

El modelo de flujo de la Loma de Úbeda (España): una herramienta de gestión sostenible y de investigación

Javier Heredia¹; Marisol Manzano²; Antonio González-Ramón³; Lucia Ortega²;

Javier Rodríguez Arévalo⁴; David Muñoz de la Varga⁴

¹ Instituto Geológico y Minero de España, Ríos Rosas 23, 28003 Madrid, España.

² Universidad Politécnica de Cartagena, Paseo Alfonso XIII 52, 30203 Cartagena, España.

³ Instituto Geológico y Minero de España, Urb. Alcázar del Genil 4, 18006 Granada, España.

⁴ Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Paseo Bajo Virgen del Puerto 3, 28005 Madrid, España.

Mail de contacto: j.heredia@igme.es

RESUMEN

El Sistema Acuífero Profundo de Úbeda (España) se explota para el riego del olivar de la Loma de Úbeda, cuya producción destaca mundialmente. El sistema es complejo: estructura multicapa, fuerte explotación, estado de carga variable, la acción tectónica lo compartimenta e interconecta y un 60 % se sitúa entre 400 m y 800 m de profundidad. La carencia de planificación acrecentó el impacto de los bombeos. El Instituto Geológico y Minero de España (IGME) realizó estudios de caracterización para establecer una gestión hídrica sostenible; en ello contribuyó Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). La conceptualización y la representación numérica evolucionó de un modelo bidimensional a uno tridimensional, cuya consistencia permitió definir una explotación sectorizada y sostenible. El desarrollo del modelo demandó la modelación estocástica de su geometría. El modelo ha venido siendo usado para apoyar estudios hidroquímicos e isotópicos, en particular en la investigación del ²²²Rn como posible trazador (proyecto MICINN-REDESAC).

Palabras clave: Úbeda (España), modelo multicapa, kriging, gestión sostenible, ²²²Rn

ABSTRACT

The Úbeda Deep Aquifer System (Spain) supplies the water to irrigate the olive plantations of Loma de Úbeda area, whose production stand in the world. The system is complex: multilayer structure, intense exploitation, unconfined/confined conditions, tectonic complexity, and deep location (60 % is between 400 and 800 m depth). The lack of planned management increased the impacts of groundwater exploitation. The Geological Survey of Spain (IGME) has carried out hydrogeological studies to define a sustainable exploitation of the aquifer system, with the collaboration of the Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). The conceptualization and the numeric representation evolved from a two-dimensional model to a three-dimensional one whose consistence allowed designing a regionalized and sustainable exploitation. The development of the numeric model required a stochastic modeling of the geometry. The model is also being used to support hydrochemical and isotopic studies, as is the case of ²²²Rn use as tracer (MICINN-REDESAC Project).

Keywords: Úbeda (Spain), multilayer flow model, kriging, sustainable management, ²²²Radón.

Introducción

La producción olivarera en la comarca de Úbeda (Jaén, España) destaca en el mundo. En las últimas décadas el olivar bajo regadío sufrió un fuerte incremento en producción y superficie cultivada. El regadío explotó fundamentalmente las aguas subterráneas. Sin embargo, la falta de ordenación hídrica acrecentó el impacto de los grandes bombeos. El Instituto Geológico y Minero de España (IGME), en convenio con la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG), ha realizado estudios para definir una gestión hídrica sostenible del sistema acuífero.

En este marco, y con el objetivo de utilizar la modelación numérica como herramienta de gestión, inicialmente el IGME desarrolló un modelo bidimensional y, posteriormente, otro tridimensional (Heredia et al., 2011). El primer modelo contribuyó a establecer las concesiones a los regantes por la CHG y el segundo a su actualización. Los modelos se desarrollaron con el código en diferencias finitas MODFLOW (Mc Donald y Harbaugh, 1988).

Los modelos numéricos integran explícita e implícitamente la información disponible de un sistema, lo que permite contrastar la coherencia de los datos obtenidos con las distintas técnicas

o las interpretaciones que de estos resulten. No obstante, estos contrastes se deben interpretar asumiendo las incertidumbres y limitaciones debidas a la adecuación del modelo conceptual respecto al sistema que idealiza, así como de la representación numérica a la conceptualización en que se basa (Poeter y Anderson, 2005). Debido a estas características de la modelación numérica, el modelo del Sistema Acuífero Profundo de Úbeda (SAPU), además de una herramienta de gestión, es una herramienta de investigación metodológica y conocimiento del medio. En este trabajo se presenta el modelo y se reseña la experiencia de su aplicación como herramienta de investigación.

Marco hidrogeológico y modelo conceptual

El SAPU está constituido por formaciones triásicas del Buntsandstein y el Keuper y por carbonatos jurásicos, a techo de las anteriores. Sus dimensiones son: 1275 km² y 160 m; 990 km² y 80 m y 880 km² y 96 m, respectivamente. El sistema aflora en su tercio norte, donde

funciona como acuífero libre y, en algunos sectores, el espesor saturado posee poca entidad. En este tercio, a techo del sistema quedan restos discontinuos de materiales margo-arenosos miocenos. Al sur, el SAPU está confinado por margas miocenas sobre las que se sitúa, al suroeste, el acuífero detrítico de Úbeda, formado por calcarenitas del Mioceno Superior (Fig. 1). Los límites del sector libre lo definen los afloramientos de materiales triásicos y jurásicos. En el sector confinado, hacia el oeste los carbonatos desaparecen por acuñamiento; al este lo limitan los cabalgamientos prebéticos y al sur el límite se establece en el contacto con la Unidad Oligoestrófica de la Depresión del Guadalquivir.

Los carbonatos jurásicos y las formaciones triásicas buzan suavemente entre 5° y 15° hacia el sur-sureste. En el sector confinado a la profundidad del techo del Jurásico varía entre aproximadamente 100 m, a 1-2 km al sur de su afloramiento, y unos 800 m en el límite sur. El 60 % del sistema se halla entre 400 m y 800 m de profundidad.

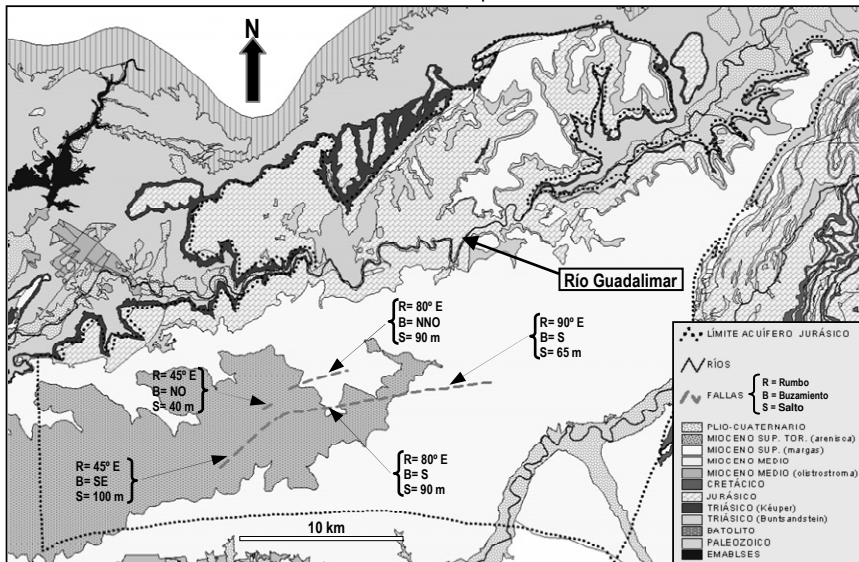


Figura 1. Esquema geológico general del Sistema Acuífero Profundo de la Loma de Úbeda.

El SAPU está muy tectonizado, con fallas, fracturas, pliegues y escamas que lo compartimentan e interconectan a las distintas formaciones, resultando un patrón de flujo de gran complejidad.

El río Guadalquivir cruza el SAPU por su tercio norte a lo largo de 56,25 km, de NE a SO (Fig. 1). En su tramo superior, de 17,5 km, el río atraviesa los depósitos del Buntsandstein y es

efluente. En los siguientes 26,25 km el río discurre sobre afloramientos del Jurásico, siendo efluente en gran parte del tramo, con excepción de un meandro de origen tectónico y quizás también en otro meandro próximo a su salida de las calizas. En su tramo final aguas abajo, de 12,5 km, el río atraviesa nuevamente los depósitos del Buntsandstein y es efluente.

En el año 2005 se estimó la extracción total en 35 hm³/año, con 233 sondeos de bombeo. La incertidumbre de esta evaluación sería algo mayor al 30 % (González-Ramón et al., 2007). Las areniscas del Buntsandstein son explotadas por numerosos sondeos en el tercio norte del sistema y en algunos del sector confinado de los carbonatos jurásicos. La complejidad tectónica del sistema y el potente factor movilizador que resultan los bombeos, hace que la explotación de alguna de las formaciones termine impactando en las otras.

Inicialmente los carbonatos se consideraron aislados y sin continuidad entre las márgenes del Guadalimar. En IGME (2004) se identificó su continuidad a ambos lados del río y en IGME (2008) el modelo conceptual incorporó la compartimentación resultante de la tectónica y una recarga por percolación desde el acuífero detrítico mioceno de Úbeda a través de las margas miocenas. Hoy en día se considera que las estructuras tectónicas compartimentan los carbonatos, pero también los conectan al Buntsandstein. El nuevo modelo conceptual considera un sistema hidrogeológico multicapa, constituido por carbonatos jurásicos y niveles triásicos (Keuper y Buntsandstein) vinculados por caminos preferentes de flujo definidos por accidentes tectónicos (Heredia, 2012).

Restitución de la geometría del SAPU

La restitución geométrica del sistema se realizó a partir de modelar la geometría de los carbonatos, pues a estos corresponde la casi totalidad de la información disponible (Heredia et al., 2013). El modelo aborda dos aspectos complejos: 1) la anisotropía por el buzamiento de la formación y sus pliegues y 2) la alteración discreta de su evolución espacial causada por grandes fallas regionales, cuyos saltos superan o son del mismo orden que su potencia. La modelación tridimensional emuló la evolución geológica de los carbonatos: a) se restituyeron como depósito plegado sin discontinuidades; b) se introdujeron las discontinuidades conocidas debido a saltos de fallas regionales y c) se impuso el proceso erosivo. Primero se obtuvieron las superficies de techo y muro sin considerar las fallas, por estimación con krigeado ordinario y según estos pasos: 1) se estudió la anisotropía con variogramas superficiales; 2) se obtuvo el variograma experimental direccional acorde a la anisotropía; 3) se ajustó el variograma teórico; 4) se contrastó el variograma calibrado por validación cruzada y 5) se interpoló por estimación con el variograma calibrado. La superficie de la potencia de los carbonatos fue la diferencia

entre las superficies de techo y muro. Después se redefinió el techo restituido considerando las fallas regionales. Se adoptó la hipótesis que en la traza de las fallas el techo restituido ofrecía la cota media y, a partir de ésta y en base al salto y buzamiento, se calcularon las cotas de los labios hundido y elevado. Estas nuevas cotas se sumaron a la información existente y se estimó la superficie del techo afectado por las fallas según los pasos 1 a 5 (Fig. 2). La superficie del muro afectado por fallas se calculó sustrayendo la potencia a la superficie del techo afectada por fallas. Donde afloraban las calizas se impuso como techo al modelo de elevación del terreno. Al considerar las formaciones triásicas sub-paralelas a los carbonatos y conocerse su potencia, se calcularon las superficies de los respectivos muros a partir del muro de los carbonatos. Igualmente, en los afloramientos de estas formaciones se les impuso como techo al modelo de elevación del terreno.

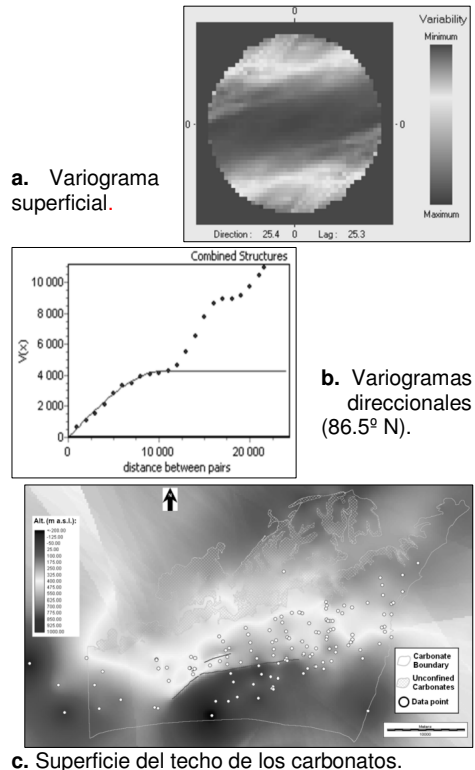


Figura 2. Restitución del techo de los carbonatos considerando las fallas regionales.

Los datos procedieron de 143 sondeos y los contactos en superficie entre formaciones. Se

aplicó el código Gstat (Pedesma y Wessling, 1998), en Idrisi ANDES (Eastman, 2006), GIS con el que se operó algebraicamente.

Modelo numérico

Una divisoria de aguas subterráneas define el límite N del modelo para el Buntsandstein. Los carbonatos jurásicos y el Keuper se representan "in extenso". Los límites O y S son comunes y los establecen la desaparición de los carbonatos por acuñamiento y la Unidad Olistostrómica de la Depresión del Guadalquivir. El límite E también es común y se fijó donde se estimó que desaparecía la estructura tabular de los carbonatos dando paso a una estructura en escamas. En estos límites se define un borde impermeable.

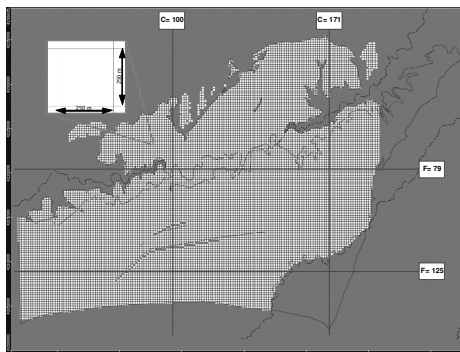
La discretización espacial lo define en planta una malla de 240 columnas y 160 filas de celdas de 250 m x 250 m y en vertical 4 capas, donde la superior representa los carbonatos jurásicos, la subyacente al Keuper y las dos inferiores al Buntsandstein (Fig. 3). Las celdas suprayacentes a los afloramientos de las formaciones triásicas se definen inactivas.

El dominio temporal del modelo en régimen transitorio representa el período entre los años hidrológicos 2000/01 y 2005/06, cuando la explotación del acuífero fue importante y se evidenció un notorio descenso de niveles. La partición temporal fueron intervalos mensuales.

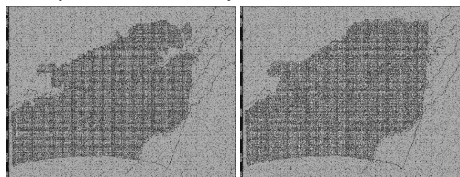
La relación del SAPU y el río Guadalimar se representa con la Condición de Contorno de río. Ésta se impuso a lo largo de las formaciones que atraviesa el cauce. Sus parámetros son una carga hidráulica de 0,5 m y una conductividad hidráulica del lecho de 1000 m²/día.

En las zonificaciones de permeabilidades y almacenamiento se definen 8 zonas (Tabla 1): 2 zonas en los carbonatos libres, una de ellas en el meandro donde existe un ambiente singular debido al condicionamiento tectónico; 2 zonas en el sector confinado de los carbonatos, según la profundidad fuera mayor o menor a 500 m; 1 zona en el Keuper; 1 zona en el Buntsandstein; 1 zona en los depósitos aluviales donde el río atraviesa a esta última formación y 1 zona para las fracturas representadas.

La recarga se origina por infiltración de la precipitación en los afloramientos del sistema y donde las areniscas miocenas cubren los carbonatos jurásicos. Se consideró que no existe recarga en el sector libre de los carbonatos donde lo cubren las margas miocenas. Existe una recarga por percolación desde las areniscas del acuífero detrítico mioceno de Úbeda a través de las margas miocenas.

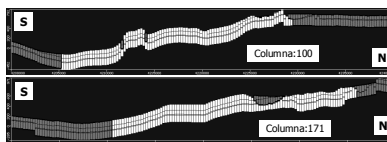


a. Capa 1: Carbonatos jurásicos.

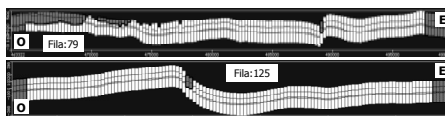


b. Capa 2: Keuper

c. Capas 3-4: Buntsand.



d. Corte : Columnas, N-S



e. Corte : Filas, O-E

Figura 3. Discretización espacial del modelo (celdas inactivas en gris).

Tabla 1. Permeabilidades y almacenamientos

FORMACIÓN	Potencia (m)	K (m/d)	T (m ² /d)	S _e (1m)	S _v (11m)
Carbonatos Jurásicos Libres	85	0,25	21,25	1 x 10 ⁻³	0,05
Carb. Jur. Confi. (prof. < 500 m)	96	3,0	288	5 x 10 ⁻³	0,01
Trias: Keuper	80	0,001	0,08	5 x 10 ⁻³	0,001
Aluvial Guadalimar	5	10,0	50	5 x 10 ⁻³	0,05
Trias Buntsandstein	160	0,5	80	1 x 10 ⁻⁴	0,02
Carb. Jur. Confi. (prof. > 500 m)	96	3,0	288	5 x 10 ⁻³	0,01
Fracturas	100	0,5	50	1 x 10 ⁻³	0,01
Meandro Guadalimar (Carb. Libr.)	85	5,0	42,5	1 x 10 ⁻³	0,1

En el modelo se representaron 208 pozos de los 233 identificados (Fig. 4). Las series anuales del inventario se extendieron al período modelado, modulándolas acorde a la evolución hidroclimática y acrecentándolas atendiendo a estimaciones actualizadas.

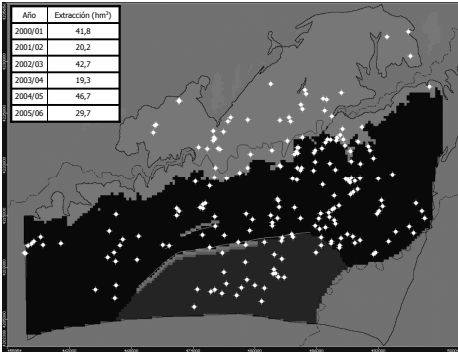


Figura 4. Pozos en explotación del modelo en régimen transitorio. Explotación media anual.

La calibración en régimen transitorio se basó en 200 datos piezométricos de 22 pozos. Los puntos de observación se agruparon por ambientes hidrogeológicos. La bondad del ajuste (Fig. 5) permitió utilizar el modelo como apoyo a la gestión hídrica del SAPU.

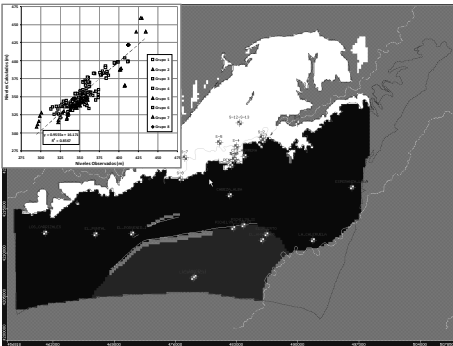
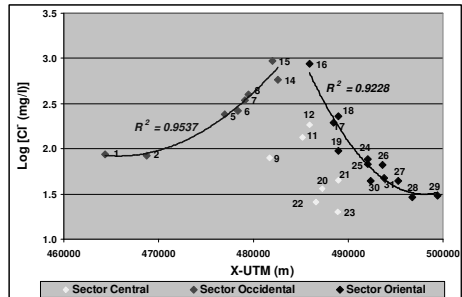


Figura 5. Pozos de observación y ajuste de niveles para el régimen transitorio

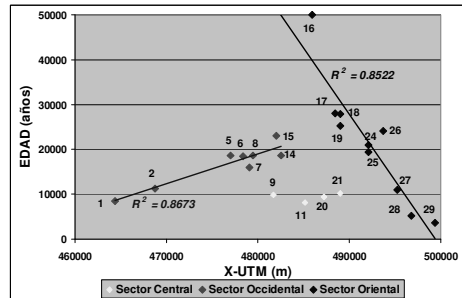
Apoyo del modelo a estudios hidroquímicos e isotópicos

En el año 2006 el Laboratorio de Técnicas Aplicadas del CEDEX realizó un estudio sobre la evolución espacial de la concentración de los iones mayoritarios en disolución y la datación con ^{14}C en las aguas de los carbonatos jurásicos (Rodríguez et al., 2007). Las concentraciones de Cl^- y las edades de las aguas presentaban respecto a la coordenada X UTM unas claras correlaciones logarítmica y lineal, respectivamente (Fig 6.a-b), indicando una estructuración espacial de los datos. Así, se identificaron sendos grupos de puntos muestreados, en los sectores oriental y occidental de los carbonatos. En las gráficas se

aprecia la evolución de las aguas de ambos grupos hacia el centro del acuífero (X UTM-30N \approx 483000 m) al incrementar su contenido en Cl^- y su edad. Además, se observa cómo difieren las respectivas condiciones iniciales: las aguas del grupo occidental presentan un mayor contenido de Cl^- y una edad notoriamente mayor (\approx 10000 años). Esta diferencia en las condiciones iniciales hizo pensar en un origen distinto para ambos grupos de aguas.



a. Relación Log 10 (Cl^- -mg/l) vs X-UTM (m).



b. Edad de las aguas (años) vs X-UTM (m).

Figura 6. Estructuración espacial de los datos hidroquímicos e isotópicos. (Modificado de Rodríguez et al., 2007).

La información piezométrica anterior a la explotación de los carbonatos era escasa y poseía cierta incertidumbre. Sin embargo, era coherente con la estructuración espacial que sugería el contenido de Cl^- y la datación con ^{14}C (IGME, 2008). Ello llevó a proponer en los carbonatos el patrón de flujo siguiente (Fig. 7): en el sector oriental, el flujo tiene un sentido de ENE a OSO y la recarga se produciría en el afloramiento de la formación y, quizás, desde las escamas jurásicas de Gazorla y, en el sector occidental, el flujo tiene un sentido de ONO a ESE y la recarga se originaría igualmente en los afloramientos y por percolación a través de las margas miocenas desde las areniscas del

acuífero detrítico de Úbeda. Sería durante la recarga a través de las margas cuando estas aguas de recarga evolucionarían hidrogeoquímicamente incrementando su contenido de Cl⁻ y su edad. Posteriormente, las aguas de ambos grupos evolucionarían por los aportes que recibirían desde el Triásico y, eventualmente, las margas miocenas. La modelación numérica reprodujo adecuadamente el patrón de flujo sugerido (Fig. 8).

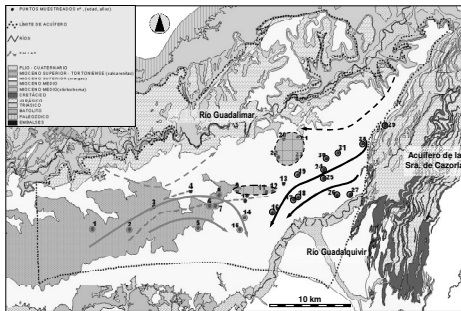
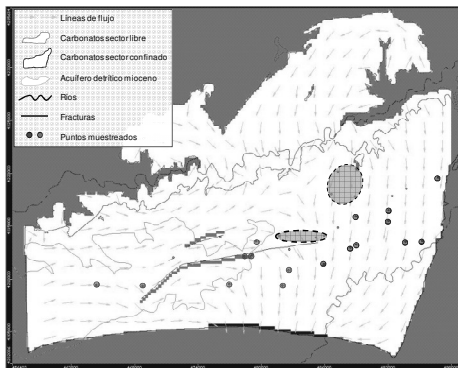


Figura 7. Puntos muestreados (CEDEX, 2006).



Patrón de flujo en régimen natural.

Figura 8. Modelación numérica: patrón de flujo.

Nuevos estudios hidroquímicos e isotópicos. Proyecto REDESAC

En el marco del proyecto MICINN-REDESAC, en septiembre de 2011 se realizó un muestreo hidroquímico de 32 puntos del SAPU (4 en aguas superficiales) y se midió in situ la actividad de ²²²Rn en 14 de ellos (1 en el río Guadalquivir) con el fin de explorar la capacidad del ²²²Rn como trazador geoquímico (Fig. 9). La interpretación de esa campaña (Ortega et al., 2012) y la reinterpretación de la información hidrogeoquímica precedente (González-Ramón et al., 2013) concluyen que la mayoría de las aguas del sistema son mezcla, en distinta

proporción, de agua que ha circulado por los carbonatos jurásicos, por las areniscas y arcillas triásicas y por las margas miocenas.

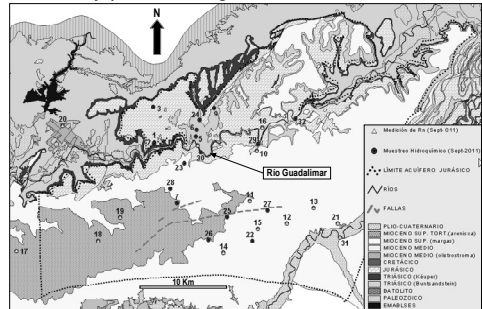


Figura 8. Pozos muestreados en la campaña de septiembre de 2011.

Síntesis de la interpretación isotópica e hidrogeoquímica

El quimismo de las aguas de los sondeos 10 y 16, junto al río Guadalquivir, de los manantiales ubicados al N del río (1 a 6 y 8) y de dos lugares del río separados 7 km (30 y 32) indican la circulación de esas aguas por materiales jurásicos y triásicos. Sin embargo, la casi nula actividad de ²²²Rn en el sondeo 16 sugiere que recibe agua del río, que químicamente es similar a las aguas de los sondeos y manantiales.

El estudio de las aguas de los sondeos al O y centro del SAPU (17, 18, 19, 11) indica que todas ellas son mezclas con aportes principalmente del Jurásico y en segundo lugar del Triásico. No obstante, de SO a NE las aguas de esos sondeos (17-18-19-11) muestran un aumento de salinidad, del contenido en Cl⁻, SO₄²⁻ y Na y de la actividad de ²²²Rn. Basada en esta evolución se propone la hipótesis que estos sondeos también reciben agua del Mioceno, sugiriendo un sentido de circulación de O a E que es coherente con el patrón de flujo definido en los estudios hidroquímico e isotópico previos (CEDEX, 2006) y reproducido por los modelos.

Las aguas de los sondeos más profundos muestreados (12, 13, 14, 15 y 21), en el SE del SAPU y en una zona donde el modelo de flujo indica que confluyen líneas de flujo de largo recorrido procedentes del NE y del O, son de tipo clorurado-sódico. Esto indica que reciben agua principalmente del Jurásico y del Mioceno. Además, los valores de la relación SO₄/Cl en los sondeos 13 y 14 sugieren que estos también tienen aportes del Triásico. En los sondeos 21 y 12 la evolución creciente del contenido de Cl⁻ y Na es coherente con la hipótesis de la contribución de agua del Mioceno. En contraste, si bien los sondeos 13, 14 y 15 tienen

salinidades comparables a las de los sondeos 21 y 12 sus actividades de ^{222}Rn son mucho menores, del mismo orden que las aguas superficiales. La divergencia entre la interpretación de la hidroquímica no isotópica y de la actividad de ^{222}Rn en las aguas de los sondeos 13, 14, 15, 21 y 12 sugiere que la actividad de ^{222}Rn en las aguas de cada sondeo debe estar controlada por algún factor no hidrogeoquímico. De hecho, se sabe que la actividad del Rn en agua subterránea depende de las condiciones para la emanación del gas desde la matriz hasta los poros y grietas del medio y de las condiciones de transporte por el flujo del agua subterránea. Todo ello hace que los patrones de distribución del Rn en un acuífero puedan ser muy complejos.

Simulaciones numéricas: resultados y discusión

Con el objetivo de contribuir a interpretar los resultados químicos e isotópicos de la campaña de septiembre de 2011 y orientar sobre la divergencia observada en algunos puntos entre la interpretación hidrogeoquímica y la actividad del ^{222}Rn se realizaron simulaciones con el modelo de flujo del SAPU. Para ello se analizaron el patrón de flujo y los balances hídricos en los sondeos muestreados resultantes de las simulaciones. Es relevante considerar que el modelo no representa explícitamente a las formaciones miocenas, esto es con un conjunto de celdas activas; si no que lo hace de forma implícita, mediante la recarga resultante de la percolación desde las areniscas del acuífero detrítico de Úbeda a través de las margas miocenas. Ello limita parcialmente el análisis propuesto, pues en el balance hídrico de los sondeos muestreados, sólo los situados bajo esta zona de recarga acusarán una aportación desde el Mioceno. Sin embargo, el patrón de flujo sí permite inferir una eventual contribución desde el Mioceno a sondeos situados más allá de su zona de recarga.

Patrón de flujo

El patrón de flujo resultante del modelo brinda un contraste general y cualitativo de los estudios hidroquímicos e isotópicos. Este patrón indica que en los carbonatos la componente vertical del flujo tiene sentido descendente en los tercios O y E de su sector libre, recargando los niveles triásicos subyacentes. En la zona central del sector libre y todo el sector confinado de los carbonatos la componente vertical del flujo es ascendente, indicando que reciben aportes desde el Triásico. El Buntsandstein se recarga en sus afloramientos y por percolación

desde los carbonatos en los tercios O y E del sector libre y, a través de éstos, donde están secos. El Triásico descarga hacia los carbonatos en todo su sector confinado y en la zona central de su sector libre. El patrón de flujo indica que los sondeos muestreados en 2011 recibirían, en mayor o menor medida, algún aporte de agua que ha circulado parcial o totalmente por el Triásico. Esta observación conceptual resultante de la simulación se ajusta aproximadamente a la interpretación de la información hidrogeoquímica reciente y la reinterpretación de la información previa.

Balance hídrico en los sondeos muestreados

Si bien el modelo de flujo ofrece resultados cuantitativos del balance hídrico en los sondeos analizados, éste no es el recurso numérico más adecuado para contrastar los resultados del estudio hidroquímico. La herramienta numérica pertinente para abordar esta tarea es un modelo de transporte.

Los balances se hicieron para las celdas que atravesaba parcial o totalmente un sondeo, identificando la formación de procedencia de las entradas. Ello permitió evaluar la mezcla de aguas en cada sondeo muestreado. Se asumió que las celdas vecinas presentaban igual grado de mezcla.

Los balances hídricos resultantes de la simulación sugieren el agrupamiento de sondeos siguiente:

1. Los sondeos 10 y 16 se encuentran secos en los carbonatos debido a los bombeos, por ello las aguas que extraen procederían mayoritariamente del Triásico. Es probable que esto no sea enteramente correcto, pues estos sondeos reciben algún aporte de agua desde los carbonatos jurásicos. Además, se sabe que el sondeo 16 puede recibir agua del Guadalimar a través de los carbonatos. El secado indebido de las celdas se debió a las limitaciones de la discretización espacial
2. El agua del manantial 5 sería una mezcla de aguas procedentes de los carbonatos jurásicos y del Triásico.
3. En los sondeos 13, 15, 12 y 18 una porción pequeña de sus aguas procedería del Triásico y, además, el 18, recibiría aportes del Mioceno
4. En los sondeos 14 y 19 la casi totalidad de sus aguas procedería de los carbonatos. No obstante, si bien en términos de balance hídrico el aporte del Triásico es marginal, ello no es óbice para que el agua de estos sondeos ostente, aunque mitigada, la marca hidroquímica de su paso por esta formación. En el caso del sondeo 19, la complejidad de

la tectónica dificultó la restitución de la geometría de los carbonatos, por ello es probable que el modelo minusvalore la penetración del sondeo en el Triásico y con ello las aportaciones que recibe de éste.

- Los sondeos 11 y 21 se encontrarían en una situación intermedia entre los grupos 2 y 3. El sondeo 17 queda fuera del modelo.

Conclusiones

El modelo de flujo del Sistema Acuífero Profundo de Úbeda (España) describe un sistema muy complejo durante un período de explotación intensa. Su objetivo primero, apoyar la gestión hídrica, lo alcanzó cumplidamente. En este trabajo se presentan los aspectos de la modelación ligados a la investigación numérica, hidroquímica e isotópica. La geometría del Sistema se restituyó mediante modelación estocástica que, en una metodología original, emuló el proceso geológico. Así, se pudieron representar en el modelo de flujo las grandes fallas regionales que condicionan la circulación del SAPU. Posteriormente, al contrastar con el modelo de flujo la información hidrodinámica, hidroquímica (Cl) e isotópica (^{14}C) y reproducir la circulación que sugerían, se identificó la recarga al SAPU desde el acuífero detrítico de Úbeda. Esta conclusión implicó un importante avance en el modelo conceptual del sistema. Finalmente, en el proyecto REDESAC, en el que se investiga al ^{222}Rn como marcador litogénico en las aguas subterráneas, el contraste con el modelo se basó en el análisis de su patrón de flujo y la mezcla de aguas resultante en los pozos muestreados. La circulación resultante del modelo fue coherente con la interpretación hidroquímica, mientras que la interpretación isotópica abría nuevas líneas de trabajo.

Agradecimientos

La modelación numérica se desarrolló en proyecto específico CHG-IGME. Las campañas de campo y los estudios resultantes han sido ejecutados por el Laboratorio de Técnicas Isotópicas (CEDEX) y el proyecto MICINN 2009-2910-CO3, REDESAC (UPCT, IGME, CEDEX).

Referencias

Eastman R. 2006. *IDRISI Andes Guide to GIS and Image Processing*. Clark University, Worcester, MA, USA

González-Ramón, A.; Gollonet, J.; Rubio, J.C.; Nuñez, I. (2007) "Los acuíferos de la Loma de Úbeda". In: González-Ramón; Rubio; López-Geta (Eds.) IGME, Madrid, 56 pp.

González-Ramón, A; Rodríguez-Arévalo, J.; Martos-Rosillo, S.; Gollonet, J. (2013)

"Hydrogeological research on intensively exploited deep aquifers in the 'Loma de Úbeda' area (Jaén, Spain)". *Hydrogeological Journal*. En prensa

Heredia, J.; González-Ramón, A.; Gollonet, J.; Moreno, A. y López-Geta, J.A. 2011. Un modelo tridimensional de flujo una herramienta para la planificación de la explotación sostenible de un sistema acuífero profundo: la Loma de Úbeda (España). *Congreso Ibérico: "Las aguas subterráneas: desafíos de la gestión para el siglo XXI"*. Zaragoza, España

Heredia, J.; Manzano, M.; Ortega, L.; Rodríguez-Arévalo, J.; González-Ramón, A. y Muñoz, D. 2012. Contraste numérico de las aportaciones preliminares del ^{222}Rn al modelo conceptual de funcionamiento del Sistema Acuífero Profundo de Úbeda. *7^º AHPGG San Sebastián, España*

Heredia, J., Pardo, E., González-Ramón, A. 2013. Stochastic modeling of the 3D geometry of a faulted and folded deep carbonate aquifer Loma de Úbeda (Spain). *IAMG 2013*. Madrid, Spain

IGME 2008. *Investigación de la respuesta de acuíferos profundos a la explotación intensiva: El acuífero carbonatado de La Loma de Úbeda (U.H. 05.23). Modelo numérico de flujo*. IGME, 79 pp. y Anexos

McDonald, M.G. & Harbaugh, A.W. 1988 *A modular three dimensional finite-difference groundwater flow model*. USGS Techniques of Water Resources Investigations, book 6, 586 pp

Ortega, L.; Manzano, M.; Heredia, J.; Rodríguez-Arévalo, J.; González-Ramón, A. y Muñoz, D. 2012. Información preliminar del ^{222}Rn como trazador de la red de flujo del sistema acuífero de la Loma de Úbeda *7^º AHPGG San Sebastián, España*

Pedesa, E.J. and Wesseling C.G. 1998. Gstat: a program for geostatistical modeling, prediction and simulation-. *Computer & Geosciences*. 24 (1): 17-31

Poeter, E., Anderson, D., 2005. Multimodel ranking and inference in ground water modeling. *Ground Water*, 43 (4): 597-605.

Rodríguez-Arévalo, J.; Pérez, E.; Díaz, M.F.; Heredia J. 2007. A contribution to characterize of a deeply confined carbonate aquifer in Úbeda (Spain) from a reinterpretation of existing geological and geophysical data and new data on environmental isotopes. *XXXV IAH Congress*. Lisboa, Portugal