

Consideraciones sobre el pasado, presente y futuro de las aguas subterráneas en España

Considerations on the past, present and future of groundwater in Spain

Emilio Custodio^{abc*}

^aCatedrático emérito, Grupo de Hidrología Subterránea, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universitat Politècnica de Catalunya, Campus Nord, Jordi Girona 1-3, 08034 Barcelona.

^b Correspondiente de la Real Academia de Ciencias de España.

^c Investigador asociado, iUNAT, Instituto Universitario de Estudios Ambientales y Recursos Naturales, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

E-mail: emilio.custodio@upc.edu

*Autor para correspondencia

Recibido: 09/09/2021

Aceptado: 03/12/2021

Publicado: 31/01/2022

Citar como: Custodio, Emilio. 2022. Considerations on the past, present and future of groundwater in Spain. *Ingeniería del agua*, 26(1), 1-17. <https://doi.org/10.4995/la.2022.16245>

RESUMEN

Las aguas subterráneas son importantes en gran parte de la Península Ibérica y en los archipiélagos balear y canario. La recarga total es del orden de 30 km³/a y se utilizan directamente del orden de 7 km³/a. La diferencia entre esos valores es caudal aportado a los ríos y al mar, con funciones ecológicas y de servicios ecológicos. La explotación intensiva se inició a finales del siglo XIX, con un extraordinario desarrollo entre 1950 y 1990. Gran parte de ese desarrollo tuvo lugar como aguas del dominio privado, de modo que eso condiciona la situación actual, en la que todas las aguas son del dominio público. Esto y el desarrollo del regadío intensivo en clima semiárido crea una situación que condiciona la planificación hidrológica y que requiere notables cambios de paradigma para un uso sostenible del agua, considerando la cantidad y la calidad.

Palabras clave | recursos de agua subterránea, circunstancias, características, España.

ABSTRACT

Groundwater is a relevant resource in a large part of the Iberian Peninsula and in the Balearic and Canary Islands. The total recharge is about 30 km³/yr and about 7 km³/yr are used directly. The difference between these two values is flow contributed to the rivers and the sea, with an ecological role and provider of ecological services. The intensive groundwater development started late in the 19th century, with an extraordinary growth between 1950 and 1990. A large fraction of this development was as private domain waters, so this conditions the present situation, in which all waters are in the public domain. This and the development of intensive irrigation in semi-arid climate creates a situation that conditions water planning and requires significant changes in the paradigm to get a sustainable use of water, considering quantity and quality.

Key words | groundwater resources, circumstances, characteristics, Spain.

INTRODUCCIÓN

Aunque en España hay grandes variaciones territoriales, que se acentúan en los dos archipiélagos (Baleares y Canarias), en su conjunto existe una larga tradición en la captación y utilización de las aguas subterráneas en numerosas regiones, que con frecuencia llega a ser intensiva e incluso con consumo progresivo de reservas. Algunas situaciones son paradigmáticas y bien conocidas a nivel mundial. No obstante, los ámbitos de interés de los explotadores de agua subterránea y de la administración del agua tienen diferencias importantes. Esto se traduce en una pobre gobernanza, notables lagunas de conocimiento y una observación y control insuficientes cuando se considera la real importancia de las aguas subterráneas en las áreas semiáridas españolas y que incluso llegan a ser áridas en parte del SE continental y en parte de las Islas Canarias.

El agua subterránea es un recurso y un componente ambiental importante en gran parte de la Península Ibérica y en los archipiélagos balear y canario y territorios del Norte de África. La recarga total es del orden de 30 km³/a y se utilizan directamente del orden de 7 km³/a. Los valores totalizados peninsulares difieren ligeramente de los que figuran en el Libro Blanco del Agua (MIMAM, 2000) y en Álvarez Rodríguez *et al.* (2016). La escorrentía total en régimen natural se evalúa en aproximadamente 110 km³/a para los ámbitos territoriales peninsulares españoles.

En este artículo no se incluyen tablas ni valores estadísticos sobre el agua subterránea. Estos se pueden encontrar en los documentos de los planes hidrológicos y diversas publicaciones relacionadas, entrando en las direcciones electrónicas de los diversos organismos de cuenca inter e intracomunitarios. El objetivo es comentar las circunstancias especiales en España relativas al agua subterránea que condicionan la situación actual y que hay que gestionar para una evolución futura sustentable y compatible con las situaciones sociales y ambientales. En el reducido espacio disponible no es posible referenciar los numerosos escritos existentes, por lo que se indican frecuentemente trabajos del autor, en especial los de fácil acceso, en los que se incluye una notable selección de referencias de interés para los diferentes aspectos considerados.

Las aguas subterráneas y su contenedor, los acuíferos, son bien conocidas para los especialistas y son objeto de consideración en la rama de las ciencias naturales y de la ingeniería que se denomina Hidrogeología y también Hidrología subterránea, según el énfasis, y que actualmente está bien desarrollada, aunque tiene escasamente dos siglos de existencia y un siglo de desarrollo. Como en todas las ciencias y técnicas en relación con la naturaleza y los recursos naturales, no se trata de valoraciones exactas y precisas, sino que tienen asociada una incertidumbre, que hay que conocer y evaluar y actuar teniéndola en cuenta.

Fuera de los expertos, las aguas subterráneas son en gran manera desconocidas o sujetas a conocimiento desviado por gran parte de la población, incluidos expertos en otras materias relacionadas, gestores, administradores y políticos. Por esa razón se dedica una parte notable del limitado espacio disponible a presentar aspectos generales y conceptuales. Los aspectos científicos y aplicados se desarrollan en los textos Custodio y Llamas (1976/1983) y CIHS (2009), con diversas aplicaciones referentes a situaciones españolas.

CONSIDERACIONES BÁSICAS SOBRE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

En sentido amplio, se considera agua subterránea al agua que se encuentra en los poros, grietas, fisuras y cavidades (poros en sentido lato) que existen en el terreno bajo la superficie. En general hace referencia al agua libre, que es aquella que no está ligada químicamente y que puede fluir cuando se la somete a un gradiente de potencial hidráulico. Cuando en los poros coexisten agua y aire se está en el medio no saturado, en el que ambos fluidos pueden desplazarse como agua o como vapor y donde actúan esfuerzos capilares debido a la tensión interfacial. Por debajo de cierta profundidad en los poros sólo hay agua, se dice que se está en el medio saturado y el agua existente es lo que se denomina estrictamente agua subterránea. El límite superior de la zona saturada es, en primera aproximación, el nivel freático, que separa el medio saturado del medio no saturado o zona vadosa.

En una cierta posición, a una cierta altitud respecto a una determinada referencia, como el nivel medio del mar local, el agua subterránea está sometida a una presión. La altitud del punto más la columna de agua con la densidad local que equilibra la presión es el nivel piezométrico. La energía potencial del agua subterránea es la suma de la expresada por el nivel piezométrico y la que corresponde a la inercia asociada a la velocidad del agua. En la mayoría de las situaciones comunes este segundo término es

de una magnitud mucho menor, de modo que la energía potencial del agua subterránea se mide en la mayoría de situaciones por el nivel piezométrico.

Las variaciones del potencial hidráulico, naturales o por acción humana, hacen que el agua subterránea se mueva desde los lugares de mayor nivel piezométrico a los que lo tienen menor. Se trata en general de velocidades pequeñas, de unos pocos metros por día (m/d) y frecuentemente de cm/d o menos. La excepción son los terrenos con grandes cavidades de disolución (formaciones kársticas) o con grandes fracturas abiertas, en los que el agua puede moverse mucho más rápidamente y donde el término de velocidad del potencial hidráulico puede no ser despreciable.

Los terrenos o formaciones geológicas por los que el agua subterránea puede fluir sensiblemente a los efectos deseados se designan como acuíferos y aquellos en que el movimiento es muy lento, aunque existe, se denominan acuitardos. Se trata de designaciones relativas, de modo que se aplican de forma distinta según sea el objetivo que se busca o la situación que se analiza. Ambos conducen y contienen al mismo tiempo agua subterránea. Un sistema acuífero es un conjunto diferenciado dentro de un territorio, con límites definidos y que contiene acuíferos y acuitardos, además de formaciones geológicas que a efectos prácticos no contienen agua subterránea o que la contienen en poros cerrados o tan pequeños que se puede considerar como agua inmóvil (acuicludos).

La disposición de los acuíferos y acuitardos es tridimensional y responde a la complejidad geológica y sus detalles. El flujo del agua también es tridimensional, por un medio que con frecuencia es heterogéneo y con comportamiento anisótropo. Hay una íntima relación entre agua subterránea y geología y entre flujo y relieve.

Los sistemas acuíferos reciben agua –recarga– en unas partes del territorio, y la transmiten y la descargan en otros lugares, con un régimen que puede ser muy distinto al de recarga y que está amortiguado y diferido. La descarga es el origen de manantiales, incremento del caudal de los ríos, aportación de agua a lagos y humedales en los que se evapora total (sistemas cerrados) o parcialmente, en cuyo caso el caudal restante rebosa o a su vez descarga subterráneamente (lagos y humedales en tránsito). También se puede ceder agua a otros acuíferos laterales o en la misma posición geográfica que el sistema acuífero considerado.

La recarga puede ser difusa o concentrada, según que se produzca sobre una gran superficie o en lugares determinados del territorio, como cauces fluviales, sumideros, lagos, etc. La recarga difusa es principalmente la que se produce por infiltración en el terreno de la lluvia o fusión de nieve y no vuelve a la superficie; tras sufrir evapotranspiración (evaporación de la humedad del suelo y sobre todo traspiración por las plantas), inicia su descenso por el medio no saturado (recarga en tránsito) hasta alcanzar el nivel freático local. Físicamente, este recorrido puede durar desde días a años, según el clima y la profundidad del nivel freático. Aquí hay que diferenciar entre la duración de la transferencia de agua y los cambios piezométricos que produce la recarga, que suelen ser más rápidos.

Para caracterizar un acuífero o sistema acuífero es importante conocer el valor medio y el coeficiente de variación de la recarga y del tiempo de renovación o de tránsito. El primero depende de la climatología, el tipo de suelo, la vegetación y las circunstancias adecuadas para que haya recarga concentrada. El segundo depende además del tamaño del sistema y de su porosidad. La velocidad de cambio en un acuífero ante modificaciones impuestas natural o artificialmente, depende del tamaño, de la porosidad o elasticidad del medio, según los casos, y del producto del espesor saturado por la permeabilidad del medio (transmisividad).

Todo lo comentado anteriormente hace referencia a la cantidad de agua subterránea, o sea al flujo del agua. Pero el agua subterránea contiene sustancias disueltas – está exenta de partículas, salvo situaciones extremas – en su mayoría en forma iónica, excepto la sílice a pH normal y el ácido carbónico a pH bajo. La composición depende de múltiples factores, principalmente la propia aportación disuelta con la recarga concentrada y la difusa (que se evapoconcentra en el suelo, en función del clima y tipo de suelo), la alteración de los minerales del terreno por acción del CO₂ edáfico, el lixiviado de posibles sales solubles del terreno (como en terrenos con yesos o con antiguos salares), la incorporación de aguas salinas (agua del mar actual o relictas) y un conjunto complejo de reacciones hidroquímicas. Además de los aspectos de calidad en relación con la salinidad, están los de la presencia de determinados solutos inconvenientes o tóxicos para la vida humana y animal, como iones del Fe, Mn, As, F, B, etc., cuyo origen es a veces difícil de establecer, pero que frecuentemente guardan relación con clima árido, existencia de sedimentos ricos en materia orgánica, aportes asociados a la actividad volcánica actual o residual y largo tiempo de renovación del agua subterránea. A las situaciones naturales se adicionan las de origen humano por agricultura (evapoconcentración del agua de riego y aporte de fertilizantes y plaguicidas), ganadería, población y uso de sustancias químicas en domicilios y servicios, industria, etc.

Los aspectos de cantidad suelen acaparar la atención en áreas áridas, pero los de calidad son tanto o más importantes y cada vez lo serán más, ya que los métodos de gestión de la cantidad no necesariamente mejoran la calidad y a veces tienen un efecto contrario.

Los problemas de contaminación por causas antrópicas son muy diversos, con similares aspectos a los de otros países, y que aquí no se detallan. Sus aspectos y mecanismos se comentan en Custodio (2013a) y las numerosas referencias incluidas.

El estudio del agua subterránea en España mediante técnicas isotópicas tiene notable tradición. Nació en 1965 en el entonces Gabinete de Aplicaciones Nucleares (GANOP) del CEDEX, impulsado por A. Plata y E. Baonza, aplicando tanto técnicas ambientales como de trazado artificial. Estos trabajos se ampliaron en la Universidad Politécnica de Cataluña y luego se han ido generalizando, y hoy existen distintos grupos en centros de investigación universitarios especializados en la isotopía ambiental del agua, sulfatos y nitratos disueltos y se han realizado numerosas aplicaciones en la península ibérica y los archipiélagos.

RECURSOS DE AGUA SUBTERRÁNEA

El agua subterránea juega un papel ecológico clave y al mismo tiempo es un recurso de agua para atender a las necesidades vitales, económicas y sociales de los seres humanos. Aunque las aguas subterráneas se han venido utilizando desde la más remota antigüedad, en especial en áreas de clima árido, su utilización a gran escala es relativamente reciente, menos de un siglo, y en numerosas áreas sólo algunas décadas. Cuando la extracción artificial de agua de un sistema acuífero es una fracción importante de la recarga, se altera notablemente el sistema de flujo y se puede modificar la calidad. Esto no es ni malo ni bueno sino una realidad a valorar en cada caso bajo determinados puntos de vista, pero teniendo en cuenta que los cambios pueden ser muy lentos, incluso generacionales, y difíciles de observar si no se dispone de medios apropiados. En numerosos lugares del mundo y concretamente de España, la explotación del agua subterránea es intensiva e incluso llega a superar permanentemente la recarga natural y la inducida, con lo que se consumen reservas, lo que también se llama minería del agua subterránea.

En los estudios y planificación de la explotación y uso del agua subterránea es frecuente la utilización de términos, en parte tomados de la Hidrología general, cuya definición no es a veces clara y pueden usarse incorrectamente. Esto tiene consecuencias en las evaluaciones, gestión y en especial en actuaciones administrativo-legales. En Custodio (2021) se aportan y comentan posibles definiciones. Se ha generalizado la utilización del término sobreexplotación, que en España se incluye en el articulado de la Ley de Aguas de 1985, pero es un término impreciso, con tintes negativos que esconden aspectos positivos, cuyo uso debería abandonarse (véase Custodio, 2002).

Es frecuente considerar que los recursos totales de agua subterránea coinciden con la recarga y lo que se denomina recursos disponibles a lo que resulta de descontar de la recarga total una cantidad para mantener caudales mínimos en ríos y manantiales, estabilizar niveles y extensión en lagos, lagunas y humedales y limitar la intrusión marina en acuíferos costeros. No se consideran explícitamente las variaciones naturales en la disponibilidad temporal para satisfacer demandas de agua, lo que es sólo razonable en sistemas acuíferos con largo tiempo de renovación. Un aspecto importante a tener en cuenta es que en situaciones de interacción entre aguas superficiales y aguas subterráneas la recarga no es una propiedad del sistema en un determinado lugar, sino que depende del estado de explotación y la ubicación relativa de las extracciones. También en sistemas con recarga difusa el valor puede modificarse al descender el nivel freático y con ello la toma de agua del medio saturado por la vegetación o por evaporación difusiva.

Hidrologicamente, la reserva de agua de un acuífero o sistema acuífero hace referencia al volumen de agua contenido. Se distingue entre la que corresponde a la porosidad total de la que es susceptible de ser extraída, que es la total menos la que queda retenida por fuerzas capilares o atrapada en poros cerrados cuando el medio pasa de saturado a no saturado. Una parte de las reservas extraíbles es renovable y otra parte lo hace con lentitud y no interviene a efectos prácticos en el transporte de masa, salvo a largo plazo. Este largo plazo frecuentemente puede ser de décadas a milenios, según el tamaño y características del acuífero. Sin embargo, en la administración del agua se considera reserva a un volumen de agua anual para asignaciones a demandas, lo que crea confusión terminológica. Se entiende por transporte de masa (de soluto) el movimiento de las sustancias disueltas en el agua subterránea a causa del flujo y por fenómenos difusivos y dispersivos.

EL AGUA SUBTERRÁNEA EN ESPAÑA

Los acuíferos

El territorio español, tanto el peninsular como el insular y de las ciudades autónomas del Norte de África, es muy diverso geológicamente y está notablemente fragmentado. Eso conlleva que no existan extensos acuíferos de dimensiones continentales, sino acuíferos de tamaño medio y pequeño, es decir desde algunos km² hasta algunos miles de km², pero muchas veces notablemente permeables y con gran espesor. El carácter montañoso del territorio favorece la existencia potencial de notables gradientes hidráulicos y que muchos sistemas acuíferos sean un conjunto acoplado de montaña y llano, dentro de un espacio distintamente poblado y con cambiantes actividades socio-económicas. Esto tiene gran importancia en la planificación hidrológica y territorial y en la preservación de recursos para abastecimiento humano.

La información geológica, geomorfológica, altitudinal, meteorológica, climática y de suelos y de vegetación es en general buena desde hace tiempo (ITGE, 2000; IGME-DGA, 2012). Esto aporta buenas bases para la identificación de los acuíferos y de los sistemas acuíferos, aunque la información geológica y de propiedades hidrogeológicas en profundidad es en muchos casos insuficiente. Las variaciones territoriales son muy notables, por lo que el conocimiento hidrogeológico requiere numerosos reconocimientos, estudios y observaciones temporales.

A grandes rasgos, la España peninsular se puede dividir en un dominio de carbonatos (centro, este y sureste) fracturados y frecuentemente karstificados, un dominio de sedimentos areno-limosos (centro y suroeste) y un dominio de rocas duras compactas tipo granitos y esquistos (norte y noroeste). La parte centro, este y sur es de clima semiárido mientras que el norte y noroeste es templado y relativamente lluvioso. En las Islas Baleares dominan los acuíferos en carbonatos y los acuíferos de las Islas Canarias son materiales totalmente asociados al volcanismo relativamente moderno y reciente.

IMPORTANCIA, EVOLUCIÓN Y ESTADO DE UTILIZACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN ESPAÑA

Aspectos hidrogeológicos y conocimiento

Aunque en España el conocimiento y estudio de las aguas subterráneas ha sido algo tardío en relación a los países de su entorno europeo y de Norteamérica, existen ya documentos de contenido descriptivo desde el siglo XVI y aportaciones conceptuales desde la segunda mitad del siglo XIX, como se resume en Custodio (2013b) y las referencias contenidas en ese trabajo. Se parte de estudios referentes a las características y calidad de las aguas de algunos manantiales singulares. Los aspectos hidrogeológicos llegan más tarde. La denominación hidrogeología y sus variantes ya se utilizan desde mediados del siglo XIX. La importancia del agua subterránea en España ya fue establecida por Llamas (1967).

En el ámbito oficial, en un país con gobierno notablemente centralizado, las aguas subterráneas no fueron objeto de atención como recurso hasta mediados del siglo XX y su ámbito quedó en actuaciones en relación con aspectos administrativos mineros. La posible desidia de la administración pública del agua ha sido atribuida por M.R. Llamas al fracaso en el nuevo abastecimiento de agua a Madrid a mediados del siglo XIX mediante pozos profundos, al modo de lo realizado anteriormente en París.

La explotación del agua subterránea se realizó principalmente por iniciativas privadas, para el propio abastecimiento, para dar servicio a algunas grandes poblaciones para las que la captación de manantiales no bastaba, o para su venta o suministro bajo acuerdos económicos. Así, a finales del siglo XIX ya existían abastecimientos con agua subterránea a Barcelona y con agua surgente (artesianas) a muchas casas de Prat de Llobregat, en el delta del Llobregat. En las islas volcánicas de Gran Canaria y en especial en Tenerife se desarrollaron captaciones de agua subterránea mediante galerías drenantes en áreas de medianías y sobre todo de cumbres y en Gran Canaria mediante pozos profundos de gran diámetro con maquinaria accionada por vapor. Las consecuencias son situaciones de explotación importante, que se fue convirtiendo en intensiva en esos lugares y otros diversos lugares del noreste y este peninsular, islas Baleares (en especial Mallorca) y las Islas Canarias. Esto se describe en detalle en MASE (2015) y las numerosas referencias que contiene. El desarrollo de las explotaciones de agua subterránea estaba limitado por el coste

y dificultad de la construcción del pozo y la posibilidad de extraer mecánicamente el agua a caudales de interés y a veces desde notables profundidades.

La introducción de la perforación mecánica de pozos y la introducción de las bombas centrífugas accionadas por eje y más tarde de motor sumergido a partir de 1930-1940 cambió grandemente el panorama y se generalizó la construcción de pozos, principalmente para regadío. En ello tuvo gran relevancia el ejemplo inductor de las realizaciones promovidas tras la guerra civil por el entonces Instituto Nacional de Colonización. En otros lugares el desarrollo de las aguas subterráneas fue para el abastecimiento industrial, como en el Barcelonés y el Delta del Llobregat y más tarde en el Camp de Tarragona, y para abastecer urbanizaciones costeras.

El conocimiento hidrogeológico tiene varios hitos importantes, principalmente en el periodo 1960-1980. En el entorno de Barcelona, en los deltas y valles bajos de los ríos Llobregat y Besós se llevó a cabo el primer estudio con base científica por el Servicio Geológico de Obras Públicas (SGOP), hoy extinto, y la Comisaría de Aguas del Pirineo Oriental, hoy en la Agencia Catalana del Agua. Estos trabajos se extendieron después a todo el Pirineo Oriental (actualmente Cuencas Internas de Cataluña) y se prologaron hasta una propuesta preliminar de planificación hidrológica. También, el SGOP, junto con el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX y UNESCO, realizaron un pionero y trascendente estudio de los recursos de agua subterránea de las Islas Canarias. El Instituto Geológico y Minero de España (IGME) junto con la FAO (Naciones Unidas) estudiaron el Bajo Guadalquivir y sentaron las bases de los posteriores detallados estudios de los acuíferos de Doñana (Huelva y Sevilla). El IGME lanzó el Plan de Aguas Subterráneas (PIAS) y el SGOP una notable serie de estudios de acuíferos bajo la denominación de Recopilación y Síntesis (RyS). En Mallorca, el SGOP y el IGME realizaron un detallado estudio de los acuíferos que llevó a un primer plan orientativo de planificación. En todos estos procesos debe destacarse la labor impulsora del Dr. M. Ramón Llamas, que además organizó un Curso Internacional de Hidrología Subterránea para formar los expertos en agua subterránea que se necesitaban y exportar la experiencia a otros países, principalmente a Iberoamérica. Esta actividad fue la semilla de otras y de la incorporación de la universidad y algunos centros de investigación a los estudios e investigación en hidrogeología. Está actualmente en proceso de extinción por falta de interés de algunas de las autoridades universitarias y administrativas.

La explotación cada vez más intensiva del agua subterránea produjo notables beneficios económicos privados y sociales a corto plazo y fue un motor de desarrollo, que en buena parte creció y funcionó al margen de la administración del agua, en el dominio privado, pero sin visión de futuro en cuanto a sustentabilidad de la captación de agua y de las actividades asociadas y promovidas. La situación de explotación no regulada, con algunas excepciones, duró hasta la década de 1990 y algunos coletazos aún perduran. Las consecuencias negativas no tardaron en aparecer y aún costó más que se observase y se midiesen las externalidades negativas por la administración pública, los propios explotadores y la conciencia ciudadana.

En la década de 1960 ya se produjo una notable salinización de los acuíferos del entorno de Barcelona, con abandono de captaciones de abastecimiento y traslados de industrias, y en la década de 1970 el agua disponible para abastecimiento en la costa de Tarragona llegó a ser tan salina que apenas servía más que para usos sanitarios y lavado, siempre con serios efectos de corrosión. Situaciones similares se encontraron en el entorno de Palma de Mallorca y de Telde y Las Palmas, en Gran Canaria, por sólo citar algunos casos. Los diferentes aspectos de la intrusión marina en parte de los acuíferos españoles se detallan en SASMIE (2017) y las referencias que contiene.

Los grandes desarrollos agrícolas del este español, en especial en Alacant (Alicante), cuenca del río Segura (Campo de Cartagena, Vega del Guadalentín, bajo y medio Segura), Almería y Granada, han estado apoyados o sustentados por una explotación intensiva de los acuíferos, con descensos del nivel piezométrico en algunos casos de varios centenares de metros y consumo permanente, no sustentable, de reservas, y también de salinización marina o por retornos de riego. El consumo de reservas se estima en unos 15 km³/a. En Gran Canaria y Tenerife también se han ido consumiendo reservas, a una tasa de aproximadamente 1 km³/a, en especial a causa de la especial circunstancia de la importancia de las galerías en Tenerife, donde la explotación es no sustentable a medio plazo (MASE, 2015).

Aunque la visión anterior tiene una apariencia desoladora, no representa bien al patrimonio de aguas subterráneas español, ya que numerosos acuíferos están en relativo buen estado cuantitativo, otros han mejorado con actuaciones diversas, la tendencia a la gestión integrada de los recursos de agua y la incorporación de nuevos recursos, como el agua usada regenerada para regadío e

industria o la desalinización del agua marina en la costa, y complementariamente la reducción de salinidad (desalobración) una vez resuelta la evacuación segura de las salmueras resultantes (SASMIE, 2017).

Recarga y balances de agua subterránea

El suficiente conocimiento y la adecuada gestión cuantitativa de los acuíferos y los sistemas acuíferos requiere una adecuada cuantificación de los términos del balance de agua, como se detalla en RAEMIA (2019) y las numerosas referencias que contiene. Este es uno de los retos más difíciles de la hidrogeología, pero que debe abordarse, al tiempo que se evalúa la incertidumbre asociada y el modo de disminuirla en la parte que es posible, mediante observaciones y estudios acordes con la importancia relativa de las aguas subterráneas en cada situación real.

Se suele poner el énfasis en la evaluación de la recarga difusa y concentrada, pero similar importancia tiene la cuantificación de la descarga. La descarga tiene términos difíciles de evaluar, como la que se produce a ríos o por evapotranspiración freática, y en especial por las extracciones. Estas extracciones pocas veces son medidas y hay que proceder a una estimación indirecta; los valores declarados pueden diferir mucho de los realmente extraídos y la administración suele no considerar las captaciones no legalizadas o no declaradas, que pueden ser numerosas o desconocidas. Este es un importante problema en España, a pesar de las obligaciones legales y las grandes actuaciones administrativas, a las que se las puede calificar de fracaso parcial, a pesar de los esfuerzos humanos y económicos empleados para mejorar el conocimiento científico, reducir la incertidumbre y mejorar los datos, como en el acuífero de Doñana y en la Mancha Oriental, donde sí que se ha avanzado en la aplicación del mejor conocimiento a la gestión en lo que respecta a la cuenca del Júcar (Sanz *et al.*, 2016),

Para la evaluación de la recarga natural difusa de los acuíferos se han utilizado diversos códigos y modelos de cálculo (capítulos 3 y 4 de RAEMIA, 2019). Para intentar calibrar los resultados con las series de observaciones disponibles, que en general son cortas y escasas, la respuesta de los acuíferos se deduce de modelos unicelulares o con pocas celdas, con lo que únicamente se consigue una primera aproximación al régimen de recarga. Son raras las situaciones en que se acopla un modelo de evaluación de la recarga a un modelo del comportamiento del acuífero o sistema acuífero, tanto de flujo como considerando transporte de masa, dado que ello requiere un esfuerzo que sólo puede estar justificado en casos determinados, como en el sistema del Baix Llobregat (Barcelona) o Doñana (Huelva y Sevilla). Esta situación es común a nivel mundial. Una complicación adicional aparece cuando la cuenca de agua subterránea (límites del acuífero más la superficie que contribuye a la recarga) no coincide con la de aguas superficiales. Es una situación frecuente en las formaciones de carbonatos o algunas extensas formaciones detríticas españolas, como las de La Mancha.

A nivel peninsular español, el modelo más utilizado para la evaluación de los recursos de agua y secundariamente de la recarga ha sido el modelo conceptual y cuasi distribuido SIMPA, originado en la Universidad Politécnica de Valencia y desarrollado por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (Estrela y Quintas, 1996; Álvarez *et al.*, 2004). Esta modelación se realizó en primera instancia para el Libro Blanco del Agua (MIMAM, 2000) y utilizó información del Libro Blanco del Agua Subterránea (MOPTMA-MINER, 1994) y la abundante información al respecto desarrollada por el IGME (IGME, 1993). El modelo SIMPA tiene un paso de tiempo mensual y divide el territorio en celdas de 1 km × 1 km (actualmente 0.5 km × 0.5 km). Para todo el territorio utiliza cuatro parámetros básicos: capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo, coeficiente de excedente (proporcionalidad entre el déficit de almacenamiento en el suelo y el umbral de escorrentía), capacidad máxima de infiltración en mm/mes y coeficiente de recesión (agotamiento) de los acuíferos. Si se fija el valor del coeficiente de excedente, el número de parámetros se reduce a tres. Para la calibración se utilizan estaciones de aforo o embalses. La distribución espacial de los puntos en que se apoya la parametrización es poco densa e irregular, por lo que los resultados no se pueden utilizar a nivel de detalle, aunque sean aceptables en el contexto general. El modelo PATRICAL (Pérez Martín, 2005), que considera balances de masa, es una extensión aplicada en la cuenca del Júcar (Xúquer) y que se ha utilizado en otras cuencas (Duero).

El código y modelo BALAN y sus variantes, desarrollado inicialmente en la Universidad Politécnica de Cataluña y en la Confederación Hidrográfica del Ebro y mantenido y ampliado por la Universidad de A Coruña (Samper *et al.*, 1999; 2005) es una herramienta muy utilizada a nivel diario a distintas escalas espaciales, con buenos resultados. Existen modelos empíricos

desarrollados en diversos centros (Andreo *et al.*, 2004), algunos para su aplicación en sistemas de carbonatos de montaña (sistemas kársticos), aunque hay dudas sobre su aplicabilidad en condiciones distintas a las de desarrollo (RAEMIA, 2019).

A nivel peninsular español y también en estudios de mayor detalle local e insular, se ha trabajado en la evaluación de la recarga por balance en el suelo de la deposición total de cloruro atmosférico, principalmente en la Universidad Politécnica de Cataluña conjuntamente con otros organismos, desarrollando los principios (RAEMIA, 2019) e introduciendo el concepto de recarga en ladera (Custodio y Jódar, 2016) para tener en cuenta la existencia de mezcla de aguas subterráneas en el momento de muestreo. Se ha cartografiado la recarga media en la parte española de la Península Ibérica junto con la estimación de la incertidumbre asociada intrínseca y asociada a la distribución heterogénea de los datos y series cortas de observaciones (Alcalá y Custodio, 2014 y 2015).

Composición y calidad del agua subterránea

Los principales problemas de salinidad natural del agua subterránea en España son los relativos a la intrusión marina en áreas costeras y la salinización climática.

La intrusión marina ha sido estudiada repetidamente. Un estudio detallado se ha realizado en SASMIE (2017), que reúne los conocimientos previos, incluyendo la debida a las extracciones de agua subterránea. Ha llegado a ser un problema muy serio en numerosas áreas del noreste y este peninsular, principalmente en los acuíferos costeros catalanes y de Castelló, en Baleares y en determinadas áreas de Gran Canaria. La situación en Tarragona y su entorno llegó a ser inadmisibles en las décadas de 1970 y 1980, y en el Barcelonés y delta del río Besós en las décadas de 1960-1970, con notables perjuicios sociales y daños a las instalaciones domésticas e industriales. En muchos de los lugares afectados, la importación al área afectada de recursos externos o la migración industrial, ha paliado el problema, con coste económico y social elevado y con pérdida de captaciones y de la capacidad de regular los recursos de agua mediante el uso de los acuíferos. En algunos lugares, como en la Vall d'Uixò (Castelló), el alejamiento de captaciones y la reducción de extracciones ha tenido cierta eficacia. En el Delta del Llobregat (Barcelona), donde la intrusión marina afectó al tejido industrial y al abastecimiento a población, se ha instalado una línea (barrera) de pozos de inyección en pozos de agua regenerada con alto grado de depuración, para limitar la salinización, que opera en las situaciones de grandes extracciones por sequía, para proteger las reservas de agua subterránea para el abastecimiento a Barcelona.

La salinización climática se produce en las áreas más áridas y próximas a la costa, donde la deposición salina por la lluvia es mayor que en el interior del continente. La salinización es debida a la intensa evapoconcentración de la escasa precipitación. Estas situaciones no pasan de ser moderadas en la Península Ibérica, salvo en algunos lugares de la provincia de Almería y de Los Monegros (Zaragoza). Pero son importantes en las áreas más secas de Canarias, donde la precipitación media anual es de 80 a 200 mm/a. Tal sucede en Fuerteventura, Lanzarote y el sureste y sur de Gran Canaria (capítulo 3 de SASMIE, 2017; capítulo 6 de HIRAVOL, 2020).

La salinización por retornos de riego puede llegar a ser importante en algunos acuíferos, como los del Campo de Cartagena, Bajo Segura y Campo de Níjar y empiezan a aparecer en el Campo de Dalías, en especial en el acuífero superior. En estos casos, la salinización va acompañada de altas concentraciones de nitratos a causa de la aplicación de fertilizantes.

Existen algunos problemas de salinización por disolución de sales evaporitas, de carácter localizado, pero que pueden afectar seriamente a los recursos locales de agua subterránea en manantiales y pozos. La mayoría de estos problemas aparecen en el Levante, entre ellos los manantiales de Meliones (Málaga), y están asociados a los sedimentos Mesozoicos del Keuper. Son situaciones de difícil gestión, en especial cuando actuaciones anteriores mal diseñadas han producido alteraciones de difícil reparación, en general por insuficiente conocimiento hidrogeológico y acciones oportunistas.

Son escasas las situaciones en que las aguas subterráneas españolas contienen solutos nocivos para la salud, difícilmente tratables, fuera de las altas concentraciones de las aguas con elevada salinidad. Los problemas asociados a altos contenidos en arsénico son raros. En las numerosas áreas de carbonatos, en especial las vegetadas, las aguas subterráneas son duras e incrustantes. También sucede en acuíferos recargados por retornos de riego cuando abundan los carbonatos en los sedimentos, como en el valle bajo del Llobregat. Ciertos acuíferos en áreas llanas y en aluviales, como en el Empordà (Girona), los contenidos en Fe y a veces también en Mn (delta de La Tordera) son altos y se requiere un tratamiento previo al uso. Una situación especial es la de diversos acuíferos en Canarias, por la asociación con volcanismo reciente y sus materiales. El contenido en sílice disuelta puede ser muy

alto, con generación de incrustación dura muy abrasiva. También el agua subterránea de galerías muy penetrantes puede ser muy bicarbonatada sódica y con alto contenido en flúor, lo que afecta seriamente a su utilización a menos de realizar mezclas o costosos tratamientos previos, como sucede en Tenerife. Es un aspecto en estudio en la isla de La Palma en relación con la extensa área cubierta por ceniza del actual volcán activo de Cumbre Vieja.

En España tiene especial relevancia la contaminación por fertilizantes agrícolas, principalmente por nitrato, que se han venido aplicando con dosis elevadas desde hace varias décadas, tanto en regadíos como en cultivos en secano. En áreas de niveles freáticos profundos, incluso en las laderas de los sistemas montañosos, la contaminación de nitratos es notable y en progreso a medida que la parte que actualmente está en el medio no saturado se incorpora con la recarga a los acuíferos. Los tiempos involucrados son de años a décadas, de modo que una posible moratoria en el uso de abonos nitrogenados no eliminaría el problema durante un largo plazo.

La información sobre los procesos y evolución de la contaminación de las aguas subterráneas es frecuentemente escasa, sesgada y equívoca, al no considerarse el papel de la zona no saturada, de las componentes verticales del flujo en el acuífero y de muestreos en puntos de observación que producen mezclas y no informan tridimensionalmente. La observación es costosa, pero los daños por ser esta inadecuada los superan normalmente y se prolongan en el tiempo.

Los altos contenidos en nitratos no sólo afectan al agua extraída para abastecimiento humano, sino que contribuyen a la eutrofización de aguas superficiales en las que descargan, cuando en estas se encuentran suficientes concentraciones de fosfatos procedentes de vertidos urbanos insuficientemente depurados. En general, las aguas subterráneas no contribuyen a fosfatos ya que la abundancia de carbonatos en el terreno los elimina por coprecipitación. Un caso paradigmático de contaminación de aguas superficiales asociada a los aportes de nitratos por el agua subterránea y de fosfatos por una creciente población con vertidos insuficientemente tratados, es el de la notable degradación del Mar Menor (Murcia), en relación con el Campo de Cartagena. La solución del problema es a largo plazo y requiere, no sólo actuaciones de depuración, sino tiempo para que los fosfatos incorporados a los sedimentos a lo largo del tiempo se eliminen.

Una importante amenaza a la calidad de las aguas subterráneas proviene de la generación de purines en las cada vez más numerosas granjas ganaderas, principalmente las porcinas, que frecuentemente carecen de un tratamiento adecuado. Es un problema real y en expansión, que requiere medidas eficaces de control, más eficaz depuración y posiblemente la clasificación de los acuíferos según un determinado uso preferente del agua, al tiempo que se controla el transporte de masa.

Situación legal y administrativa de las aguas subterráneas en España

Es difícil entender el pasado, presente y futuro de las aguas subterráneas en España sin considerar la situación normativa y administrativa. Véase Fornés *et al.* (2005) y el capítulo VI de MASE (2015). La situación actual en gran parte deriva de la Ley de Aguas de 1879, en la que a grandes rasgos se consideraba a las aguas subterráneas como un dominio privado, conforme con la situación de conocimiento y desarrollo tecnológico de entonces, con apropiación de los caudales captados y escasas limitaciones. Esta situación se mantuvo hasta 1985, cuando ya existían importantes explotaciones y situaciones intensivas e incluso de consumo continuado de reservas (minería del agua subterránea). La Ley de Aguas de 1985 (LA-85) estableció que las aguas subterráneas pasaban al dominio público y debían ser objeto de concesión en competencia con otros posibles explotadores y con el rol ecológico y de generación de servicios ecológicos y quedaban sometidas a planificación hidrológica.

La LA-85 estuvo influenciada por el caótico estado de la explotación intensiva y minera del agua subterránea en numerosas áreas de la cuenca del Segura y también por la experiencia en el entorno de Barcelona y en las islas Canarias y Baleares. Eso se refleja en la inclusión del concepto de acuífero sobreexplotado y las vías de resolver la situación mediante reducciones regladas de las extracciones y la constitución desde la administración del agua de comunidades de usuarios. La llegada de la Ley de Aguas de 1985 fue tardía, cuando ya existía una gran explotación de aguas subterráneas en diversos sistemas acuíferos del este, sureste, centro e insulares, numerosos litigios y la acumulación de denuncias administrativas sin resolver o con difícil solución. De hecho, en algunos lugares ya se habían tomado medidas para intentar un control, tratando de no vulnerar los derechos privados. En Canarias, en 1924 ya se establecieron reglas y limitaciones que afectaban principalmente a la construcción de galerías de agua, las que se completaron y redefinieron en cuanto a registro y responsabilidad por afecciones mutuas en 1958. En el Baix Llobregat (Barcelona)

se extendió la zona de policía de aguas públicas a todo el acuífero. En Baleares se establecieron restricciones a la explotación y construcción de nuevos pozos. La LA-85 se aplica en todo el territorio español excepto en Canarias, donde aquella establecía que, dadas las especiales circunstancias, se debía aprobar una ley de aguas canaria, de la que la LA-85 es subsidiaria y marca los principios generales. Tras un intento de aprobación fallido por exceso de limitaciones a la explotación, finalmente se aprobó la Ley de Aguas de Canarias en 1990.

Dentro de estas circunstancias, no se puso atención ni se abordó una reglamentación de la perforación de pozos, tanto para usuarios como para constructores, como ya empezaban a tener otros países, y sigue sin establecerse, a pesar de las reiteradas proposiciones por parte de instituciones, como el Grupo Español de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos.

La aprobación de la Directiva Marco del Agua (DMA) europea en el año 2000 es un importante hito legal que se ha transpuesto por cada país miembro a su normativa de aguas. En España es el Texto Refundido de la Ley de Aguas (TRLA) de 2003. La DMA tiene una orientación predominantemente ambiental y busca el buen estado ecológico de las aguas en todo el territorio europeo y obligando a la administración de cada uno de los estados miembros a una planificación sexenal del agua y las acciones necesarias. Este objetivo ambientalista, para las aguas subterráneas se traduce en lograr lo que se define como buen estado cuantitativo y buen estado químico. El TRLA mantiene la mayor parte de los principios y regulaciones de la LA-85, aunque el concepto de acuífero sobreexplotado, queda tácito.

Según la LA-85, toda nueva explotación de agua subterránea debe ser objeto de una concesión administrativa. Los titulares de derechos privados previos podían pedir su transformación en una concesión o bien mantenerse como tales con una inscripción en un catálogo y sin poder modificar sus características. La realidad es que pocos explotadores de agua subterránea optaron por la concesión, muchos se limitaron a solicitar la inscripción y otros muchos simplemente ignoraron la normativa. Para forzar las concesiones era preciso expropiar derechos, mal conocidos y a veces dudosos legalmente, para los que no se disponía de recursos económicos. Esto ha creado notable confusión, aumentada por la lentitud administrativa, acumulación de recursos contra resoluciones y principalmente por desconocimiento previo de los caudales y características de las explotaciones. A pesar de numerosos y costosos esfuerzos para resolver la situación, la confusión continua. Esto se ha utilizado para justificar la falta de adecuado control y gestión de la explotación de las aguas subterráneas y el logro del buen estado, amparándose en argumentaciones administrativas poco sólidas, que en el fondo esconden falta de voluntad política y la desconfianza de los administrados en la administración del agua. Es un lastre desde hace casi medio siglo, aunque el tiempo transcurrido tiende a amortiguarlo por desistimientos o por adquisición de derechos por los poderes públicos en casos de interés especial, como en la Mancha, Alto y Medio Vinalopó (Alacant) y Doñana.

Planificación hidrológica y aguas subterráneas en España

La planificación hidrológica en España nace de lo dispuesto en la LA-85, con algunos precedentes, como el PIAS (Plan de Investigación de Agua Subterráneas) realizado por el IGME, y de actuaciones en territorios diversos, como en el Pirineo Oriental, Baleares y Canarias. Inicialmente, los planes estaban orientados a solucionar problemas mediante el incremento de la oferta de agua, con preferencia a la gestión de la demanda y a la atención a las situaciones relativas a la calidad. Las aportaciones al conocimiento fueron relevantes y un inicio de las actividades de observación por los organismos de cuenca, la que anteriormente realizaba el IGME, de motu propio o por encomienda. Se definieron unidades hidrogeológicas, en buena parte basadas en trabajos previos del IGME y del SGOP y de diversos trabajos realizados por las universidades. Esto se refleja en el llamado Libro Blanco del Agua Subterránea (MOPTMA-MINER, 1994) y posteriormente en el Libro Blanco del Agua (MIMAN, 2000).

A partir del año 2009, la planificación ha adoptado las directrices medioambientales de la Directiva Marco del Agua europea en la búsqueda del buen estado de las masas de agua, entre ellas las subterráneas (MASb). Configura los horizontes de planificación 2009-2015, 2016-2021 y 2022-2027, con documentos aprobados al principio de cada ciclo de planificación. En España, los planes del primer ciclo no fueron aprobados hasta el final del periodo. Los del segundo ciclo estuvieron en su mayoría disponibles a finales de 2015 y en el fondo son una extensión de los anteriores por falta de tiempo para obtener nuevos datos y elaborarlos y por deficiencias en la adquisición de información. Actualmente (otoño de 2021) se dispone de los documentos preliminares del tercer ciclo, en fase de discusión pública. El objetivo inicial de lograr el buen estado en 2015 se ha ido difiriendo en algunos

acuíferos y probablemente no se logre en 2027; hay que tramitar excepciones por razones económicas y sociales, suficientemente argumentadas. Para ello aún faltan estudios y observaciones.

La DMA y su transposición en el TRLA introdujeron un cambio importante al establecer que en las cuencas hidrográficas, las grandes unidades básicas, la gestión administrativa se debía hacer definiendo masas de agua. Desde entonces, la planificación y gestión relativa a las aguas subterráneas se hace según las masas de agua subterránea (MASb), a veces definidas con escaso sentido hidrogeológico. Las MASb son unidades administrativas a los efectos del cumplimiento de lo regulado en la DMA, pero los estudios hidrogeológicos han de basarse en las unidades hidrogeológicas referidas a los sistemas acuíferos, las que pueden quedar dentro de una cuenca hidrográfica o extenderse por más de una. La administración del agua ha centrado más la atención en cumplir con lo dispuesto en las diferentes MASb que en la hidrología subterránea, lo que puede comportar visiones distorsionadas, actuaciones no equitativas territorialmente y en cuanto a la antigüedad de derechos. No es raro que el administrado se sienta a veces indefenso.

El contenido y presentación de la documentación de los distintos planes hidrológicos está regulada por la Instrucción de Planificación Hidrológica española (BOE, 2007), que se adapta a la normativa europea a través de la Directiva Marco del Agua y que se concreta en la Instrucción de Planificación Hidrológica (IPH) española (BOE, 2008), y las disposiciones complementarias posteriores. Las referencias a los acuíferos son a veces escasas. Esta normativa se aplica específicamente en las cuencas intercomunitarias y por extensión en las intracomunitarias. En estas últimas, las comunidades autónomas pueden aplicar normas propias, como se hace en Cataluña, además de las que se derivan de la Ley de Aguas de Canarias. La Dirección General de Aguas (DGA) es el órgano coordinador de los organismos de cuenca intercomunitarios, con lo que la visión que proporciona es parcial para un conjunto español entrelazado, incluyendo la parte insular y de plazas en el norte de África, por lo menos a través de inversiones, consideraciones económicas y sociales y compartir tecnologías. Aunque la DGA tiene también una función general, la realidad es que sólo la ejerce parcial e incompletamente. La visión y valoración conjunta es necesaria cuando se propone que los déficits de agua de una cuenca, incluida la exploración intensiva y minera del agua subterránea, se salden por transferencia de agua de otras cuencas, y no solo por la cantidad de agua, sino por la calidad, prolongación de situaciones de minería de agua subterránea, uso de otros recursos (como reutilización y desalinización), inversiones y garantía de suministro.

La normativa europea, y por tanto la española, pone especial énfasis en considerar los efectos del cambio climático, aunque apenas hace alusión al posiblemente más preocupante cambio global. La tendencia es a disminuir la recarga y los recursos disponibles de agua subterránea, pero son escasos los estudios de simulación de los cambios en la recarga a los acuíferos y en la evaluación de la incertidumbre de la recarga difusa y concentrada y en los intercambios río-acuífero. Estrela *et al.* (2012) estimaron el impacto del cambio climático en los recursos de agua españoles y Álvares *et al.* (2009) lo estiman para la cuenca del Ebro y sus acuíferos, entre otros estudios.

En la planificación hidrológica se define para las MASb que el recurso disponible es la diferencia entre los recursos renovables (recarga por la infiltración de la lluvia, recarga por retorno de regadío, pérdidas en el cauce y transferencias desde otras masas de agua subterránea) y los flujos medioambientales requeridos para cumplir con el régimen de caudales ecológicos y para prevenir los efectos negativos causados por la intrusión marina.

La planificación de las aguas subterráneas pone énfasis en la modelación de los recursos, si bien la herramienta de base, el código y modelo SIMPA no es el más apropiado, como ya se ha comentado, sin que ello menoscabe su utilidad y la de otros programas relacionados. Se pide que se especifiquen las posibilidades de extracción y las relaciones río-acuífero de las distintas masas o grupos de masas de agua subterránea, considerando las restricciones en los balances por razones ecológicas – de buen estado cuantitativo y químico para las aguas subterráneas –, respetando la supremacía del uso para abastecimiento de poblaciones. La satisfacción de las demandas ha de seguir los criterios de prioridad establecidos en el plan hidrológico, desde una perspectiva de sostenibilidad en el uso del agua.

Actuaciones de gestión técnica de las aguas subterráneas y utilización conjunta

Las necesidades de gestión del agua subterránea en España es muy variable en el territorio español dadas sus muy distintas circunstancias, de acuerdo con las diferencias hidrogeológicas, climáticas, de población y agrícolas. En las áreas más húmedas del noreste, donde la utilización de las aguas subterráneas se limita en gran manera a la captación de pequeños manantiales con cortos

tiempos de renovación, la gestión se centra en el aumento de la garantía de suministro mediante sondeos complementarios y en la protección contra la contaminación por la población, agricultura y ganadería, y más recientemente de las granjas. En las áreas semiáridas la gestión tiene como objetivo principal, además del de preservar los bienes ecológicos y los servicios que se derivan, el hacer sustentable la explotación y mantener la calidad, considerando la posible intrusión y afección salina, los retornos de riego y el riesgo de fácil contaminación de las formaciones de carbonatos en las extensas áreas de calizas.

Allí donde dominan los problemas en relación con la explotación intensiva e incluso de reservas de los acuíferos, y donde existen problemas serios de intrusión marina, la tendencia ha sido la de importar recursos de agua de otras áreas, incluyendo el transvase entre cuencas, y más recientemente la reutilización y la desalinización del agua de mar, con sustitución de caudales extraídos del acuífero. Esta sustitución se ha conseguido fácilmente cuando el problema es de salinidad, pero más difícilmente en el caso de la cantidad, ya que los nuevos recursos muchas veces han acabado usándose directa o indirectamente para ampliar regadíos o abastecer expansiones urbanas, principalmente turísticas. Salvo excepciones, el control de la administración del agua ha sido poco eficaz, por falta de medios, escaso apoyo político y a veces connivencia. Las actuaciones exitosas están a veces asociadas a costes económicos altos. Tal es el caso del Alto y Medio Vinalopó (Alacant).

Las acciones de gestión basadas en una reducción de la demanda de agua subterránea son escasas, de difícil implementación y aceptación y con falta de experiencia real. El notable encarecimiento de la energía para extraer el agua cada vez desde mayores profundidades, que en otras áreas del mundo ha tenido alguna eficacia indirecta, no lo ha sido tanto en España. Ha jugado un papel en la Mancha Occidental y en Gran Canaria, pero escaso en el este y sudeste peninsular, donde los cultivos intensivos son aún posibles, con otros limitantes económicos.

Como en diversas regiones semiáridas o con grandes concentraciones de población, servicios e industria, la gestión de los acuíferos, en cantidad y calidad, no es un objetivo aislado sino integrado con los otros recursos de agua. Para su eficacia, la titularidad de los recursos de agua, pública o privada, debe estar concentrada en unos pocos actores con capacidad de llegar a acuerdos de actuación conjunta. La frecuente numerosa repartición de derechos de explotación y uso de las aguas subterráneas, incluyendo los que representan a los valores ecológicos, no facilita la integración de los acuíferos en la gestión conjunta de los recursos de agua, de modo que un paso previo es la difícil tarea de conseguir una representación adecuada. En España, esto ha limitado el uso conjunto de aguas subterráneas y otros recursos de agua a pesar de los diversos intentos para llevarlo a cabo, incluso con modelación para apoyo a la toma de decisiones, como la que se realiza con el modelo AQUATOOL desarrollado por la Universidad Politécnica de Valencia (Andreu, 1996), aunque la experiencia de la consideración de las unidades acuíferas es aún limitada, a pesar de disponerse de las herramientas matemáticas necesarias. No se ha logrado implementar ese uso conjunto en las condiciones favorables de Gran Canaria y Tenerife. Un caso bien implementado de uso conjunto es el del Baix Llobregat (Barcelona), que incluye el sistema acuífero, el río Llobregat y sus embalses, el trasvase Ter-Llobregat, reutilización, recarga artificial, desalinización del agua del mar, inyección de control de la intrusión marina y tratamiento avanzado de la calidad del agua local y del Llano de Barcelona (capítulo 3 de SASMIE, 2017).

La recarga artificial, sea esta inducida, favorecida y mediante balsas y pozos, forma parte de las técnicas de gestión, bien conocidas a nivel mundial, que requieren disponer de agua con suficiente cantidad, adecuada temporalidad, calidad y turbidez. Se busca el almacenamiento temporalmente o el tratamiento por infiltración en el terreno, preferentemente a través del suelo (DINAMAR, 2010; Custodio, 1986). Puede ser relativamente costosa, requiere mantenimiento y un plan de gestión del acuífero. En España se han realizado diversas experiencias, pero sólo las del acuífero de Los Arenales (Castilla-León) y principalmente las del Baix Llobregat y áreas próximas son operativas. Estas últimas comenzaron en 1949 y actualmente incluyen escarificado del cauce del río, balsas de infiltración y pozos profundos (Queralt *et al.*, 2020).

Un aspecto especial de la recarga, que es relevante para muchos acuíferos, es la infiltración de retornos de riego, en especial en áreas de vega y bajas a las que se aporta agua de riego procedente de otros lugares. Es algo importante en la Vega del Segura y en el Campo de Cartagena tras el trasvase Tajo-Segura o el aporte de agua minada de acuíferos profundos, y en las Planas de Castelló y Valencia, y fue esencial –aún es importante– en el valle bajo del Llobregat (capítulo 3 de SASMIE, 2017). La principal problemática asociada es la de la salinidad, que depende de la del agua de riego y de la eficiencia de riego, y la de la incorporación de nitratos y de agroquímicos no retenidos por el suelo y que no se degradan rápidamente. Las actuaciones de reducción de las

dotaciones de regadío y el aumento de la eficiencia del uso del agua por el cultivo pueden tener efectos notables sobre la cantidad y calidad de los recursos de agua de los acuíferos españoles, por modificación de la recarga.

Aspectos económicos, sociales, institucionales y de gobernanza en España

El coste del agua subterránea al usuario es muy variable en el territorio español en función de las condiciones hidrogeológicas y de eficiencia de las captaciones y elementos de bombeo. En general, la energía para la extracción es una de las más caras de Europa y esto penaliza especialmente la captación del agua subterránea allí donde los niveles del agua son profundos, pero también penaliza la depuración de aguas usadas para su reutilización, la desalinización y el transporte de agua desde los lugares en que está disponible a los de utilización. En España, el coste del agua no es normalmente una gran penalización para el abastecimiento urbano e industrial de baja demanda de agua, pero puede serlo para el regadío e inducir el traslado de industrias de alta demanda de agua a otras áreas. En el Levante español, la agricultura de regadío acepta costes/precios del agua del orden de 0.2 €/m³, con una disponibilidad al pago para solucionar déficits de hasta 0.5 €/m³. En explotaciones agrícolas intensivas y grandes extensiones de cultivo en invernaderos y cubiertas, se puede llegar a pagar 0.8 €/m³, que son los costes totales de producción del agua del mar desalinizada en plantas modernas eficientes (capítulo V de MASE, 2015). Sin embargo, esto es sólo aplicable a las demandas costeras próximas a las plantas desalinizadoras. Para los usos en lugares alejados y a mayor altitud, el coste resultante es excesivo y ello explica que se continúe con la explotación intensiva de acuíferos, como en el Altiplano Murciano, el Valle del Guadalentín, el interior de Almería y el Alto y Medio Vinalopó, aun cuando el coste de extracción supera 0.6 €/m³ y en ocasiones 1.0 €/m³. En el norte de Gran Canaria, el coste del agua subterránea permite que el riego en áreas costeras pueda realizarse substituyendo parte del agua subterránea por agua marina desalinizada, incluso por iniciativa privada.

El consumo energético para el bombeo del agua subterránea parece no haber sido estudiado en detalle. Según primeras estimaciones realizadas por el autor para el conjunto español, el consumo energético es inferior al 1% del consumo total, pero puede ser ya notable en determinadas áreas, del orden del 2% en la cuenca media y baja del Segura y del 5% en Gran Canaria. Estas cifras, posiblemente muy poco precisas, son de interés para las actuaciones de ahorro energético a nivel nacional. Podrían justificar el establecimiento de moratorias a la extracción en determinados acuíferos hasta que se eleven los niveles con la recarga natural. Sin embargo, la recuperación natural de algunos acuíferos requiere décadas. La explotación puede cesar por exceso de coste de la extracción si otras limitaciones no actúan antes, como la pérdida de calidad, el secado del acuífero, alto coste de renovar las captaciones o requerimientos legales.

El carácter distribuido de los acuíferos hace que frecuentemente el número de derechos públicos o privados sea grande, en especial cuando el clima es árido y la agricultura no está concentrada, además de los numerosos posibles intereses involucrados. Esto puede hacer difícil la gestión al no ser fácil lograr una representación del conjunto con suficiente voz ante los organismos administrativos y de justicia. Por otro lado, los posibles afectados tienen intereses muy diversos y suelen carecer de una visión global, no acaban de identificar el bien común y carecen de estudios e información. En muchos acuíferos españoles, como en el Campo de Cartagena, la titularidad privada remanente de un derecho de explotación tiene un valor en sí y además puede ser económicamente productivo cuando en momentos de sequía el agua se puede vender a alto precio a otros agricultores que no tienen esos derechos y se han quedado sin acceso a otras fuentes de agua.

Para encontrar una salida a esta situación, la LA-85 disponía la necesidad de formar comunidades de usuarios, con estructura similar a la de las tradicionales comunidades de regantes, para abordar las llamadas situaciones de sobreexplotación. A pesar de los esfuerzos de la administración del agua, no se llegaron a constituir tales comunidades que se pueden designar como “de arriba abajo”, por falta de herramientas legales eficaces y desconfianza de los administrados. Sólo hay unas pocas excepciones, tras acuerdos económicos compensatorios gestionados por la administración del agua, como en el Medio y Alto Vinalopó (capítulo VI de MASE, 2015) y en la Mancha Oriental.

En algunos lugares con explotación intensiva de los acuíferos y buena información procedente de la administración del agua, instituciones y centros universitarios con capacidad de comunicación a terceros, los propios usuarios han sido los promotores de comunidades de agua “de abajo arriba”, en especial cuando los explotadores principales de agua subterránea son empresas de abastecimiento y establecimientos industriales y de servicios, en pequeño número, con mayor formación técnica y menos intereses

personales. La primera de esas comunidades se constituyó en el Baix Llobregat (Barcelona), en 1975, estando aún vigente la Ley de Aguas de 1879, por extensión de la zona de policía de aguas. Se basó en una solicitud de los principales usuarios de abastecimiento e industriales y el asentimiento de los regantes con agua subterránea, a la Comisaría de Aguas del Pirineo Oriental, y la aprobación por la Dirección General de Obras Hidráulicas estatal. Es un ejemplo a nivel mundial que ha resuelto los problemas de extracciones incontroladas y vertidos de residuos contaminantes y ha permitido la gestión integrada de los recursos de agua con una aproximación a la buena gobernanza (capítulo VI de MASE, 2015; capítulo 7 de SASMIE, 2017). Otras comunidades similares se han establecido en su entorno. También el modelo se ha utilizado en otros lugares del este peninsular, con mayor importancia de las extracciones para regadío, pero con éxito más limitado. No se han establecido comunidades de este tipo en los archipiélagos. La diferencia esencial entre estas comunidades y las tradicionales de regantes, con la que comparten algunos elementos estatutarios, es que no se limitan a la gestión y mantenimiento de una concesión de agua y sus obras asociadas, sino que tienen participación en la gestión de los recursos. Para ello disponen de apoyo técnico y tienen la capacidad de evaluar las propuestas de gestión que establece la administración, y pueden compartir herramientas, como modelos hidrogeológicos, y participar en las redes de observación y control y en la policía y denuncias.

CONSIDERACIONES FINALES A MODO DE CONCLUSIÓN Y PROSPECTIVA

La gran variabilidad geológica, orográfica, climática, poblacional, de actividades humanas diversas, de agricultura y ganadería intensivas y social hace imposible una presentación simple de la realidad de las aguas subterráneas en el territorio español. Comprende situaciones desde aquellas en que abundan los recursos de agua y la problemática se limita a la de captar manantiales, aumentar su garantía y proteger la calidad a las de explotación intensiva y con consumo de reservas, con las de notables modificaciones del ciclo hidrológico natural y aguas de salinidad elevada.

Cada situación debe tratarse individualmente, en su contexto real, teniendo en cuenta los condicionantes heredados reales y una visión de futuro que en numerosos casos requiere una integración de recursos de agua, la supeditación de derechos de explotación –independientemente de su calificación legal y administrativa–, a una finalidad de interés común. Esto supone un contexto normativo que resuelva las rigideces administrativas y facilite la gobernanza con la correspondiente participación, vinculación y responsabilidad de los usuarios de las aguas subterráneas. Las situaciones heredadas y de costumbres no tienen por qué ser anuladas, sino encauzadas, y no ser utilizadas como una excusa para la falta de actuaciones o para no eliminar escollos administrativos.

La tradición de explotación de las aguas subterráneas en España es notable y comparable a la de otros países con áreas semiáridas y áridas y un gran desarrollo de regadío y agroindustria, y actualmente también de turismo. En general, los problemas asociados al abastecimiento a la población, servicios e industria son menores, pero requieren infraestructuras asociadas de captación de aguas subterráneas y disponer de reservas en los acuíferos que puedan paliar las consecuencias de sequías prolongadas. Aunque ha habido un cierto retraso respecto a otros países en los aspectos científicos y tecnológicos, que en buena parte han sido superados, si bien se corre el peligro de retroceso si se prolonga la actual escasa inversión en ciencia, tecnología e infraestructura de conocimiento.

El encauzamiento de los problemas presentes de cantidad y calidad de las aguas subterráneas y el adecuado caminar hacia el futuro requiere estudios y observaciones, que en cada caso han de ser proporcionados a la situación que se considera. En España aún hay mucho que hacer en estos asuntos si se quiere evitar actuaciones costosas del pasado y del presente, a veces contrarias a lo razonable, y seguir un camino hacia la sustentabilidad en calidad y cantidad, pero que no suprima de entrada los beneficios de actividades no sustentables planificadas, que permitan una suave evolución. Tal ha sido y es el consumo de reservas de agua subterránea. El coste de los estudios y observaciones suele ser significativo. Una parte debe ser realizado por la administración pública como parte de su obligación de creación de infraestructura de conocimiento, pero otra parte debe ser soportada y aportada por los usuarios que se benefician de las aguas subterráneas, con el adecuado tratamiento fiscal.

En parte del territorio español existen problemas de degradación progresiva de la calidad del agua subterránea, la principal de ellas por el uso generalizado de fertilizantes agrícola, que llevan a un aumento del contenido en nitratos. En los mayores acuíferos, con notables espesores de la zona no saturada, aun con una estricta moratoria en el uso de fertilizantes, el contenido

en nitratos puede seguir aumentando. Las actuaciones para lograr el buen estado químico de las aguas subterráneas pueden ser socialmente muy costosas o imposibles a corto y medio plazo. En estas condiciones, puede ser conveniente clasificar los acuíferos españoles según su utilización, reservando parte de ellos para el abastecimiento humano y dejando los otros para usos agrícolas e industriales y posibles reguladores de aguas regeneradas por recarga inducida o artificial. Esto supone una detallada consideración de los efectos ambientales y un notable cambio en la normativa.

La DMA, a pesar de sus deficiencias y ser a veces inadecuada en determinadas problemáticas españolas, ha impulsado el mejor conocimiento de las aguas subterráneas. Sin embargo, su aplicación requiere disposiciones normativas que permitan, entre otras cosas, la utilización de los acuíferos como infraestructuras naturales para regular los recursos hídricos y paliar el efecto de sequías, una clasificación por usos según la calidad y de modo compatible con el ambiente y la utilización del terreno para el tratamiento avanzado de la calidad del agua. Esto supone una posición menos acatadora y más proactiva por parte del gobierno español frente a la Comisión europea y que las aguas subterráneas no sean utilizadas como arma para logros políticos en otros campos. Los principios éticos y morales tienen un papel relevante en la futura gobernanza, en el bien entendido que ético y moral no es lo mismo que legal y democrático.

AGRADECIMIENTOS

Se agradecen las cuidadosas observaciones de los revisores y sus comentarios, que han posibilitado mejorar notablemente el manuscrito y evitar algunos errores. Muy especialmente se agradece la importante y esencial labor del Dr. M. Ramón Llamas, recién fallecido (17-12-2021), sin la cual el conocimiento y gestión de las aguas subterráneas y de los recursos de agua en general no hubiese alcanzado algunos de los actuales niveles de excelencia.

REFERENCIAS

- Alcalá, F.J.; Custodio, E. 2014. Spatial average recharge through atmospheric chloride mass balance and its uncertainty in continental Spain. *Hydrological Processes*, 28, 218-236. <https://doi.org/10.1002/hyp.9556>
- Alcalá, F.J.; Custodio, E. 2015. Natural uncertainty of spatial average aquifer recharge through atmospheric chloride mass balance in continental Spain. *Journal of Hydrology*, 524, 642-661. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.018>
- Alvares D., Samper, J., García Vera, M.A. 2009. Evaluación del efecto del cambio climático en los recursos hídricos de la cuenca hidrográfica del Ebro mediante modelos hidrológicos. En: *IX Jornadas de Zona no Saturada, ZNS'09*, Barcelona: 499-506, ISBN 978-84-96736-83-2.
- Álvarez, J., Sánchez, A., Quintas, L. 2004. SIMPA, a GRASS based tool for hydrological studies. *Proc. FOSS-GRASS Users Conference*. Bangkok: 1-14.
- Álvarez Rodríguez, J., Barranco Sanz, L.M., García Bravo, N., Potenciano de las Heras, A., Villaverde Valero, J. 2016. *Evaluación de los recursos hídricos en España*. Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX). Madrid: 1-187.
- Andreu, J., Capilla, J., Sanchís, E. 1996. AQUATOOL: A generalized decision support system for water-resources planning and operational management. *Journal of Hydrology*, 177, 269-291. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02963-X](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02963-X)
- Andreo, B., Vías, J., López-Geta, J.A., Carrasco, F., Durán, J.J., Jiménez, P. 2004. Propuesta metodológica para la estimación de la recarga en acuíferos carbonáticos. *Boletín Geológico y Minero*, 115(2), 177-186.
- BOE 2007. Real Decreto 907/2007, de 6 de Julio, por el que se aprueba el Reglamento de la Planificación Hidrológica. *Boletín Oficial del Estado* 162, de 7/7/2007.
- BOE 2008. Orden ARM/2656/2008, de 10 de septiembre, por la que se aprueba la instrucción de planificación hidrológica. *Boletín Oficial del Estado* de 22 septiembre 2008, 229: 38472-28582.

- CIHS 2009. *Hidrogeología*. Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea. Barcelona: 1-768.
- Custodio, E. 1986. Recarga artificial de acuíferos: avances y realizaciones. *Boletín del Servicio Geológico M.O.P.U.* 45, España: 1-176.
- Custodio, E. 2002. Aquifer overexploitation, what does it mean? *Hydrogeology Journal*, 10(2), 254-277. <https://doi.org/10.1007/s10040-002-0188-6>
- Custodio, E. 2013a. Trends in groundwater pollution: loss of groundwater quality & related services. In: *Groundwater Governance: A global Framework for Country Action*. GEF 10 3726: 1-76. http://www.groundwatergovernance.org/fileadmin/user_upload/groundwatergovernance/docs/Themat.
- Custodio, E. 2013b. The history of hydrogeology in Spain. In: N. Howden, J. Mather: History of Hydrogeology. *International Contributions to Hydrogeology*, 28. International Association of Hydrogeologists. CRC Press: 291–316.
- Custodio, E. 2021. Concepts on groundwater resources. *Boletín Geológico y Minero*, 132(1), 145-152. <https://doi.org/10.21701/bolgeomin.132.1-2.014>
- Custodio, E, Llamas, M.R. 1976/1983. *Hidrología subterránea*. Ediciones Omega, Barcelona: 1-2150.
- Custodio, E., Jódar, J. 2016. Simple solutions for steady-state diffuse recharge evaluation in sloping homogeneous unconfined aquifers by means of atmospheric tracers. *Journal of Hydrology*, 540, 287-305. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.06.035>
- DINA-MAR. 2010. *La gestión de la recarga artificial de acuíferos en el marco del desarrollo sostenible*. Desarrollo tecnológico. Coord. Enrique Fernández Escalante. Serie Hidrogeología Hoy, 6.
- Estrela, T., Quintas, L. 1996. El sistema integrado de modelización precipitación–aportación SIMPA. *Ingeniería Civil*, 104, 43-52.
- Estrela, T., Pérez-Martin, M.A., Vargas, E. 2012. Impacts of climate change on water resources in Spain. *Hydrological Sciences Journal*, 57(6), 1154-1167. <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.702213>
- Fornés J.M., de la Hera, A., Llamas, M.R. 2005. La propiedad de las aguas subterráneas en España: la situación del registro y del catálogo. *Ingeniería del Agua*, 12(2), 125-136.
- HIRAVOL. 2020. *Hidrogeología y recursos de agua subterránea en formaciones e islas volcánicas*. Editado por E. Custodio para UPC-SUEZ-CETAQUA. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona: 2020: 1-1017. <http://hdl.handle.net/2117/347150>
- IGME. 1993. *El agua subterránea en España: estudio sintético*, Informe Técnico. Ministerio de Industria y Energía, Madrid: 1-591. <http://aguas.igme.es/igme/publica/libro20/lib20.htm>
- IGME-DGA. 2012. *Las aguas subterráneas en la planificación hidrológica*. IGME Madrid: 1-481. http://www.mapama.gob.es/es/agua/publicaciones/AGUAS_SUBTERRANEAS_1de7_tcm7-213349.pdf
- ITGE. 2000. *Unidades hidrogeológicas de España: mapa 1:1.000.000 y datos básicos*. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid: 1-34+mapa+CD-ROM.
- Llamas, M.R. 1967. Sobre el papel de las aguas subterráneas en España. *Agua*: 2-19.
- MASE, 2015. *Aspectos hidrológicos, ambientales, económicos, sociales y éticos del consumo de reservas de agua subterránea en España*. Preparado por E. Custodio para UPC and AQUALOGY–CETAQUA. Universidad Politècnica de Catalunya, Barcelona. e-books: 1–487. <http://hdl.handle.net/2117/111272>.
- MIMAM. 2000. *Libro blanco del agua en España*. Secretaría de Estado de Aguas y Costas, Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas, Ministerio de Medio Ambiente. Madrid: 1-637.
- MOPTMA–MINER 1994. *Libro blanco de las aguas subterráneas*. Serie Monografías. Ministerio de Obras Públicas, Transporte y Medio Ambiente / Ministerio de Industria y Energía, Instituto GeoMinero de España. Madrid: 1-135. <http://hispagua.cedex.es/node/66985>.

Pérez-Martín M.A. 2005. *Modelo distribuido de simulación del ciclo hidrológico con calidad de aguas integrado en sistemas de información geográfica para grandes cuencas. Aportación al análisis de presiones e impactos de la Directiva Marco del Europea del Agua*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, España.

Queralt, E., Bernat, X., Custodio, E. 2020. Improving water quantity and quality supply security by managed artificial recharge technologies in the Lower Llobregat aquifers integrated into a conjunctive surface and groundwater management scheme for Barcelona, Spain. *Journal of Environmental Science and Engineering A*9: 119-139. <https://doi.org/10.17265/2162-5298/2020.04.001>

RAEMIA 2019. *Recarga natural a los acuíferos, metodología y soporte de la isotopía del agua. Aplicación a la planificación hidrológica y conocimiento de las aguas subterráneas en España*. Editado por E. Custodio para UPC-SUEZ-CETAQUA. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona: 1-1206. <http://hdl.handle.net/2117/182282>.

Samper, J., Huguet, Ll., Arés, J., García, M.A. 1999. *Manual del usuario del programa Visual Balan V.1.0. Código interactivo para la realización de balances hidrológicos y la estimación de la recarga*. Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, S.A. (ENRESA). Publicación Técnica número 05/99: 1-134.

Samper, J., Huguet, Ll., Ares, J., García-Vera, M.A. 2005. *User's guide VisualBALAN v.2.0: código interactivo para la realización de balances hidrológicos y la estimación de la recarga*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, A Coruña: 1-150.

Sanz, D., Calera, A., Castaño, S., Gómez-Alday, J.J. 2016. Knowledge, participation and transparency in groundwater management. *Water Policy* 18(1), 111-125. <https://doi.org/10.2166/wp.2015.024>

SASMIE. 2017. *Salinización de las aguas subterráneas en los acuíferos costeros mediterráneos e insulares españoles*. Editado por E. Custodio, para UPC y Suez Solutions–CETAQUA, Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona: 1-852. <http://hdl.handle.net/2117/111515>.