligoceno y comportamiento semiconfinado. Son acuíferos con una cierta compartimentación y productividad variable, usados para regadío y, raramente, para abastecimiento doméstico. En general la calidad química y microbiológica del agua es aceptable, con algunas excepciones debidas a procesos contaminantes orgánicos y nitratos. La variabilidad de su calidad química es dependiente de la época del año y de su relación con las zonas regables.

La relación con la red hidrográfica superficial es importante, en especial si los ríos o arroyos ceden agua al acuífero.

5.4.2 CAPACIDAD DE AUTODEPURACIÓN DEL TERRENO

Cada acuífero tiene una cierta capacidad de autodepuración y una respuesta ante los impactos, llamada “resiliencia”. Los principales factores que determinan la capacidad de depurar de un medio son:

- La naturaleza del acuífero y su composición. Por ejemplo los acuíferos arenosos y kársticos son de alta vulnerabilidad a la contaminación ante vertidos directos de sustancias nocivas.
- La presencia de fallas.
- La concentración de materiales arcillosos.
- La capacidad de intercambio catiónico del suelo.
- La distribución del tamaño del poro (granulometría y permeabilidad).
- La cantidad de nutrientes y su influencia en el desarrollo bacteriano.
- Humedad. Las bacterias suelen desarrollarse mejor en medios con facilidad para retener agua.

- La luz. Tiene efectos inhibidores sobre bacterias no pigmentadas. Los factores luminosos 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, propios 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, e.g. cobre, mercurio, plata, arsénico, selenio, etc.
- Presión hidrostática. Las bacterias de suelos y aguas dulces no crecen a presiones superiores a 200 atmósferas.
- Temperatura. Las bacterias parásitas del hombre en las aguas subterráneas desaparecen de forma más rápida al aumentar la temperatura.
- Turbidez. En general está relacionada con el contenido en materia orgánica.
- Salinidad. Factor de gran influencia en los microorganismos que hay en el agua dulce.

5.4.3 MODELIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA

Se ha realizado un ensayo de modelización hidrogeológica mediante un modelo de transporte reactivo, con objeto de reproducir los procesos naturales del acuífero y evaluar el efecto de las aguas regeneradas sobre el mismo. Se ha empleado el programa Comsol Multiphysics (COMSOL, 2015), software adaptado para desarrollar aplicaciones personalizadas para el problema que se quiera ensayar, en este caso el efecto del riego. Se ha realizado un modelo de flujo y transporte transitorio reactivo en tres dimensiones en condiciones de saturación variable. Las condiciones ambientales son propias de la zona de Inca, Mallorca (Figura 15), si bien la gran parte de los procesos son extrapolables a lugares análogos, con pequeñas variaciones de las condiciones de contorno.

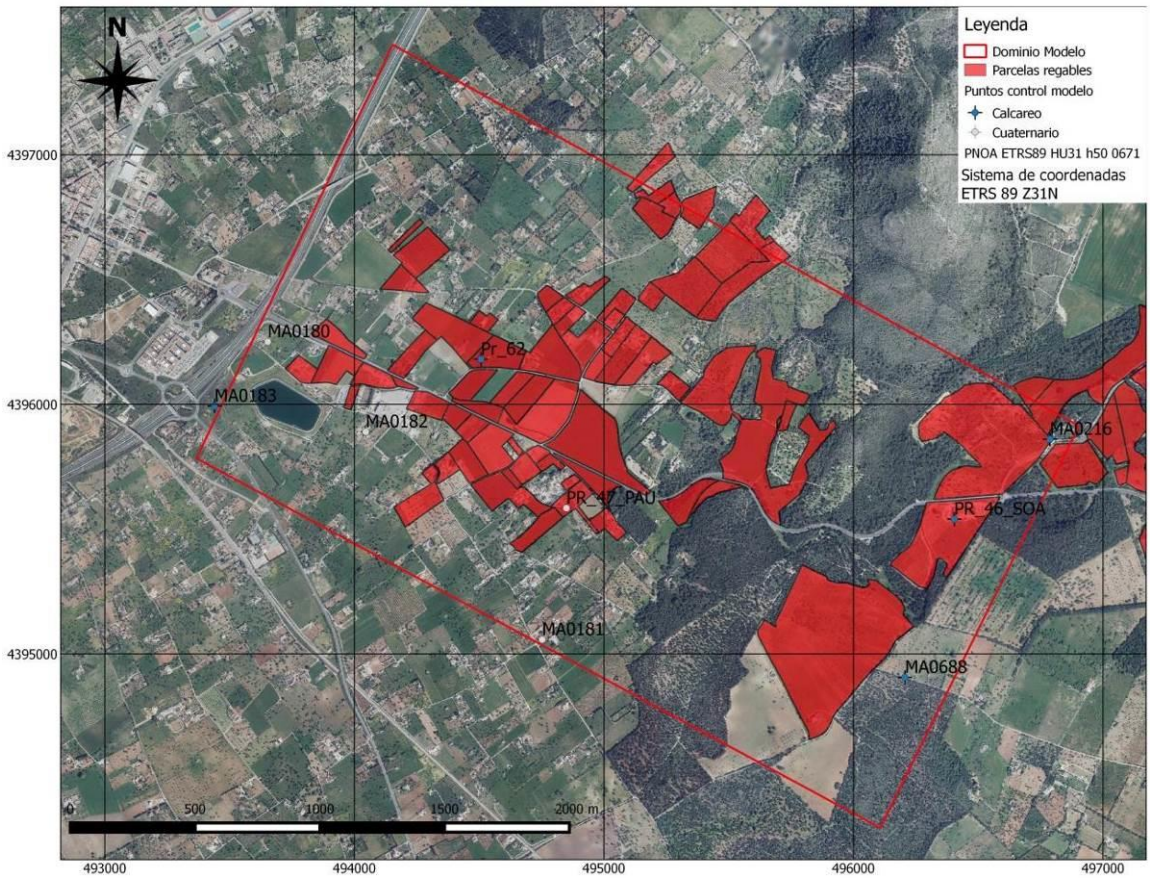


Figura 15. Foto área de la zona de estudio con las parcelas regadas con agua regenerada (en rojo). Los pozos de monitoreo están representados con puntos.

La Figura 16 muestra la malla de elementos finitos empleada en la simulación de flujo y los materiales simulados. La capa de suelo se ha mallado con prismas para poder obtener un mayor detalle. Se han diferenciado cinco elementos en la vertical. Para el transporte reactivo se han usado 61.424 celdas.

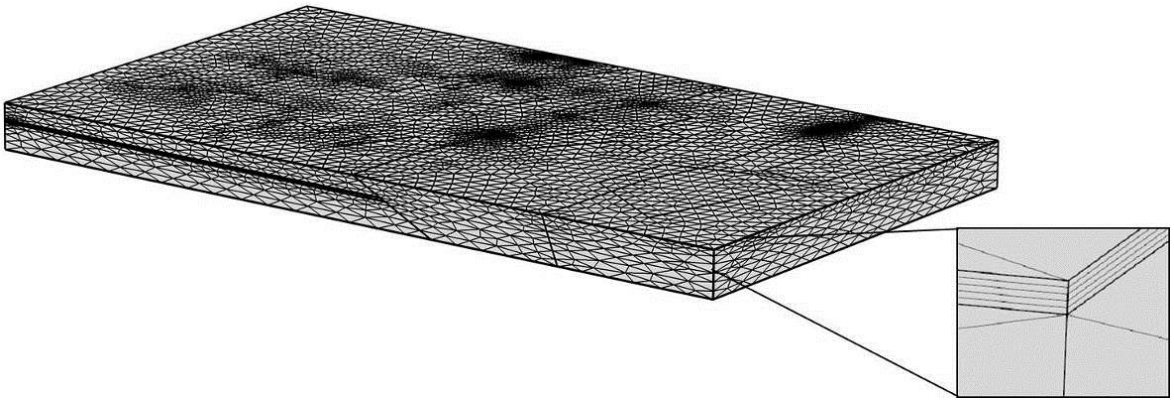


Figura 16. Imagen de la malla de 135.364 elementos y detalle de la diferenciación del suelo en la vertical.

CONDICIONES DE CONTORNO

El modelo conceptual propuesto para el dominio queda resumido en las siguientes entradas y salidas (Figura 17). Se ha aplicado flujo nulo a la base del dominio y a los laterales perpendiculares a la dirección del flujo.

-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.

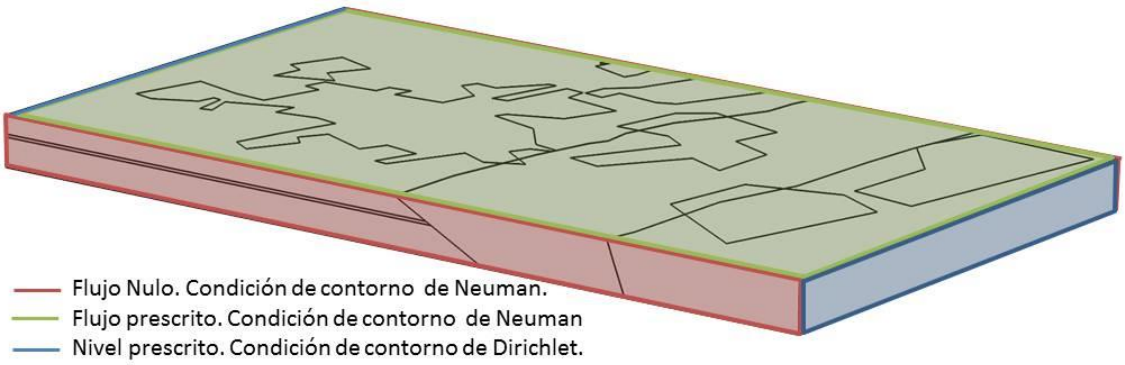


Figura 17. Esquema mostrando las condiciones de contorno empleadas para el cálculo del flujo de agua subterránea.

5.5 RESULTADOS. DISTRIBUCIÓN Y EVOLUCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN

Los vectores contaminantes principales detectados se pueden manifestar de cuatro formas: contaminación puntual, difusa, regional y de origen natural. Los procesos detectados en el acuífero han sido: nitrógeno, fósforo, potasio, sodio-cloruro, calcio-magnesio, cinc, manganeso, cobre, hierro, boro y vectores orgánicos.

5.5.1 RESULTADO DE LA MODELACIÓN

FLUJO DE AGUA CON SATURACIÓN VARIABLE

En lo referente a flujo se han realizado dos simulaciones. Por un lado, se ha reproducido la piezometría de detalle mediante un modelo estacionario.

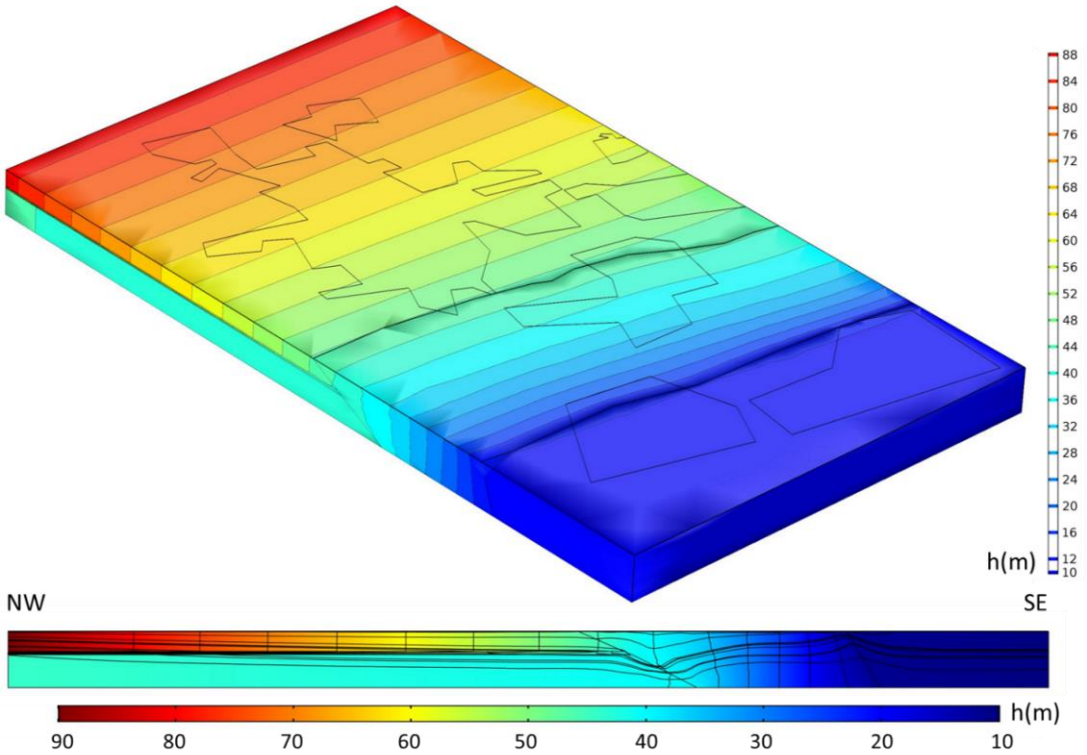


Figura 18. Isopiezas en 3D (arriba) y perfil 2D (abajo) con los resultados de la simulación de flujo estacionaria. Acuífero superficial con niveles en un rango entre 100 metros y 60 m y acuifero profundo con niveles en el intervalo 55-10 metros.

Por otro lado, se ha realizado una simulación transitoria (Figura 19) que tiene en cuenta la simulación estacionaria como valores iniciales. El objetivo principal de esta simulación es reproducir tendencias de evolución de los niveles del agua subterránea.

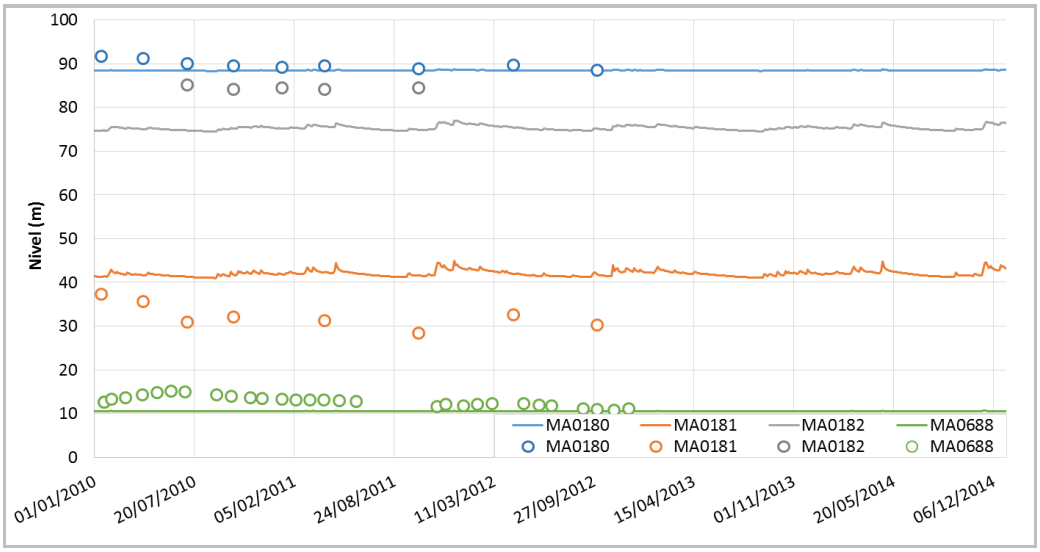


Figura 19. Evolución del nivel freático en tres puntos del dominio modelado. En continuo el resultado del modelo, en puntos los datos medidos.

Los puntos MA0180 y MA0688 presentan un buen ajuste entre los niveles calculados con el modelo y los niveles medidos. Los puntos MA0182 y MA0181 ajustan con

menos precisión que los dos anteriores, si bien la variación máxima de niveles coincide con la medida en campo.

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.

Con respecto a la mezcla entre diversas aguas, esta puede observarse a través de la evolución del cloruro en el acuífero. Las Figuras 20 muestran la evolución del cloruro en el área modelada para un periodo de cinco años, poniendo de manifiesto que el riego con agua regenerada supone un ascenso en la concentración de Cl.

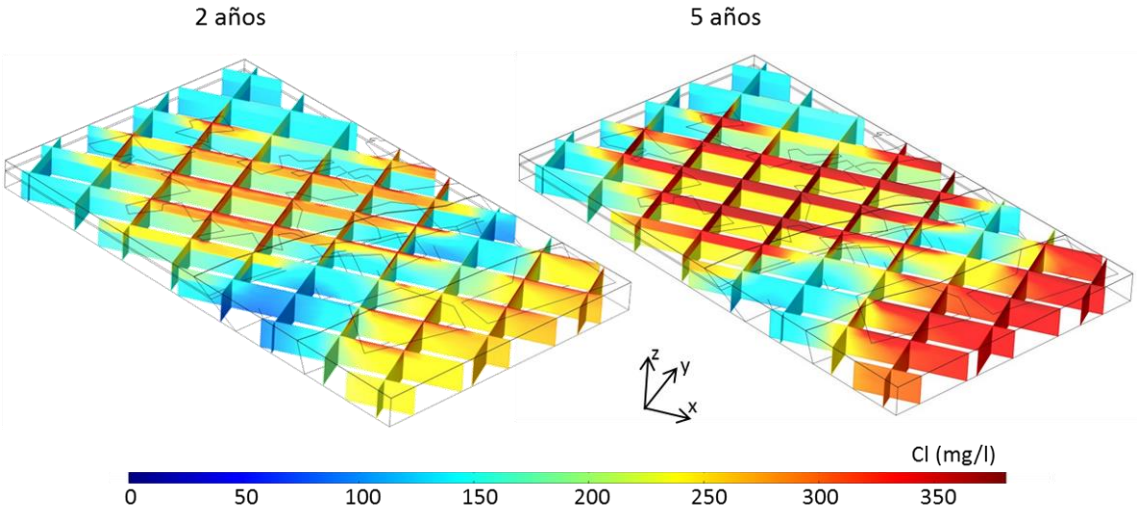


Figura 20. Distribución espacial del cloruro. El norte viene marcado por la dirección “Y” del eje localizado en el centro de la imagen.

Simulaciones similares se han realizado para el carbono orgánico disuelto (DOC), el oxígeno disuelto (TDO), nitrato, sulfato y hierro.

5.6 CONCLUSIONES

El fuerte filtrado y retención de partículas e iones más gruesos en el suelo edáfico reduce a niveles casi imperceptibles la llegada de contaminantes procedentes del regadío con aguas regeneradas a los acuíferos, dado el escaso caudal aplicado y el 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”.

Existen dos procesos hidroquímicos especialmente relevantes, la degradación de la materia orgánica y las reacciones que genera (anoxia, desnitrificación, etc.), y la adsorción de metales pesados procedentes de las aguas regeneradas.

El desarrollo de un modelo en tres dimensiones que contenga los principales rasgos geológicos ha permitido entender el flujo de agua subterránea y la evolución de las aguas regeneradas en el acuífero.

Los resultados del modelo ponen de manifiesto una leve salinización del acuífero por la recarga de agua regenerada. Estos resultados pueden observarse también en los resultados de las distintas analíticas disponibles, sin embargo, la salinización del acuífero no es elevada y se produce principalmente en las zonas más superficiales del acuífero. 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. Estos incrementos están dentro del rango común de concentraciones.

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. Además contribuye a la desnitrificación del acuífero, ya sea por procesos de dilución o por procesos de oxidación de la materia orgánica, restringiendo además la concentración de oxígeno.

Cabe destacar que 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 se produce por mezcla entre las aguas del acuífero y las aguas regeneradas con concentraciones bajas y adicionalmente como consecuencia de la oxidación de materia orgánica.

El ascenso en la concentración de sulfatos que puede propiciar la precipitación de algunos minerales produciendo el descenso de la porosidad y la permeabilidad del acuífero.

Los resultados del modelo predicen una evolución temporal de la composición del acuífero rápida, alcanzándose un estado casi estacionario rápidamente.

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.

Estas conclusiones son consecuencia de las observaciones y recopilación de datos de un período de cinco años, pero que deberían ser estudiados para plazos más largos.

5.7 RECOMENDACIONES PRÁCTICAS

Las recomendaciones prácticas alcanzadas, relacionados con la hidrogeología y el regadío, se enfocan en las siguientes líneas de acción:

5.7.1 MEZCLA DE LAS AGUAS REGENERADAS CON AGUAS PROCEDENTES DE OTRAS FUENTES

Una opción modelizada en el proyecto ha sido la mezcla de las aguas regeneradas con aguas procedentes de otras fuentes, con o sin adicción de fertilizantes. La proporción más adecuada en los procesos de mezcla debe ajustarse al requerimiento legal del RD 1620/2007.

5.7.2 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 se ubican 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. Hasta el momento el problema se viene resolviendo mediante el sistema de construir los aliviaderos de las balsas para evitar daños materiales.

Cabe la posibilidad de construir un sondeo o pozo como elemento adicional a este tipo de balsas para evacuar excedentes en situaciones de inundación y recargar con ellos los acuíferos, si las posibilidades de recarga y la calidad de las aguas indígenas lo permiten. El diseño constructivo de estas captaciones debe ser "a la carta". Las Figuras 21 presentan un ejemplo real para el sondeo Arnachos 1, en Chulilla, Valencia. 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".

Figura 21. Detalle del cabezal de inyección del sondeo Arnachos 1, en Chulilla, Valencia. Fotos por cortesía de J.M. Montes.

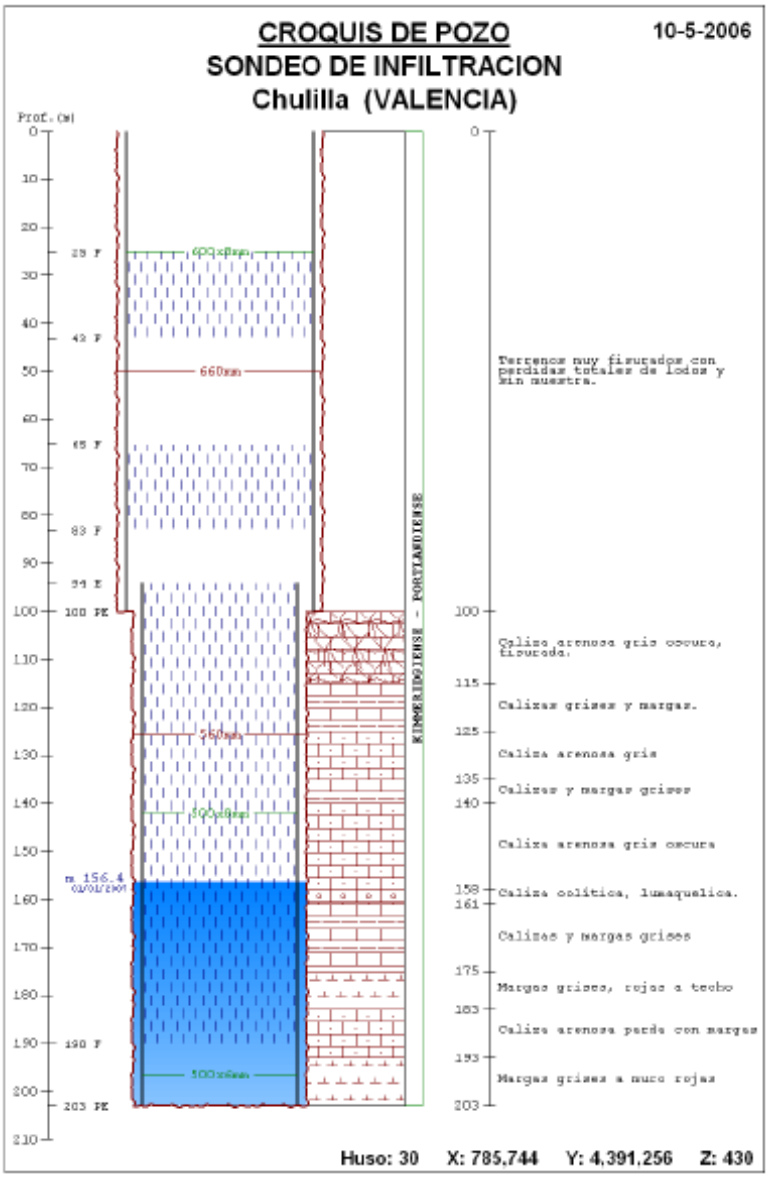


Figura 22. Columna litológica y diseño de la captación Arnachos 1, Chulilla, Valencia.

Los piezómetros de observación tienen un diseño convencional, siendo preferible su entubación con tubería de PVC u otro material resistente al posible ataque químico.

5.7.3 POSIBILIDADES DE RECARGA GESTIONADA DE EXCEDENTES CON DISTINTOS DISPOSITIVOS

POZOS DE INFILTRACIÓN-PERCOLACIÓN Y SONDEOS

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 permeables o que presenten niveles impermeables.

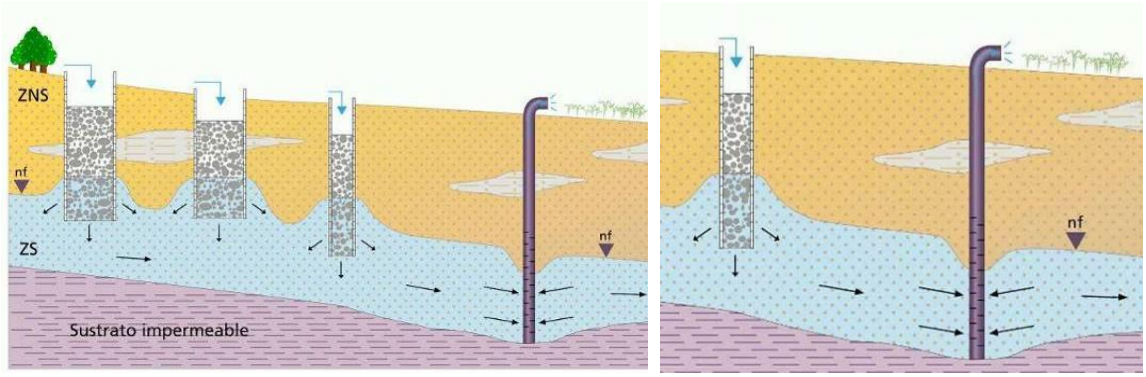


Figura 23. Esquema de un dispositivo de pozos abiertos de infiltración (a) y pozos profundos (b).

La principal diferencia con los “pozos abiertos de infiltración” es la profundidad de los mismos (Figuras 23), 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.

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 (subsuperficial o subterráneo).

El riego subterráneo, a diferencia del riego subsuperficial, consiste en la aplicación de agua en zonas más profundas que éste último. El método permite la creación de franjas húmedas a la profundidad deseada (Figura 24).

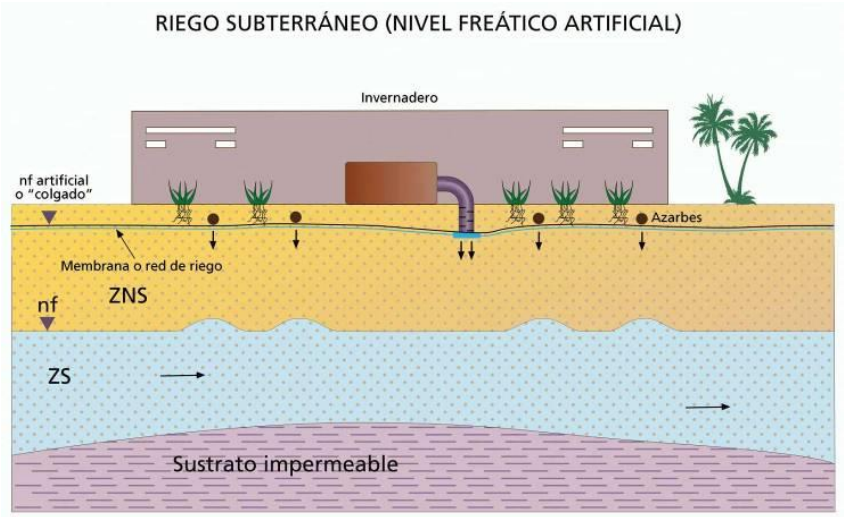


Figura 24. Esquema de un sistema de recarga artificial a través de un sistema de riego subsuperficial o subterráneo.

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.

5.7.4 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 tres veces el volumen a tratar, asegurando dos semanas de retención.

La profundidad oscila entre 0,6 m y 3 m. Se deben colocar pozos de decantación para evitar dragados completos. Conviene evitar la aportación de escorrentía urbana directa.

Una alternativa a estudiar es su integración en elementos constructivos, e.g. 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.

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, tales como filtros verdes o membranas biológicas.

Aunque los resultados son “esperanzadores”, deberán ser evaluados en etapas posteriores, tras alcanzar resultados concluyentes en los efectos a largo plazo.

Figura 25. Futuro humedal artificial para la mejora de la calidad de las aguas en Palma.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

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 para favorecer una mejor gestión y explotación de sus redes colectivas de riego que les permita una mayor rentabilidad.

Asimismo, los avances perseguidos en el fomento del uso sostenible de las fuentes de agua alternativas suponen una contribución importante para el medio ambiente, para el sector agrícola y para el desarrollo sostenible del regadío.

Las conclusiones y recomendaciones finales son:

1) Las aguas regeneradas representan un **aporte adicional** de **nutrientes** para los cultivos y una mayor producción si se gestiona adecuadamente. El riesgo de salinización de los cultivos y suelos es bajo. Pueden llegar a suponer un riesgo de eutrofización cuando son embalsadas.

2) Es necesario realizar un **seguimiento** periódico de las características físico-químicas y microbiológicas de las aguas regeneradas, tal y como exige el RD 1620/2007, tanto por su cumplimiento como por la necesidad de **ajustar** los **programas de fertilización**, a fin de optimizar el uso de fertilizantes y maximizar el desarrollo vegetativo y productivo de los cultivos.

3) **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, mínimas, 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.

4) En general, se constata que los suelos regados con aguas regeneradas tienen contenidos en **materia orgánica** más elevados. Este incremento de materia orgánica en el suelo comporta un aumento del contenido de **nitrógeno orgánico** y de la **capacidad de intercambio catiónico**.

5) 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.

6) En los estudios de **modelización** realizados se ha observado hay dos procesos destacados a tener en cuenta: la **degradación de la materia orgánica**, con las consiguientes reacciones que genera (anoxia, desnitrificación, etc. a través del ciclo redox), y la **adsorción de metales pesados** procedentes de las aguas regeneradas. El **ión cloruro** queda dentro del rango común de concentraciones de agua de pozo en todas las zonas de estudio.

7) La materia orgánica introducida mediante el riego u operaciones de recarga inducida con agua regenerada incide, en especial, en los acuíferos libres. La presencia de **materia orgánica** junto a una muy baja concentración de nitrato en el agua regenerada contribuye a la **desnitrificación del acuífero**, bien sea por procesos de dilución o de reducción. En el caso de los metales pesados no se han detectado procesos de persistencia ni de acumulación.

8) 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 agua del acuífero rápida, alcanzándose un **estado estacionario a partir del quinto año.** En adelante funciona en régimen permanente, sin cambios importantes.

9) Los resultados obtenidos permiten además **recomendaciones** de **diseños constructivos** de dispositivos específicos para recarga en zonas regadas con aguas regeneradas: **pozos y sondeos** perforados. Es recomendable un sellamiento superficial adecuado, empaques de grava de granulometría media a gruesa, tramos filtrantes con ranurado amplio, etc.

10) Algunos **parámetros de gestión** deben ser tenidos en cuenta para fomentar el incremento del almacenamiento del agua en los acuíferos, tales como aplicar mayores **dosis de lavado** en periodos de abundancia de recursos y/o realizar acciones de **recarga inducida** directa con **excedentes** cuando se cumplen todos los requerimientos técnicos y legales.

11) 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.

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.

c. Es conveniente instalar **tomas flotantes** para la derivación o impulsión del agua, o, todavía mejor, a **distintas profundidades** de las balsas de riego, evitando la toma directa desde el fondo salvo situaciones concretas. 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 algún parámetro básico de forma continuada mediante algún indicador de la calidad del agua que sea estandarizado y sencillo, e.g. disco de Secchi (permite 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).

f. El uso de “islas flotantes” o balsas pequeñas con una comunidad vegetal cuyas raíces llevan a cabo un consumo directo de nutrientes del agua de la balsa, ha dado buenos resultados para situaciones con concentraciones excesivas. Las **especies** deben ser **seleccionadas** atendiendo a su floración y polinización. El uso de papiro en islas flotantes ha tenido un efecto purificador positivo.

12) El uso de aguas regeneradas para riego está potenciando sinergias favorables en las Comunidades de Regantes, fomentando las inversiones por parte de la Administraciones y particulares (al estar garantizada la disponibilidad 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.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Adrover, M. y 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. 2010. Efectes del reg amb aigües residuals tractades en els sòls i cultius. Tesis doctoral. Palma: Universitat 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. Pag. 188-192.
- Amengual, C; Moyà, G; Martínez, A; Forss, A. 2006. Sistema integral de depuración de aguas residuales en la Universitat de *les Illes Balears*. Tecnología del agua, 284: Pág. 54 – 59.
- American Work Association Water Pollution Control Federation. 1981. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater.
- Asano, T., Levine, A.D. 1996. Wastewater reclamation, recycling and reuse: past, present, and future. Water Science and Technology, 33: 1-14.
- 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 Págs.
- 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.
- COMSOL, 2015. COMSOL Multiphysics Reference Guide. Version 5.2. Burilington, MA: COMSOL Inc.
- Corwin, D. L., Rhoades, J. D., & Šimůnek, J. 2007. Leaching requirement for soil salinity control: Steady-state versus transient models. Agricultural Water Management, 903, 165-180.
- 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.
- 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.
- Govern de *les Illes Balears*. Conselleria d'Agricultura, Medi Ambient i Territori. 2011. Plan Hidrológico de *les Illes Balears* 2015-2021. Memoria.
- Iglesias, R., Ortega, E. 2008. Present and future of wastewater reuse in Spain. Desalination 218: 105-119.
- 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.
- Informe geotécnico balsa de aguas residuales depuradas para riego parcelas nº195, 196, 173 y 480. Polígono Nº12 INCA Exp.629/03.
- 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
- 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.
- 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, 984, 502-506.
- MAGRAMA, 2010. Plan Nacional de Reutilización de Aguas. Versión Preliminar.

- MIMAM. 2001. “Caracterización de las fuentes agrarias de contaminación de las aguas por nitratos.” Dirección General de obras hidráulicas y calidad de las aguas. Subdirección general de tratamiento y control de calidad de las aguas.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Encuesta sobre Superficies y Rendimientos Cultivos ESYRCE. Encuesta de Marco de Áreas de España.
- Ministerio de Medio Ambiente. 2007. Real Decreto 1620/2007 por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas.
- 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.
- Oster J.D. & Rhoades, J.D. 1985. Water management for salinity and sodicity control. En: Pettygrove & Asano Eds.. Irrigation with reclaimed municipal wastewater; a guidance manual. In CSWRSB Report Vol. 84. California State Water Resources Control Board. Pag. 159-178.
- 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 Págs.
- 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.
- Plan Hidrológico de *les Illes Balears*, 2009, revisado en 2016.
- Santarrufina, E. 2007. El regadío en *les Illes Balears*. Uso de agua depurada. Investigaciones Geográficas, nº 43 2007 pp. 85-96.
- Santarrufina, J.E. 2007. El regadío en *les Illes Balears*. Uso de agua depurada Investigaciones Geográficas. Universidad de Alicante. Nº 43. Pág. 85-96.
- 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.
- Toze, S. 2006. Reuse of effluent water – benefits and risks. Agricultural Water Management, 80: 147-159.
- TRAGSA, 2019. Efecto del regadío con aguas regeneradas sobre los suelos, acuíferos y cultivos. Resultados del proyecto de I+D+i EARSAC (Coordinador Fernández, E). Grupo Tragsa, 2019. ISBN-13- 978-84-09-15528-6.
- Vadell, J, Adrover, M., Solivellas, J., Moyà, G., Nicolas, E., Mulet, S., Fernández, E. y Calero, R. 2015. Uso de aguas regeneradas para el riego de cultivos forrajeros en *les Illes Balears*. En 54ª 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. Pág.105-112.
- World Health Organization. 1989. Health guidelines for the use of wastewater in agriculture and aquaculture. Technical Report Series 778, ISSN 0512-3054.
- World Health Organization. 2006. WHO guidelines for the safe use of wastewater excreta, and greywater. Vol.2: Wastewater in agriculture, Geneva.

7.1 ACCESOS WEB

- ADECAGUA, 2016. https://bit.ly/2veegOO
- CENTA, 2017. http://www.centa.es/tag/reutilizacion/
- FAO, 2014. http://www.fao.org/nr/water/aquastat/didyouknow/indexesp3.stm
- Fernández, 2016. https://goo.gl/7fXGae
- Salgot, M., 2016. https://bit.ly/2UHe99i

Tragsa
GrupoTragsa
IMPACTO AMBIENTAL Y SOSTENIBILIDAD DE TRES EXPERIENCIAS DE REGADÍO CON AGUAS REGENERADAS EN SUELOS, ACUÍFEROS Y CULTIVOS EN LAS ISLAS BALEARES
EFECTOS DEL RIEGO CON AGUA REGENERADA EN SUELOS, ACUÍFEROS Y CULTIVOS
EARSAC
Enrique Fernández Escalante (Tragsa)
Sergi Mulet Aloras (Tragsa)
Rodrigo Calero Gil (Tragsa)
Emilio Nicolás Nicolás (CEBAS-CSIC)
Pedro A. Nortes Tortosa (CEBAS-CSIC)
Gabriel Moyá Niell (UIB)
Jaume Solivellas Prats(UIB)
Jaume Vadell Adrover(UIB)
INTRODUCCIÓN
• El desarrollo socio-económico de Baleares se ha visto abocado al sector terciario, incidiendo de forma negativa en el desarrollo de la agricultura
• El aumento de la demanda de agua para la población turística y residencial ha provocado la explotación intensiva de acuíferos y problemas de intrusión
• La utilización de las aguas regeneradas para el riego agrícola representa un extraordinario interés para gestores y usuarios
OBJETIVOS
El objetivo principal del proyecto es obtener series de datos y resultados que permitan evaluar el efecto INTEGRADO del riego con agua regenerada en suelos, acuíferos y cultivos
MALLORCA
MENORCA
EIVISSA - IBIZA
FORMENTERA
METODOLOGÍA / RESULTADOS
En la actualidad hay una carencia de información importante que demuestre la influencia de la utilización en regadío de aguas residuales regeneradas
1- Efectos sobre la fisiología de la planta
1. Caracterización de las fuentes de agua
2. Medición de la situación hídrica de la planta
3. Medición de los niveles de intercambio gaseoso
4. Estado nutricional del cultivo (análisis foliar)
5. Evaluación de la producción final y microbiología del fruto
•Mejor estado hídrico con aguas regeneradas que con aguas de pozo en las pruebas sobre pimiento y tomate (independientemente de su fertilización)
•Similar estado hídrico para el olivo en la zona de Inca
•Resultados parecidos con aguas de pozo y regeneradas en vid en Santa María: mejor estado hídrico con aguas regeneradas en la variedad Cabernet S. que en la Prensal Blanc
•Mayores niveles de intercambio gaseoso con agua de pozo que con regenerada en variedad Prensal Blanc; con variedad Cabernet S. efecto contrario
•Mayor producción con agua regenerada (34,3%) por la aportación de nutrientes respecto a la de pozo sin fertilización
•Mayor producción con agua regenerada fertilizada (35,8%) respecto a la de pozo con fertilización
•Producción muy superior con agua regenerada fertilizada (80,2%) respecto a la de pozo sin fertilización
2- Incidencia sobre el suelo
1. Variaciones físicas y químicas (INCLUYENDO metales pesados)
2. Variaciones estacionales debidas al uso de aguas regeneradas
3. Diagnóstico final para establecer, si procede, criterios de actuación
Identificación de las unidades edafológicas
Muestreo en parcelas
Análisis de 17 macros y trazas
•Sin variaciones en la caracterización en tres años ni desestructuración del suelo por efecto del agua
•Durante los meses de verano se produce un incremento de la salinidad
•Con las lluvias de otoño e invierno se produce un lavado intenso
Recuperación de la situación inicial tras incrementos puntuales de la salinidad
LÍNEAS DE ACCIÓN
1. Evaluar los efectos sobre la fisiología de la planta, la producción y su calidad
2. Incidencia sobre el suelo
3. Caracterizar el estado inicial de las aguas subterráneas y su evolución por efecto del riego con aguas regeneradas
4. Evolución de la calidad del agua de riego almacenada en las balsas de regulación
5. Variación de la calidad del agua a lo largo de sus etapas de desinfección y filtración
3- Acuíferos: evolución de las aguas subterráneas
1. Recopilación información previa
2. Caracterización y balance hídrico de tres zonas
3. Cartografías geológicas de detalle
4. Cartografías hidrogeológicas de detalle
5. Diseño de las redes de control y análisis seriados "aguas abajo" a lo largo de la zona regada con aguas regeneradas
6. Estudios de interacción agua-roca (modelado hidrogeoquímico)
•Facies bicarbonatadas y cloruradas calco-sódicas y magnésicas con incremento de la concentración de calcio, cloruros y sulfatos en el circuito de interacción
•Modelado: posibles reacciones químicas en los circuitos de interacción a partir de los polos fríos caracterizados, para evaluar impactos diferidos:
4- Balsas de regulación como elemento depurador
1. Muestreo con embarcación
2. Tratamiento de muestras "in situ" y laboratorio. Base de datos
• Alto índice de correlación entre los iones hierro y fósforo con el calcio (sistema carbónico-carbonato)
• Condiciones alcalinas, que con descenso del CO_2 libre y cambios de temperatura producen precipitación de calcita (blanqueado) y posterior presión trófica del zooplancton sobre el fitoplancton (aclarado)
• Concentraciones de algas, clorofila y materia orgánica muy supeditadas a la temperatura y profundidad (condiciones eutróficas en balsas de escasa profundidad)
• Evolución de la calidad aguas almacenadas depende del tiempo de renovación del agua y la profundidad
• Recomendaciones: profundidades someras (< 4,5 m.), captaciones superficiales, entrada con alta aireación, etc.
• Mejores resultados con mayor tiempo de residencia y menor profundidad
CONCLUSIONES
CULTIVOS
- Mejores rendimientos con la aplicación de agua regenerada en cultivos hortícolas con una solución nutritiva, que podría duplicar los rendimientos
- En cuanto al estado nutricional de los cultivos (hortícolas, olivar y vid), puede suponer un ahorro de costes en el abonado de ecotoxicología nula
- No se ha detectado bioacumulación de metales pesados ni efectos nocivos de origen microbiológico en los frutos de origen hortícola (cumplimiento RD 1620/2007)
- Es necesario una buena caracterización analítica, el estudio de sinergias y contaminantes emergentes y el asesoramiento al agricultor
SUELOS
- Sin variaciones perceptibles en la estabilidad estructural
- En tres años de riego con agua regenerada no hay variación en la salinidad final. Riesgo de impacto diferido de difícil evaluación a largo plazo
BALSAS
- Alto índice de correlación entre los iones hierro y fósforo con el calcio (sistema carbónico-carbonato)
- Condiciones alcalinas, que con descenso del CO_2 libre y cambios de Tª producen precipitación de calcita (blanqueado) y posterior aclarado por presión trófica
- Concentraciones de algas, clorofila y materia orgánica dependiente de la Tª y profundidad (condiciones eutróficas en balsas de escasa profundidad)
-Evolución de la calidad aguas almacenadas depende del tiempo de renovación del agua y la profundidad
-Recomendaciones: profundidades someras (< 4,5 m.), captaciones superficiales, entrada con alta aireación, etc.
-Mejores resultados con mayor tiempo de residencia y menor profundidad
AGUAS SUBTERRÁNEAS
- Facies bicarbonatadas y sulfatadas cálcicas, con proporciones variables de magnesio y sodio
- Las reacciones químicas de la modelación inicial manifiestan variaciones importantes en fósforo, nitrógeno, sulfatos, calcio y magnesio de forma natural
- Manganeso, sílice e hidróxido férrico altamente supeditado a variaciones de pH y procesos de mezcla y de intercambio catiónico
-No se han detectado interacciones negativas en los acuíferos tras tres años de actividad, en aras de la sostenibilidad y seguridad ambiental
Estació depuradora d'aigües residuals de Santa Maria
OTROS
- Futuro "Manual de Buenas Prácticas para el Manejo de Aguas Regeneradas en los cultivos" con amplia dedicación a los elementos de gestión
- Gestión de las balsas de regulación como sistema de depuración
- Posibilidades de recarga gestionada con excedentes y conveniencia de un sondeo profundo en el esquema de gestión
- Necesidad de mejora de la percepción psico-social
- Nueva línea de acción abierta ante contaminantes emergentes y sinergismos
PARTICIPAN:
Tragsa
CSIC
EPOs:
Govern de les Illes Balears
CON EL APOYO DE:
PLATAFORMA TECNOLÓGICA ESPAÑOLA DEL AGUA
WIRE
M.A.R. TO MAR-KET
goodbye
thankyou
regards
farewell
sayonara
ciao
cheers
adieu
CONAMA2014

Grupo Tragsa 2020

Tragsa
GrupoTragsa

Esta publicación surge como segundo 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 de las Islas Baleares.

El proyecto se enmarca en la línea estratégica de I+D+i de gestión hídrica y calidad de las aguas, y analiza las posibilidades de utilizar aguas regeneradas para el riego.

Esta publicación va dirigida en especial a usuarios finales y profesionales..

EARSAC

GrupoTragsa

Febrero, 2020