

SINTESIS HIDROGEOLOGICA Y MODELIZACION REGIONAL DE LA CUENCA MEDIA DEL TAJO ASISTIDA POR UN SIG

J. Heredia ****, M. Martín-Loeches **, J. Rosino ****, C. del Olmo * y M. Lucini ***

RESUMEN

En el presente trabajo se exponen los resultados obtenidos de la aplicación de un Código Numérico de Modelización Hidrogeológica (CNMH) asistido por un Sistema de Información Geográfica (SIG) a un área de 20.952 km² de la cuenca media del Tajo que incluye tanto a las depresiones terciarias del Campo Arañuelo y de Madrid, parcialmente, como al sustrato Igneo-metamórfico del macizo Ibérico hasta una profundidad de 5.500 m. Geográficamente incluye las ciudades de Madrid, Toledo y Talavera de la Reina; el accidente tectónico del Jerte y la confluencia entre el río Tajo y el Tiétar constituyen el área más occidental. Los objetivos del trabajo son, estudiar la problemática de integrar en un modelo hidrogeológico regional de gran escala formaciones de características hidrogeológicas muy distintas, analizar y definir una configuración SIG-CNMH para aplicar en el estudio, y avanzar en el conocimiento regional desde una perspectiva integradora y multidisciplinar. Se trabaja con un modelo isótropo y cinco anisótropos, estos últimos considerando la influencia en el flujo de tres familias de accidentes tectónicos —N 105, N 142.5 y N 168.75— y una esquistosidad media regional N 140. La calibración se basa en piezometría restituida y aportaciones base de la red hidrográfica. Se obtuvieron distintos valores de los parámetros calibrados según el modelo. En todos los casos la calidad del ajuste global es correcta y aceptable; sin embargo, cada uno de los modelos ofrece mejor calidad de ajuste respecto a los restantes en los sectores donde los rasgos que representan coinciden con los del sistema real. La evolución de la permeabilidad en profundidad resultante de la calibración es coherente con la esperada, siendo las relaciones $k_x/k_z = k_y/k_z = 1$, en los primeros 200 m y 0,1 en el resto. Se obtuvo una recarga calibrada para el terciario del 3 % de la precipitación, del 2 % en el sistema Gredos-Guadarrama y del 0,5 % en Montes de Toledo. Para la realización del modelo se han integrado y contrastado informaciones procedentes de tesis doctorales, del proyecto Berrocal de Enresa, de los estudios hidrográficos del CEDEX y climatológicos de la Confederación Hidrográfica del Tajo (CHT) del último estudio relativo a la modelización del terciario de la Dirección General de Obras Hidráulicas (DGOH) y del proyecto SHISTO-SIGMA del CSN en relación con las fracturas. La configuración SIG-CNMH elegida —ARC/INFO-IDRISI-VISUAL MODFLOW— se ha mostrado potente y versátil en las labores de modelización en esta área, de amplia extensión y notable complejidad litológica.

Palabras clave: *Modelo hidrogeológico regional, Sistema de Información Geográfica, Integración de Información Multidisciplinar, Cuenca Media del Tajo.*

ABSTRACT

This work resumes the results obtained from the application of a numerical code for hydrogeologic modelization (NCHM) assisted through a Geographic information System (GIS) to an area of 20,952 km² of the middle part of the Tajo basin; it includes both the tertiary basins of Campo Arañuelo and Madrid and the igneous-metamorphic massif until a depth of 5,500 m. The cities of Madrid, Toledo and Talavera de la Reina are located in the selected area and the Jerte fault and the confluence area of the rivers Tajo and Tietar constitute its westernmost part. The objectives of this work are for one side to study the problem related with the integration of several hydrogeologic formations of differentiated

* INGEMISA. Fernández de la Hoz, 58. 28010 Madrid.

** Departamento de Geología UAH. Campus Universitario, E-28871. Alcalá de Henares. Madrid.

*** ENRESA. Emilio Vargas, 7. 28043 Madrid.

**** Consultor independiente.

characteristics in one single model and for the other, to push forward in the regional knowledge from an integrated and multidisciplinary perspective. One isotropic and five anisotropic models were performed. In the anisotropic ones, the influence in the flow of the water of 3 different sets of fractures —N 105, N 142.5 y N 168.75— and a regional esquistosity of N 140, was considered. The calibration of the models rests upon both restored piezometric levels and the base yield of the hydrographic network. Different values of the calibrated parameters were obtained according to each model. The quality of the adjustments is acceptable; each one of the models shows a better adjustment respect the others in those areas where the features that are represented fit with those in the real system. The evolution of the permeability with the depth fits with the expected one, being $k_x/k_z = k_y/k_z = 1$, for the first 200 m and 0.1 for the rest. A calibrated recharge of 3 % of the precipitation was obtained for the tertiary, 2 % in the Guadarrama-Gredos system and 0.5 % in Montes de Toledo range. Information from different sources, either doctoral thesis or studies from ENRESA CEDEX, CHT and DGOH and the SIGMA project was integrated and contrasted to perform the model. The chosen configuration ARC/INFO-IDRISI-VISUAL MODFLOW has shown its usefulness and versatility to face the modelization of this area, which is characterized for its complexity and big extension.

Key words: *Regional Hydrogeological Model, Geographic Information System, Integration of Multidisciplinary Information, Tajo Medium Basin.*

Introducción

Los modelos numéricos o matemáticos son herramientas cuyo uso ha alcanzado gran difusión en muy diversas disciplinas. Ello, en gran medida, se debe a su capacidad para el tratamiento de cantidades ingentes de información y para representar una gran diversidad de escenarios. En este aspecto destacaba la inexistencia, en todo el ámbito nacional, de un modelo numérico hidrogeológico regional de gran escala.

El desarrollo de un modelo de gran escala regional incide favorablemente en distintos aspectos en el área que representa. Entre los mismos se pueden reseñar: *a)* es una herramienta de primer orden para planificación y ordenación territorial; *b)* facilita y auxilia en la toma de decisiones de proyectos específicos; *c)* es una herramienta de gran interés en la gestión medioambiental; *d)* integra y contrasta resultados de estudios de diversas disciplinas: hidrología, geología, climatología, etc.

Frente a estas ventajas existen claras dificultades para la elaboración de un modelo regional de gran escala. Las más destacadas son las siguientes: *a)* la representación numérica conjunta de ámbitos de naturaleza, características y rasgos de gran contraste entre sí, y *b)* la falta de desarrollo de una herramienta para gestión, tratamiento e integración de la ingente y heterogénea información requerida y resultante de la modelización.

Respecto a la herramienta, se considera que los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ofrecen una respuesta adecuada a este requerimiento. No obstante, a pesar de existir en otros países experiencia de su empleo en la modelización hidrogeológica (Goodchild et al., 1996) en España no se había

abordado su uso hasta el presente estudio, cuyos resultados y problemática pretendemos exponer en el presente trabajo.

La «Síntesis Hidrogeológica y Modelización Regional de la Cuenca Media del Tajo» es un estudio realizado por la empresa INGEMISA que contó en este Proyecto con la colaboración de investigadores de las universidades Politécnica de Cataluña, Alcalá de Henares, y Politécnica, Autónoma y Complutense de Madrid.

Objetivos

Los objetivos de este estudio son, fundamentalmente, de carácter metodológico; se concretan en los siguientes puntos:

— Analizar la problemática que plantea la representación de un medio de baja permeabilidad en la modelización regional a gran escala de un sistema hidrogeológico.

— Analizar y valorar el trabajo integrado de un Sistema de Información Geográfica (SIG) y un Código Numérico de Modelización Hidrogeológica (CNMH).

La consecución de estos objetivos se plantea mediante el desarrollo de un modelo hidrogeológico regional a gran escala en un área prefijada. La evaluación de las incidencias en la construcción del modelo dieron respuesta al primer objetivo y los estudios y valoraciones necesarios para la definición de la configuración SIG-CNMH dieron respuesta al segundo de los mismos.

Un fruto destacable de este estudio ha sido el avance alcanzado en el conocimiento regional del área elegida, tanto por los resultados específicos del

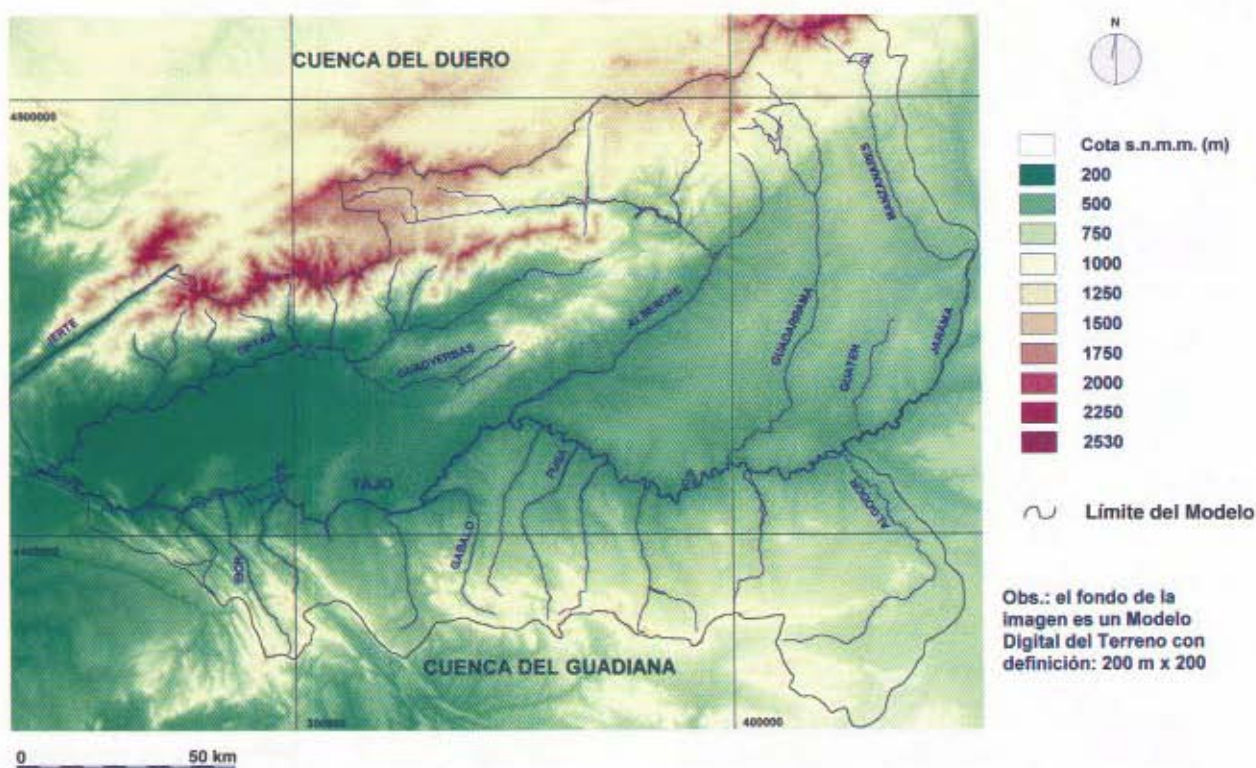


Fig. 1.—Límites, orografía e hidrografía de la zona modelada.

modelo como por la validación de estudios o resultados de modelos de esta y otras disciplinas.

Area de estudio

La cuenca media del Tago fue el área seleccionada como el escenario real en el que se desarrollaron las tareas de estudio y modelización hidrogeológica necesarias para la consecución de estos objetivos. El área de estudio posee una extensión de 20.952 km². Sus límites son al Norte y Sur las divisorias de aguas con las cuencas del Duero (Sierras de Gredos y Guadarrama) y Guadiana (Montes de Toledo), respectivamente; al Este la divisoria de cuencas de los ríos Manzanares-Jarama y Algodor-Ayo de Martín Román y el río Jarama; al Oeste el río Jerte y el Ayo. de la Vid. (Véase fig. 1.)

La red hidrográfica del área está integrada por importantes cursos de agua. Entre ellos destacan los ríos Tago, Jarama, Guadarrama, Alberche, Tiétar y Jerte.

En cuanto a formaciones acuíferas relevantes, el área modelizada engloba el sector occidental del acuífero detrítico de Madrid y la totalidad del terciario del Campo Arañuelo. Sin embargo, se debe resaltar que el modelo representa igualmente el

flujo subterráneo en las formaciones de rocas ígneas y metamórficas. Las aguas subterráneas y su flujo en estas rocas, despreciable desde el punto de vista del abastecimiento, cobra importancia fundamental en la toma de ciertas decisiones de ordenación territorial y gestión ambiental.

Información requerida

En relación con la geología del sector modelizado (litología y estructuras) se realizó una síntesis a escala 1:200.000 a partir de los mapas geológicos 1:50.000 del ITGE, tanto los publicados como los elaborados y no publicados. La información relativa a las hojas no elaboradas, se obtuvo de trabajos geológicos que engloban las zonas de interés. El total de hojas 1:50.000 consultadas ascendió a 50. Otras informaciones geológicas se obtuvieron de tesis doctorales y de trabajos de investigación específicos. La trayectoria y características de las grandes estructuras tectónicas ocultas bajo las cuencas terciarias se sintetizaron a partir de trabajos de interpretación geofísica (Cadavid, 1977; JEN, 1980).

El conocimiento hidrogeológico del área elegida para la aplicación del modelo es muy desigual. Existen numerosos estudios en los acuíferos detríti-

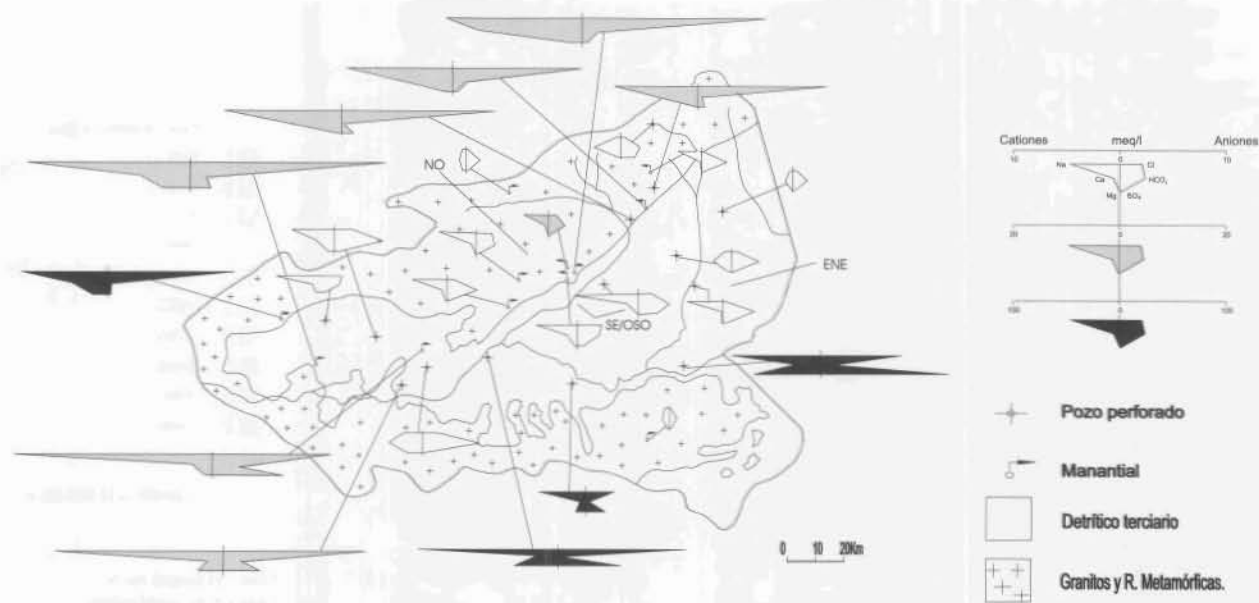


Fig. 2.—Mapa de diagramas de Stiff con una selección de los puntos de agua más representativos de cada facies hidrogeoquímica. El perfil indicado corresponde a los esquemas de las hipótesis B, C, D y E de la figura 3.

cos, y en particular sobre el de Madrid, mientras que el número de trabajos en relación con la hidrogeología de las rocas ígneas y metamórficas en este sector es muy escaso.

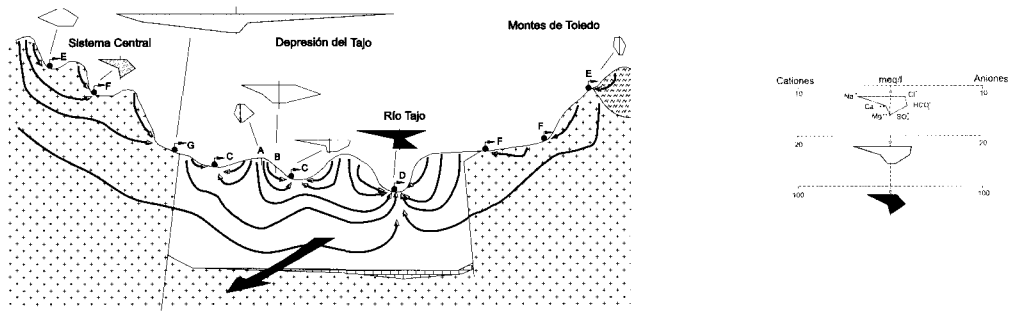
De entre los principales trabajos consultados sobre los acuíferos detríticos, destacan Sastre (1978), Rebollo (1977), Octavio de Toledo (1975), Herráez (1983), Coletto (1986), Molina (1989), Llamas (1987), DGOH (1996), CHT (1988) y Vicente (1986); en relación con las litologías cristalinas fueron Martín-Loeches (1995), Yélamos (1991) y ENRESA (1996). Tras una selección que tuvo en cuenta la calidad de los datos, su interés y su posición geográfica e hidrogeológica, se elaboró un inventario de puntos de agua constituido por 179 puntos entre pozos excavados, pozos perforados, sondeos de investigación y manantiales.

No existen estudios específicos sobre la relación hidrogeológica entre los dominios detrítico y cristalino, aspecto de especial interés para la definición del modelo. Sin embargo, Jones y Llamas (1989), Vicente (1986) y Martín-Loeches *et al.* (1997), realizan ciertas consideraciones sobre este particular basadas en la existencia de puntos de agua próximos a los bordes de las depresiones con facies hidrogeoquímicas no ajustables con facilidad a los modelos tradicionales en acuíferos detríticos.

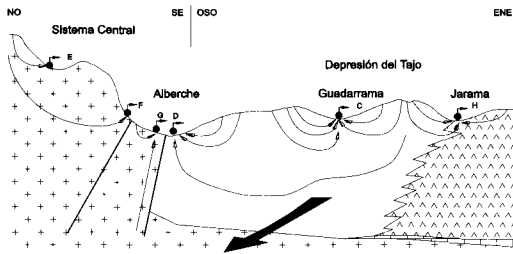
La información con que se construyó el modelo requirió la realización de una exhaustiva síntesis hidrogeológica regional elaborada a partir de la documentación citada, el análisis detallado de cada uno de los elementos que componen el sistema de flujo y las posibles hipótesis de circulación del flujo subterráneo.

Estas hipótesis se basan, en particular, en el quimismo de las aguas. Ello se debe a la escasez de datos relativos a los potenciales piezométricos en el dominio ígneo-metamórfico; en estas rocas, las perforaciones, si bien son numerosas en su conjunto, poseen una distribución geográfica muy reducida y en la mayoría de los casos son obras de profundidad muy limitada en comparación con la dimensión vertical del modelo. En la figura 2 se realiza una representación en diagramas de Stiff de una selección de puntos de agua característicos de las seis principales facies hidrogeoquímicas observadas en el dominio geográfico estudiado.

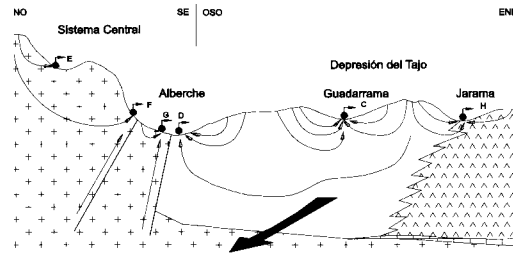
Las hipótesis de funcionamiento hidráulico diferenciadas fueron cinco. Todas ellas se derivan de las notables incertidumbres aún existentes en relación con el origen de las facies sulfhídricas y cloruradas localizadas en el sector ígneo-metamórfico. Así, se plantea, por un lado, una procedencia interna de los halógenos y el sulfhídrico, y, por otro, la posibilidad de que estos constituyentes estén relacionados con



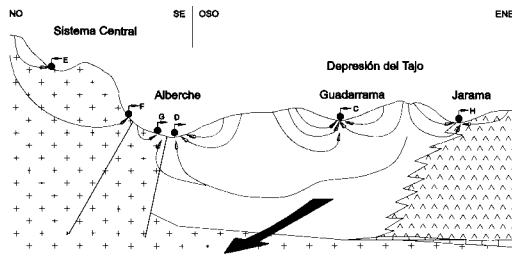
HIPÓTESIS A: Todas las aguas proceden de la infiltración del agua de lluvia. Esquema idealizado que incluye todas las facies hidrogeoquímicas.



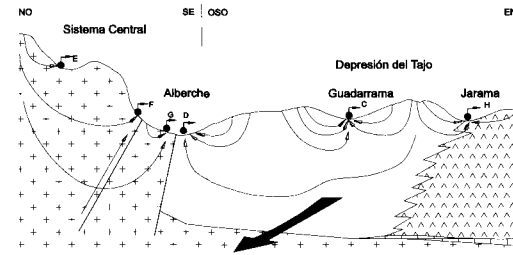
HIPOTESIS B: Aguas cloruradas sódicas "G" proceden de flujos profundos internos



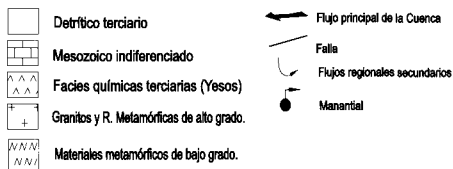
HIPOTESIS C: Aguas cloruradas sódicas "G" y Bicarbonatadas sódicas "F" proceden de flujos profundos internos



HIPOTESIS D: Aguas cloruradas sódicas "G" proceden de flujos en terciario



HIPOTESIS E: Aguas Bicarbonatadas sódicas "F" proceden de flujos profundos



- A: $\text{CO}_3\text{H-Ca}$ (Mg); Agua de recarga del Terciario
- B: $\text{CO}_3\text{H-Na}$; Agua de transición del Terciario
- C: $\text{CO}_3\text{H-Cl-Na}$; Agua de descarga del Terciario
- D: Cl-Na; Agua de descarga regional en Terciario
- E: $\text{CO}_3\text{H-Ca}$; Baja mineralización.
Recarga o escaso recorrido en granitos
- F: $\text{CO}_3\text{H-Na}$ (sulfhídrica); Evolucionada en granitos
- G: Cl-Na (Na-Ca); Elevada mineralización en granitos.
- H: $\text{SO}_4\text{-Ca}$; Influencia yesos de la C. de Madrid

Fig. 3.—Hipótesis de funcionamiento hidráulico representadas en esquemas hidrogeológicos. El perfil de los esquemas de las hipótesis B, C, D y E corresponden al indicado en la figura 2.

una evolución prolongada del agua a través del substrato; se contempla además la posible influencia de las litologías sedimentarias del centro de la cuenca de Madrid. Las cinco hipótesis se esquematizan mediante cortes en la figura 3.

La extensión de la zona de estudio posibilita hacer una aproximación a la caracterización de los distintos flujos regionales existentes y el contraste de los posibles modelos conceptuales. Asimismo, al englobar esta área a grupos litológicos de acusadas diferencias hidrogeológicas entre sí, se demandan distintos requerimientos en las escalas de información para su correcta representación numérica. Este hecho acrecentó la complejidad de la aplicación y obligó a tomar decisiones de consenso en lo concerniente a la representación numérica, lo que enriqueció la respuesta a los objetivos planteados.

Definición de la configuración SIG-CNMH

Para definir la configuración a aplicar se investigaron y valoraron tres SIG (PCAR/INFO, IDRISI y MAPINFO), cuatro CNMH (MARTHE, Visual MODFLOW, TRANSIN III y FEEFLOW) y un conjunto de códigos vínculos SIG-CNMH, algunos existentes en el mercado y otros de carácter privado. Asimismo se valoraron posibles configuraciones.

La configuración con la que se trabajó finalmente ha estado compuesta por ARC/INFO-IDRISI-Visual MODFLOW. No obstante, ARC/INFO actuó exclusivamente como origen de parte de la información y destino último de los resultados; la captura, análisis, estructuración e indexación de la información nueva se realizó con IDRISI.

Definición del modelo

La estructura del modelo se compone de 104.755 celdas activas divididas en cinco capas, que alcanzan la profundidad de 5.500 m, aproximadamente. Se definen tridimensionalmente siete zonas de permeabilidades, correspondiéndose con los distintos grupos litológicos (véase fig. 4). Se modeliza en régimen estacionario no influenciado.

En régimen natural, la recarga en el dominio modelado se considera que procede exclusivamente de la infiltración de la precipitación (véase fig. 5). En principio, se considera que la tasa de recarga respecto a la lluvia es función de la litología.

Las únicas descargas consideradas, en régimen no influenciado, son las que se producen a los ríos, conformando su caudal base (Q_B), y las que se dan a través de los manantiales. Las primeras se repre-

sentan mediante la condición de contorno de relación río-acuífero (cinco zonas) y los manantiales con la condición de dren (véase fig. 6). Las aportaciones base, A_B , de referencia pertenecen a un estudio específico de la Confederación Hidrográfica del Tajo (CHT, 1998) y son las resultantes de simulaciones en régimen natural con el programa Sacramento para el período 1943-44/1992-93. Se contrastaron en 30 tramos de ríos, mediante balances hídricos, cuyos resultados para uno de los modelos calibrados se muestran en la tabla 1.

Los modelos conceptuales representados son seis: uno isótropo, y cinco anisótropos. Los modelos anisótropos representan la influencia sobre el conjunto de los grupos litológicos de rocas ígneas y metamórficas de alto grado (cristalino) y de rocas metamórficas esquistosas (metamórficas de bajo grado de metamorfismo) de tres familias de accidentes tectónicos (N 105°, N 142,5°, N 168,75°) o la influencia de estas familias sólo sobre el cristalino, considerando que el flujo en las rocas metamórficas de bajo grado se encuentra condicionado por una esquistosidad regional media de dirección N 140°. Estas tres familias de accidentes tectónicos han sido señaladas en importantes estudios previos a escala regional y local (Paredes *et al.*, 1997) como, posiblemente, las más relevantes desde el punto de vista hidrogeológico.

La incorporación y uso de una forma ágil de ARC/INFO e IDRISI en el proceso de modelización permitió tratar con rigor y aprovechar toda la potencialidad de la información referente a las variables hidrogeológicas como la recarga y la piezometría (véase fig. 7). Este tratamiento y la integración de cada tipo de información en el modelo se ejecutó, en particular, con IDRISI de forma cómoda y segura, evitando los procedimientos tradicionales farragosos y llenos de incertidumbre, frecuentes en trabajos de estas magnitudes.

Criterios de calibración

Los criterios de calibración de los seis modelos elaborados fueron los siguientes:

- *Ajuste entre las piezometrías calculada y de referencia.* Se realiza en todo el dominio del modelo. La piezometría de referencia se definió acorde a los datos existentes en los distintos ámbitos del modelo. En las litologías sedimentarias la piezometría se restituyó, en el acuífero de Madrid a partir de los datos del Servicio Geológico de Obras Públicas de 1982 (SGOP, 1982) y en Campo Arañuelo con los datos aportados por Vicente (1986). En el dominio ígneo-metamórfico

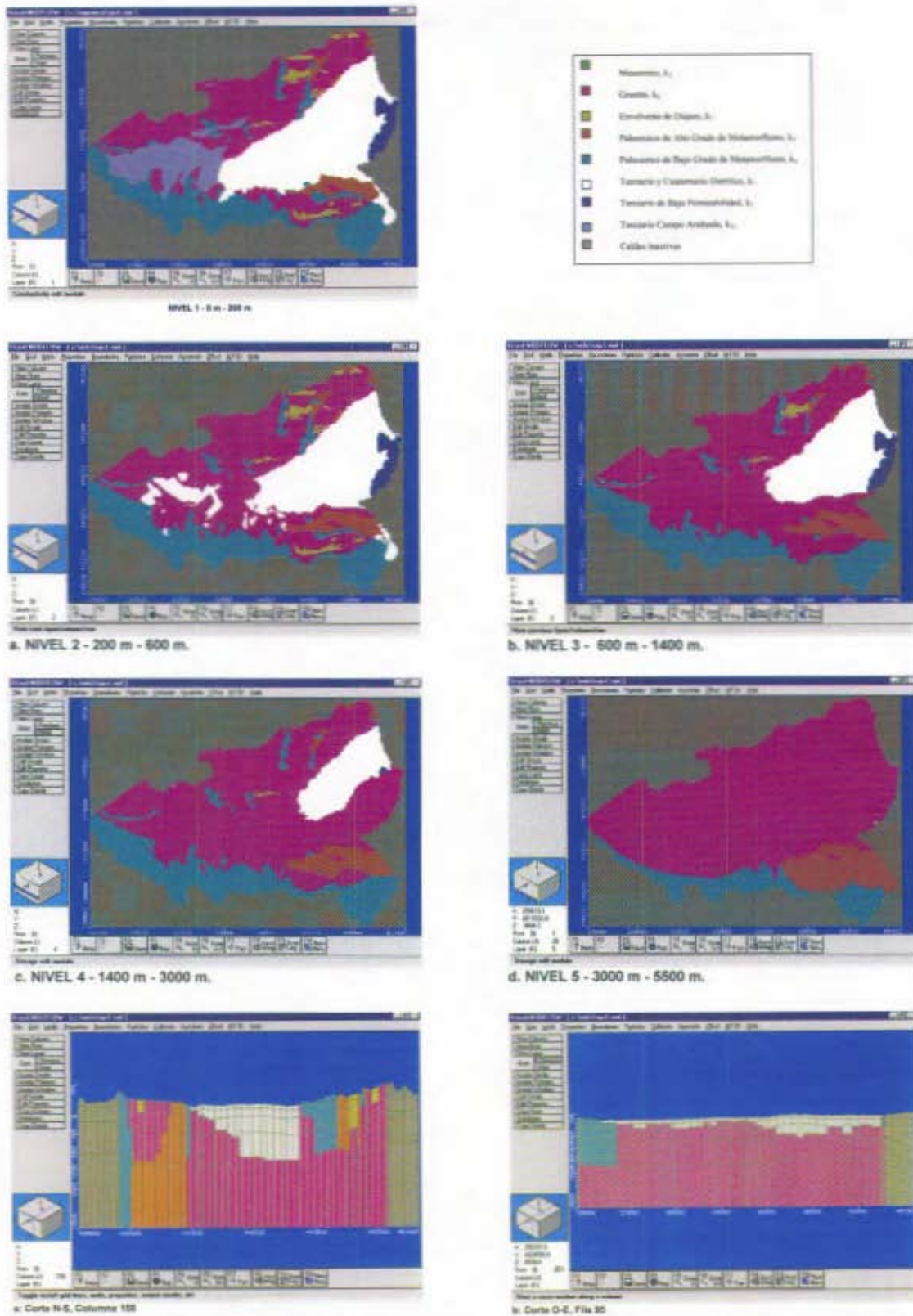
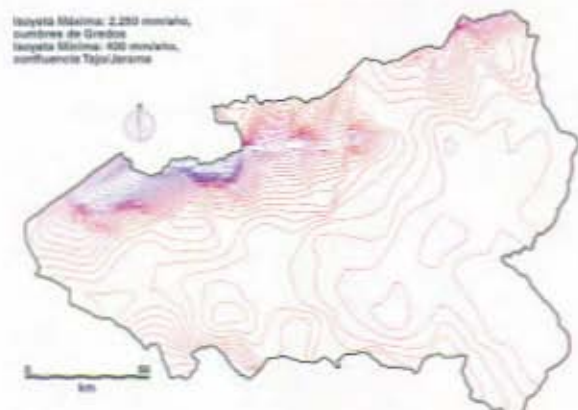


Fig. 4.—Zonificación de permeabilidades, k, Niveles 1 (superficial) a 5 (profundo) y cortes transversales (a y b).

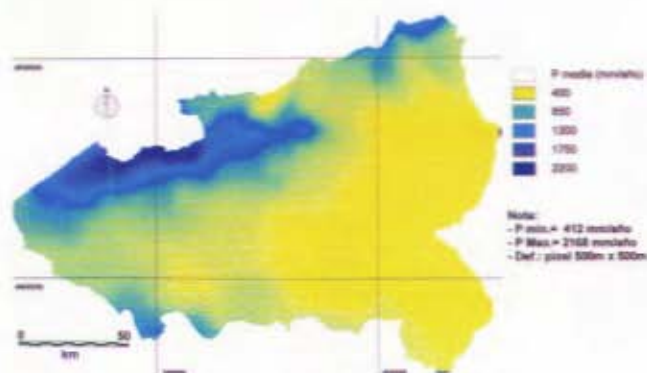
Tabla 1.—Aportaciones base calculadas. Modelo Anisótropo ($\alpha_{\text{cris}} = \text{N-142.5}^\circ$ $\alpha_{\text{esq}} = \text{N-142.5}^\circ$)

Tramo n.º	Río formaciones	$A_B =$ Expresión (subcuenca) ($\text{hm}^3/\text{año}$)	A_B medida ($\text{m}^3/\text{día}$)	A_B calculada ($\text{m}^3/\text{día}$)	$[A_{Bc}/A_{Bm}]$ *100
1	Manzanares M.D.-cristalino, terciario	(05.20L) 9.756716981	E.D. 26730.731	154.11 38124	142.62
2	Aulencia M.D.-cristalino, terciario	(06.32C) 2.451339623	E.D. 6715.999	0 6808.6	101.38
3	Perales M.D.-cristalino, terciario	(07.43B) 6.525490566	E.D. 17878.056	0 15187	84.95
4	Jarama M.D.-terciario borde	(05.20N-[05.20H + 03.24B])*4/5 2.325856604	E.D. 6372.210	0 8954.7	140.53
5	Guadarrama M.D.-terciario	(06.33B-[06.32A + 06.32C]) 5.541037736	E.D. 15180.925	233.92 40662	267.85
6	Alberche M.D.-terciario	(07.45C-[07.43B + 07.42B]) 22.44884906	E.D. 61503.696	0 58457	95.05
7	Guadarrama M.D.-cristalino	(06.32A) 6.375962264	E.D. 17468.390	0 11780	67.44
8	Alberche M.D.-cristalino	(07.42B) 36.70183019	E.D. 100552.959	310.43 66159	65.8
9	Tiétar M.D.-cristalino-terciario	(09.54B-[09.53C + 09.53A + 09.53B + 09.53E + 09.52A + 09.52C]) 78.75733962	E.D. 215773.533	474.26 212930	98.68
10	Ramacastaña M.D.-cristalino	(09.52A) 4.98	E.D. 13643.836	100.01 9987.4	73.2
11	Guayervas M.D.-cristalino	(09.52C) 4.88	E.D. 13369.863	562.27 13260	99.18
12	Gta. de Alardos M.D.-cristalino	(09.53A) 3.730698113	E.D. 10221.091	0 10180	99.6
13	Gta. de Minchones M.D.-cristalino	(09.53B) 2.583754717	E.D. 7078.780	0 8082.8	114.18
14	Gta. de Cuartos M.D.-cristalino	(09.53C) 2.544433962	E.D. 6971.052	0 8067.7	115.73
15	Caraba M.D.-cristalino	(09.53E) 9.325943396	E.D. 25550.530	0 22985	89.96
16	Jerte M.D.-cristalino	(10.64A)*2/5 13.176	E.D. 36098.630	50.033 16769	46.45
17	Tajo Terciario	(02.25B-[02.09C + 05.20n])*4/5 4.760060377	E.D. 13041.261	189.07 12553	96.26
18	Tajo Terciario	(08.34C-[08.29A + 08.27C + 02.25B + 08.26B + 06.33B]) 3.322811321	E.D. 9103.593	0 9807.4	167.63
19	Tajo Terciario	(08.47A-[07.45C + 08.38A + 08.37A + 08.36D + 08.35B + 08.34C]) 9.442018868	E.D. 25868.545	0 35926	138.88
20	Tajo Cristalino, terciario	(12.50B-[08.47A + 08.39B + 08.77A + 12.49A + 12.48A]) 16.39218868	E.D. 44910.106	398.07 35035	78.01
21	Algodor M.I.-cristalino, terciario	(08.27C) 7.658603774	E.D. 20982.476	0 13451	64.11
22	Guajaraz M.I.-cristalino	(08.29A) 0.197169811	E.D. 540.191	7.5003 1815.3	336.05
23	Torcón M.I.-cristalino, terciario	(08.35B) 0.273660377	E.D. 749.754	27.983 2119.6	282.71
24	Cedena M.I.-cristalino, terciario	(08.36D) 1.184566038	E.D. 3245.386	959.2 1239.3	38.19
25	Pusa M.I.-cristalino, terciario	(08.37A) 3.198679245	E.D. 8763.505	719.72 7069.2	80.67
26	Sangrera M.I.-cristalino, terciario	(08.38A) 4.08909434	E.D. 11202.998	1002.91 5164	46.09
27	Gábalo M.I.-cristalino, terciario	(08.39B) 5.191566038	E.D. 14223.469	204.96 8375.3	58.88
28	Husa M.I.-cristalino	(08.77A) 0.278716981	E.D. 763.608	0 3129.6	409.84
29	Guadalijas M.I.-cristalino	(12.49A) 0.053037736	E.D. 145.309	17.501 803.83	553.19
30	Ibor M.I.-cristalino	(12.48A) 1.612641509	E.D. 4418.196	17.501 3849	87.12

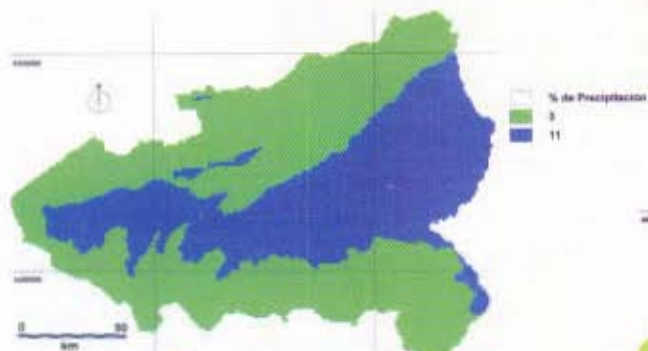
Observación: M.D., margen derecha; M.I., margen izquierda; E.D., aportación de entrada al sistema desconocida.



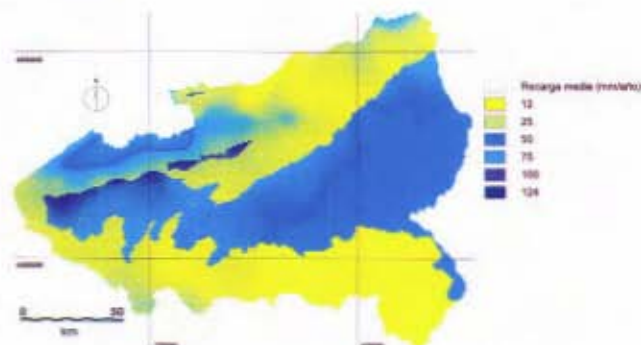
I - Isoyetas: información original rasterizada.



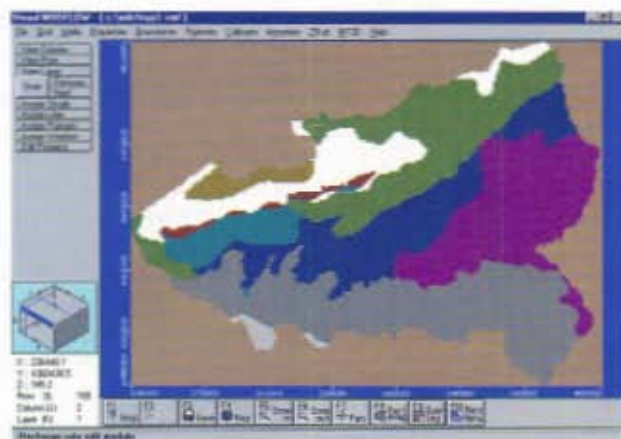
II - Precipitación resultante de interpolación y filtrado.



III - Coeficiente de recarga, en porcentaje de precipitación.



IV - Recarga en el modelo = II x III. Definición continua.



V - Zonas de recargas definidas en el modelo.

Zona de Recarga	Infiltración (mm/a)
□	25,50
■	16,50
■	8,50
■	23,50
■	30,00
■	10,00
■	42,50
■	8,00
■	2,00

Fig. 5.—Tratamiento de la recarga del modelo mediante el Sistema de Información Geográfica

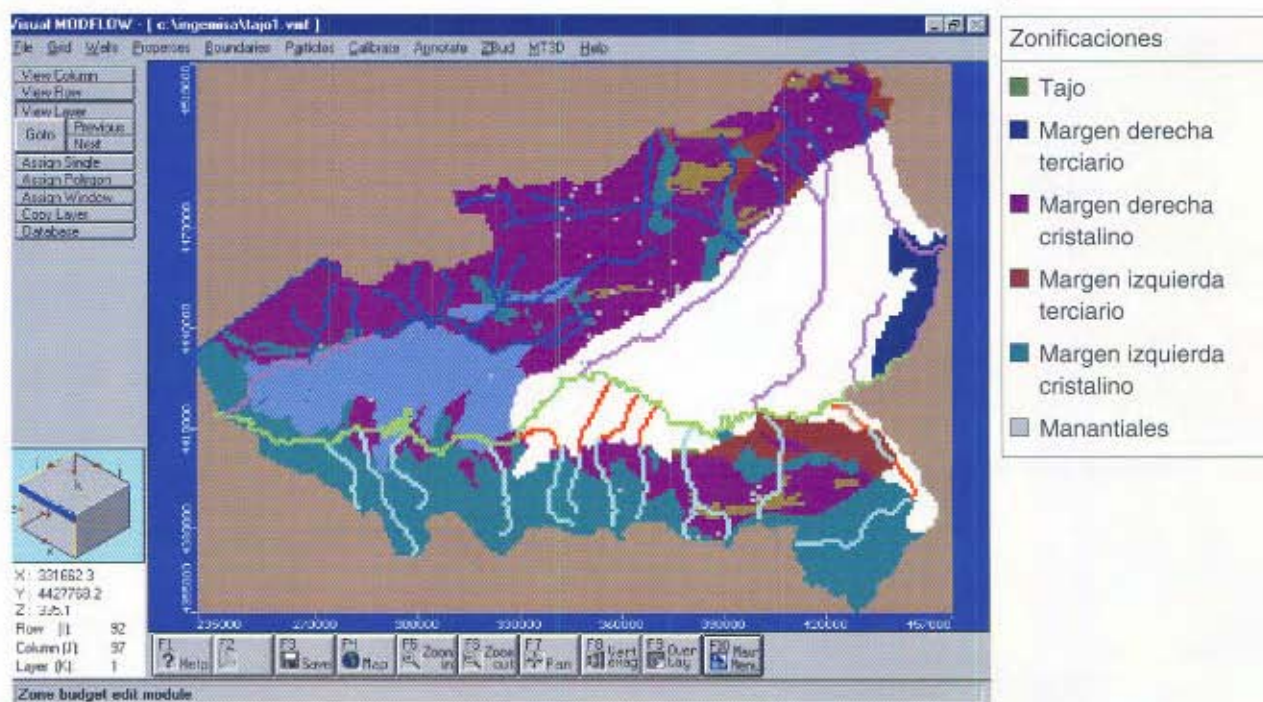


Fig. 6.—Zonificación de ríos y manantiales.

se restituyó a partir del suavizado de la topografía, pues los escasos estudios existentes si bien no permitían la restitución de una piezometría regional, sí sugerían un paralelismo entre la topografía y los niveles piezométricos medidos en los respectivos inventarios.

▪ *Ajuste entre las aportaciones base calculadas y de referencia.* Se evalúan en 30 tramos de la red hidrográfica (véanse fig. 6 y tabla 1). Las aportaciones base de referencia se obtuvieron del estudio de actualización de los recursos de la cuenca del Tajo (CHT, 1998), ya referido.

Resultados del modelo regional

Los resultados de la calibración de los seis modelos fueron sendos conjuntos de parámetros, piezometría y balances hídricos, uno global y 30 en tramos de ríos (fig. 7).

Todos los modelos realizados reproducen una piezometría u obtienen balances hídricos que no difieren sustancialmente entre sí; estos modelos son presentados en las figuras 7 y 8 y en la tabla 1. Sin embargo, casi todos ellos poseen algún rasgo en los resultados que los hace más atractivos que los restantes, como una mejor reproducción piezométrica en un sector o dirección, o balances hídricos más

ajustados a los criterios de referencia. Este hecho refleja fielmente la diversidad regional de las litologías estudiadas, por lo que cada modelo representa parcial y sectorialmente de forma correcta al sistema real. Por ello, todo modelo regional que se basa en hipótesis plausibles ofrecerá resultados medios aceptables y, razonablemente, destaca por la bondad del ajuste en ámbitos espaciales particulares en que la información del modelo se aproxima más al sistema real.

La mayor parte del flujo del agua en las litologías cristalinas y en las rocas metamórficas de bajo grado se localiza en los niveles más superficiales, 0 a 600 m, y en particular en los primeros 200 m, donde se sitúan las zonas de alteración y los sistemas de fracturas de descompresión. Estas últimas permiten definir un sistema de flujo por interconexión de fracturas donde la componente horizontal posee una importancia relativa respecto a la vertical, rasgo que se invierte en niveles más profundos, donde la componente vertical del flujo es claramente preponderante, reflejando las características del sistema de fallas profundo.

La reseña de las conclusiones más relevantes de la modelización se realiza atendiendo a las características de los parámetros calibrados en cada litología, las piezometrías resultantes y los balances hídricos calculados.

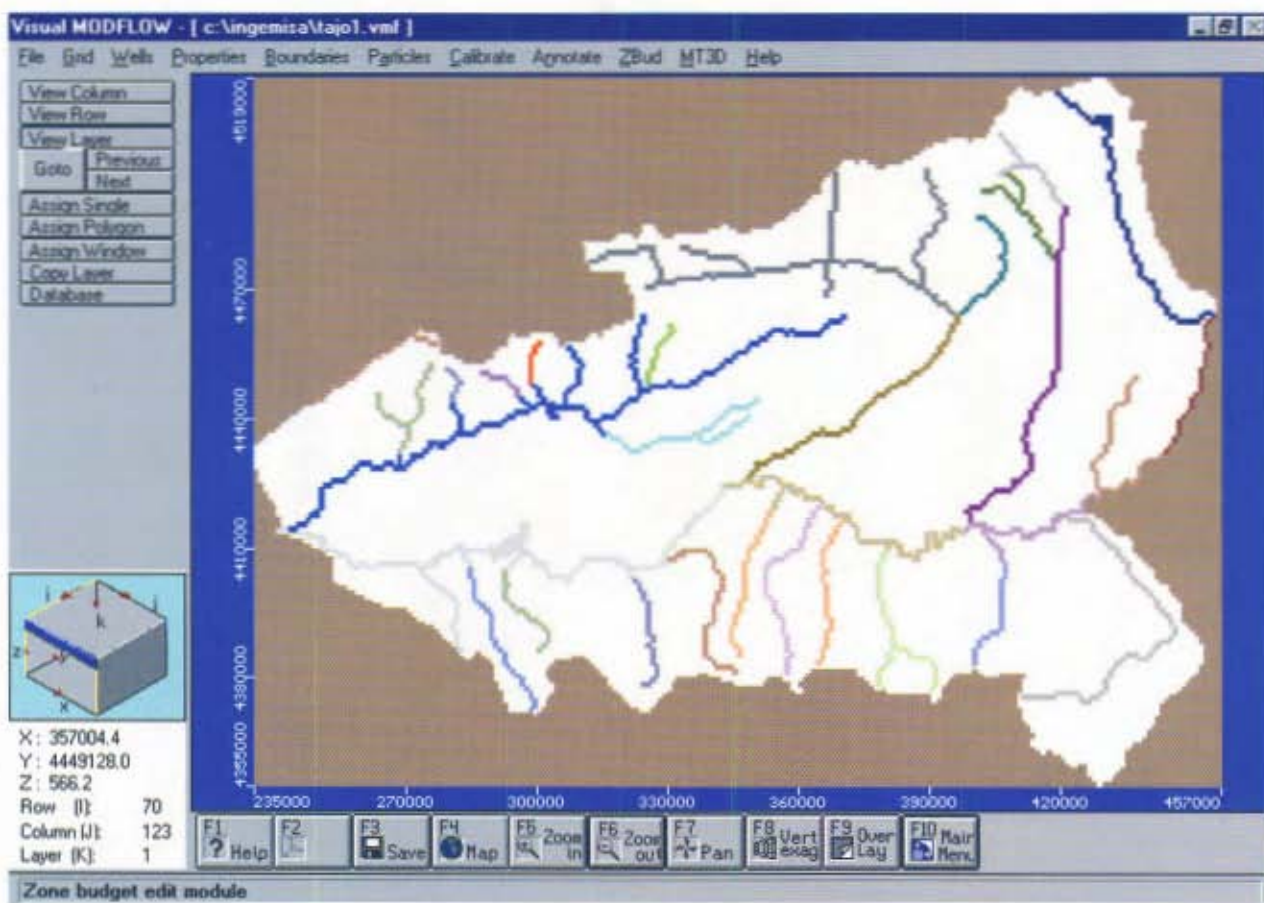


Fig. 7.—Balances hídricos: zonificación para la evaluación de las descargas a los ríos.

Parámetros calibrados: permeabilidad, k

Los rangos de valores de la permeabilidad obtenidos en el terciario detrítico fueron los siguientes:

— En la zona de Campo Arañuelo, $2-1 \times 10^{-5}$ m/s en el nivel 0 a 200 m de profundidad; se reduce un 20 % en el nivel inferior (nivel entre 200 y 400 m de profundidad).

— En el detrítico de Madrid varía entre 2×10^{-6} y 1.5×10^{-6} m/s en el nivel 0 a 200 m de profundidad, siendo un orden de magnitud menor, entre los 200 m y los 1.400 m, y 10^{-8} m/s, entre los 1.400 m y los 3.000 m.

La permeabilidad en el terciario de baja permeabilidad es de 1.0×10^{-6} m/s en el nivel de 0 a 200 m; se reduce uno y dos órdenes de magnitud en los intervalos de 200 m a 600 m y 600 m a 3.000 m, aunque en el intervalo de 1.400 m a 3.000 m los niveles resultan poco sensibles a variaciones en este parámetro.

La permeabilidad vertical, k_z en las litologías terciarias guarda la relación $k_x/k_z = k_y/k_z = 100$.

La permeabilidad en granitos y gneisses, en el modelo isótropo, es $k_x = k_y = 10^{-7}$ m/s, en el nivel de 0 a 200 m. En los modelos anisótropos la resultante del tensor de permeabilidad varía entre estos valores y un 30 % más.

La k en las rocas metamórficas esquistosas, en el modelo isótropo, es $k_x = k_y = 10^{-7}$, en el nivel de 0 a 200 m. En los modelos anisótropos, la resultante del tensor de permeabilidad en estas rocas varía entre estos valores y un 150 % más, en los distintos casos.

Tanto en las rocas ígneas como en las metamórficas, la evolución en profundidad de la permeabilidad sigue, aproximadamente, un modelo de correlación exponencial con la profundidad. La anisotropía vertical guarda la relación $k_x/k_z = k_y/k_z = 1$, en el nivel 0 a 200 m y 0,1 en los niveles restantes. Asimismo, la piezometría calculada es prácticamente insensible a los valores de k en los niveles profundos, 1.400 a 5.500 m.

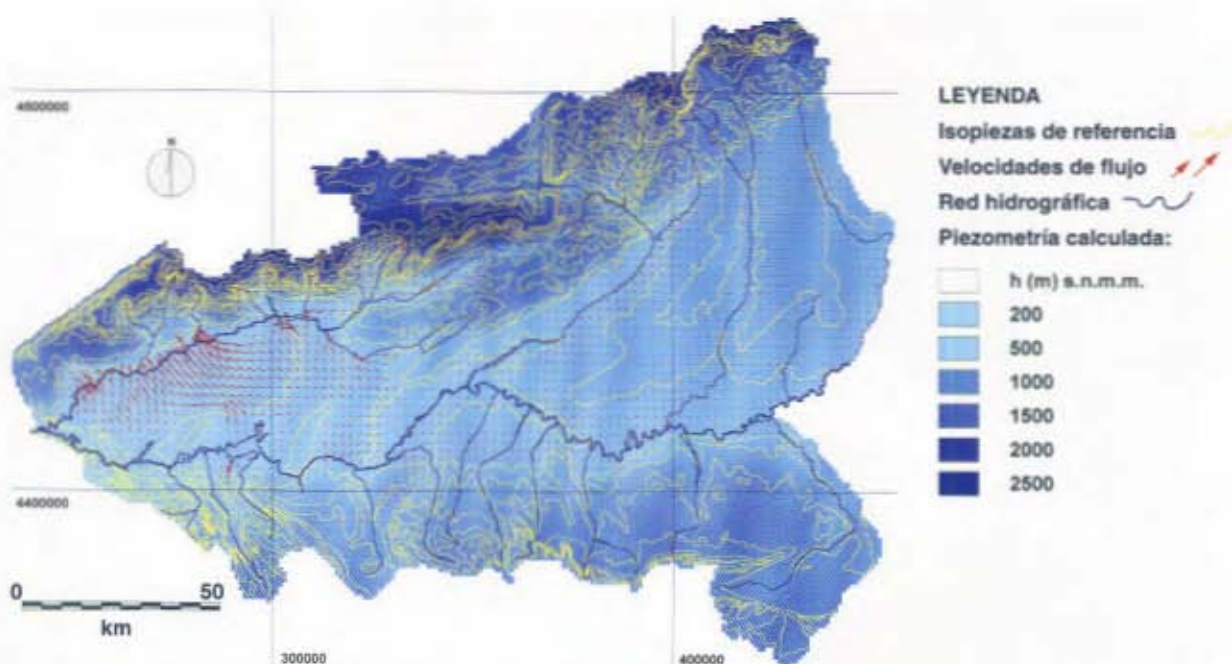


Fig. 8.—Resultados del modelo anisótropo: litologías cristalinas N105° - Litologías esquistosas N140°.

Parámetros calibrados: conexión hidráulica río-acuífero, C_R

Las C_R resultantes para las distintas zonificaciones definidas en la red hidrográfica se muestran en la siguiente tabla:

	C_R en m ² /día
Río Tajo	6.000
<i>Margen izquierda del Tajo</i>	
Cursos sobre Terciario	1.000
Cursos sobre ígneo-metamórfico	5
<i>Margen derecha del Tajo</i>	
Cursos sobre Terciario	1.000
Cursos sobre ígneo-metamórfico	200-100 (Tiétar)
Manantiales	2

El análisis de sensibilidad puso de manifiesto que en la relación río-sistema de flujo, el parámetro más importante era el gradiente hidráulico en la celda de descarga. No obstante, se considera que el modelo tiene la sensibilidad suficiente para otorgar consistencia a la calibración de C_R , exceptuando al C_R correspondiente a los cursos que discurren por la margen izquierda sobre litologías ígneas y metamórficas, pues se considera que dicha calibración puede hallarse mediatizada por unos valores de recarga que, a pesar de haber sido calibrados, deben estar sujetos a revisión. Los resultados del Terciario

en la margen derecha se encuentran en concordancia con los del último modelo realizado en el detrítico de Madrid (DGOH, 1996).

Parámetros calibrados: recarga

Los resultados de los modelos sugieren que la recarga guarda relación tanto con la litología como con la altitud y la latitud en que se produce. Estos dos últimos factores condicionan la precipitación y la evapotranspiración. Así se obtiene las siguientes zonas:

— Norte (sistema Gredos-Guadarrama), para litologías ígneas y metamórficas la recarga varía entre 42,5 mm/año, en las cumbres de Gredos, y 8,5 mm/año, en la zona de El Berrocal. La recarga en este sector representa una media del 2 % de la precipitación, encontrándose dentro del rango que indican estudios realizados en el macizo de El Berrocal por Enresa (ENRESA, 1996).

— Centro (Campo Arañuelo y Detrítico de Madrid) para litologías terciarias detríticas y de baja k , la recarga varía entre 30 mm/año, en el noroeste de Campo Arañuelo, y 10 mm/año, en el límite este del modelo (detrítico de Madrid). Este valor representa un 3 % de la precipitación, próximo al 5 % obtenido por Fennessy *et al.* (1985) mediante la aplicación de métodos geoestadísticos.

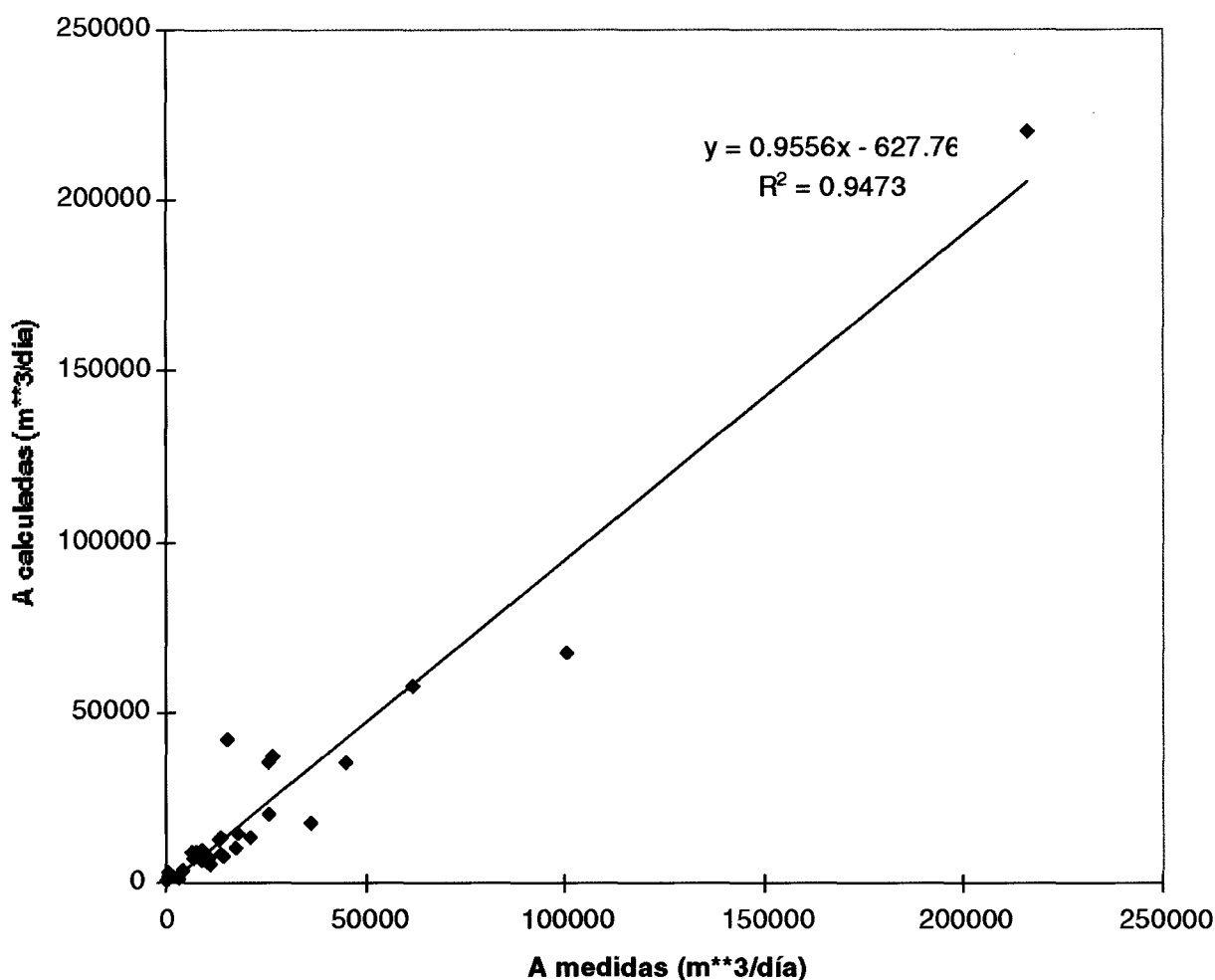


Fig. 9.—Resultados: aportaciones base medidas vs. calculadas (modelo anisótropo: litologías cristalinas N168° - Litologías esquistosas N 140°).

— Sur (Montes de Toledo), para rocas ígneas y metamórficas, la recarga varía entre los 8 mm/año, en el extremo oeste, y 2 mm/año, en el extremo este. Este valor representa en torno al 0,5 % de la precipitación. No existe ningún estudio exhaustivo y riguroso de evaluación de la recarga en esta zona. Por otro lado, atendiendo a las características fitoclimáticas de esta zona, estos valores y aún menores, pueden resultar plausibles. No obstante, queda pendiente de realizarse un estudio riguroso y que contemple la ETP.

Piezometría

La piezometría regional reproducida por los seis modelos se ha caracterizado, según sectores, por lo siguiente:

— En el sector Centro (Campo Arañuelo y Detrítico de Madrid) se obtuvieron buenos resultados en la representación del terciario, tanto en Campo Arañuelo como en el detrítico de Madrid.

— En el sector Norte (Sierras de Gredos y Guadarrama), donde predominan las litologías cristalinas, todos los modelos se han caracterizado, en líneas generales, por definir niveles algo elevados respecto a los de referencia y por reproducir aceptablemente el gradiente piezométrico. Han reflejado con ello la heterogeneidad del medio respecto a accidentes tectónicos, esquistosidad y presencia de diques. La dimensión de las celdas, 1 km x 1 km, contribuyó a limitar la calidad de la representación piezométrica.

— En el sector Sur (Montes de Toledo), donde predominan los esquistos, los modelos que mejor representan la piezometría son los que definen una

dirección de anisotropía para estas formaciones de N 140° o mayor o N 40° o menor. La observación realizada para el sector Norte, sobre la heterogeneidad del medio en cuanto a accidentes tectónicos y esquistosidades acerca de la limitación para representarlos y la incidencia de ello en los resultados es asumible en esta zona.

Balance hídrico

Los balances hídricos globales de todos los modelos poseen las mismas características. Estas son las siguientes: una recarga procedente de la infiltración de la lluvia —no existen tramos de ríos perdedores— y una descarga del sistema casi exclusivamente hacia los ríos; hacia los manantiales se produce también una descarga que se cifra entre 1,6 l/s y 2,4 l/s por celda; un excelente ajuste y una alta correlación (0,9443 a 0,9488) entre las aportaciones base, A_B , datos y calculadas y una localización estable de aquellos tramos en los que no se alcanzaba un buen ajuste.

Los ajustes de las A_B en los distintos tramos en el Terciario no ofrecen una variación significativa de un modelo a otro. Sin embargo, los ajustes de los tramos en cristalino o en las rocas metamórficas de bajo grado sí difieren de un modelo a otro, mejorando o no la calidad del ajuste, en la medida que la/s dirección/es de anisotropía representada/s se acerquen o disten de las imperantes en cada tramo.

Evaluación de la configuración SIG-CNMH

La configuración aplicada fue ARC/INFO-IDRISI-VISUAL MODFLOW. ARC/INFO es el SIG origen y destino final de la información. IDRISI es el SIG que incrementa la potencia de análisis y que por su capacidad exportadora e importadora amplía la posibilidad de captar nueva información. VISUAL MODFLOW es el código numérico de modelización, sumamente dúctil y ágil para poder definir interactivamente de forma gráfica la estructura de un modelo.

La potencialidad de IDRISI y VISUAL MODFLOW en los rasgos que motivaron su elección (capacidad exportadora/importadora y ductilidad en la definición de modelos complejos) resultaron muy superiores a las expectativas iniciales. No obstante, la interfaz gráfica-interactiva de VM para construir la estructura de un modelo, permite un grado de definición especial de las condiciones de contorno y puntos de observación, superior al que realmente posee la estructura del modelo en diferencias finitas. Ello no sólo es superfluo, sino que puede inducir a

usuarios neófitos a una valoración equivocada de la capacidad de representación del modelo elaborado. Esta disociación se revela más notoria en modelos regionales de gran escala en los que la dimensión de las celdas puede ser del orden de 0,5 a 2 km.

Los formatos vínculos entre las distintas aplicaciones informáticas son el *.DXF, en primer lugar, y el ASCII. Este último lo es con posibilidades más limitadas. La relación entre ARC/INFO e IDRISI se realiza mediante protocolos particulares y estándares ampliamente utilizados.

Evaluación de la modelización regional

El primer rasgo a resaltar de esta modelización hidrogeológica regional es su carácter integrador. Para su puesta en marcha, se integraron tanto la información como los modelos del área temática de los recursos hídricos cuyos contenidos no habían sido contrastados, hasta ahora, de forma interrelacionada. Las principales fuentes de la información que se incorporaron, contrastaron, revisaron e integraron al modelo fueron:

- Información existente en ENRESA sobre el área, en especial la relativa a el batolito de El Berrocal.

- Información procedente del ámbito universitario, en particular, enmarcada en las formaciones terciarias de la cuenca de Madrid y del Campo Arañuelo.

- Últimos avances en la evaluación de recursos hídricos realizados por el Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX)-Confederación Hidrográfica del Tajo (CHT).

- Estudios hidroclimáticos del Plan Hidrológico del Tajo (CHT).

- El último modelo de flujo del acuífero detrítico de Madrid, elaborado por la DGOH (DGOH, 1996), que es el último modelo realizado sobre este acuífero.

- Los avances de los últimos estudios sobre accidentes tectónicos a escala regional, como el estudio SHISTO-SIGMA (CSN, 1998), y local como el proyecto HIDROBAP (Paredes, 1997) de ENRESA-CSN.

Los resultados del trabajo de modelización, al estar basados en este ingente proceso de integración, se han convertido, a su vez, en un marco de información útil y básico para abordar próximos estudios análogos en el área, tanto a escala regional como local.

En la valoración de los resultados debe considerarse la limitación que introduce la escala de representación en una modelización regional. La escala de trabajo es un compromiso que se alcanza entre

los siguientes factores: la capacidad numérica de los equipos y códigos computacionales a emplear; las características de los elementos del modelo conceptual que se desea representar; la densidad, representatividad y situación espacial de la información disponible y, finalmente, el grado de detalle que se quiera ofrecer en los resultados.

La valoración que se hace de los resultados y representación de los distintos elementos del modelo se reseñan a continuación.

— La partición espacial, celdas en planta de 1 km x 1 km y cinco niveles o capas de mallado, define un total de 104.755 de celdas. Esta dimensión del mallado guarda un equilibrio y extrema los recursos entre la dimensión del ámbito geográfico (20.951 km²), la geometría de las litologías, las exigencias numéricas y los equipos computacionales empleados.

— En las litologías sedimentarias, la discretización espacial permitió una adecuada representación de las distintas formaciones. La limitación para alcanzar mejores ajustes piezométricos radicaron en la exigencia de evitar la sobreparametrización. Si el modelo tuviera un enfoque más localizado, la partición definida y una revisión de la información empleada podrían dar soporte a una zonificación de permeabilidades de mayor detalle.

— En las litologías ígneas y metamórficas, la discretización definida no ofrece el grado de detalle requerido para representar o constatar de forma específica la información existente. Sin embargo, estas litologías se caracterizan por una gran diversidad en la manifestación de sus rasgos, una información con una representatividad de carácter local a puntual y que, por otro lado, se concentra en enclaves determinados, existiendo importantes lagunas espaciales de información. Todos estos aspectos se hallan reñidos con un tratamiento regional o una conceptualización global. Los resultados en estas litologías alcanzados por el modelo ofrecen una aceptable representación regional, contemplando posibles, y esperables, desviaciones locales.

— Las familias de accidentes tectónicos estudiadas en los distintos modelos como posibles condicionantes de direcciones de flujo preferente son las indicadas en los últimos y más importantes trabajos regionales y locales en el dominio del modelo; la resultante del análisis de posibles direcciones preferentes realizado en este estudio es coincidente con los datos aportados por aquellos trabajos. La representación de los accidentes tectónicos se realiza tratando como medios anisótropos las litologías pertinentes, desestimándose la modelización discreta de las fallas. Esta opción de representación, impuesta por la limitación de los recursos del CNMH utiliza-

do, es coherente con la magnitud regional del modelo, la alta densidad y diversidad tectónica existente y el carácter de primer avance en el conocimiento regional de este estudio. Estas consideraciones no dejan de contemplar las limitaciones que implica este tipo de representación.

— La red hidrográfica definida es adecuada para alcanzar, acorde a la información disponible, una correcta representación regional de la piezometría y efectuar los balances hídricos parciales y globales. Ello ha permitido una notable revisión de los valores y patrones espaciales regionales de la recarga. Estos resultados ofrecen consistencia por sustentarse en datos de orígenes diversos e independientes. Las características de la recarga obtenida coinciden con trabajos existentes, cuya valoración, en su momento, estuvo mediatizada por la originalidad de sus apreciaciones.

Conclusiones

— Este modelo hidrogeológico regional de la cuenca media del Tajo aporta un primer e importante avance en cuanto a la modelización de un área extensa y compleja. En él se tratan, por primera vez de forma conjunta, ámbitos litológicos muy distintos, con sus particulares relaciones con la red hidrográfica y en el que se representan, si bien con simplificaciones, los complejos rasgos tectónicos de la región.

— La elaboración del modelo significó la integración y contraste de información procedente de fuentes distintas e independientes, permitiendo validar parte de esta información y sugiriendo su revisión crítica. Asimismo aporta una nueva perspectiva a las valoraciones precedentes, como en el caso de la recarga.

— El modelo adopta simplificaciones al tratar distintos elementos del sistema de flujo, necesarias por el extenso marco geográfico que cubre. Esto obliga a una partición espacial algo grosera, que limita su sensibilidad para la representación, y a adoptar valores medios, cuando regionalmente una variable dada presenta una importante dispersión. La representación de la tectónica regional mediante la imposición de propiedades anisótropas a las litologías cristalinas y esquistosas es un ejemplo de lo anteriormente expuesto. Ello independientemente de la eventual anisotropía intrínseca de las mismas. Sin embargo, en el marco de un modelo de estas características un tratamiento discreto de la tectónica del medio no se considera viable.

— El trabajo integrado de la configuración SIG-CMNH propuesta (ARC/INFO-IDRISI-VISUAL MODFLOW) ha probado que otorga a las labores

de modelización mayor potencia y versatilidad. En particular para modelos de estas características, cuyo marco geográfico es extenso y complejo. Asimismo se debe resaltar el balance positivo que arroja, no sólo en el uso integrado de las herramientas informáticas seleccionadas, si no además el que ofrece el trabajo particular con VISUAL MODFLOW e IDRISI.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte del proyecto 98-SHMR-IF de INGENISA. Agradecemos a ENRESA y al CSN el habernos facilitado los datos de los proyectos Berrocal y SHISTOSIGMA.

Referencias

- Cadavid, S. (1977). Mapa estructural del techo del basamento del borde meridional de la Sierra de Guadarrama. *Bol. Geol. y Min.*, tomo 88: 494-496.
- CHT (1988). *Plan Hidrológico del Tajo. Documentación básica*. Confederación Hidrográfica del Tajo-Dirección General de Obras Hidráulicas, MOPU, Madrid.
- CHT (1998). *Actualización de los Recursos de la Cuenca del Tajo*. Confederación Hidrográfica del Tajo-MMA, Madrid.
- CSN (1998). *Proyecto SIGMA*. Colección Otros documentos, CSN, Madrid.
- Coletto, I. (1986). *Aplicación de técnicas hidrogeoquímicas al análisis del sistema de flujo de las aguas subterráneas. Cuenca del Alberche*, Tesis de licenciatura, UAM, inédito.
- DGOH (1996). *Evaluación de usos de aguas subterráneas y realización de un modelo de flujo del acuífero de Madrid*. DGOH-Subdirección general del Servicio Geológico, MOPU, Madrid.
- ENRESA (1996). *El Berrocal Project. Topical Reports*, cuatro volúmenes, ENRESA, Madrid.
- Fennesy, P. J., Neuman, S. P., y Carrera, J. (1985). Estimación de la recarga en el acuífero de Madrid mediante modelos estocásticos. *Canal de Isabel II, Madrid, PIAM*, 12: 39-51.
- Goodchild, M., Steyaert, L. y Park, B. (1996). *GIS an Embironmental Modeling: Progress and Research issues*. Edit. John Wiley & Sous, Inc. 486 págs.
- Herráez, I. (1983). *Análisis de las variaciones de los isótopos ambientales estables en el sistema acuífero terciario detrítico de Madrid*, Tesis Doctoral, UAM, Madrid.
- JEN (1980). «*Proyecto Tiétar*». *Investigación de uranio en los materiales graníticos de un sector del Sistema Central*. Informe previo 281/6, tomos I y II, 383 págs.
- Jones, B. F., y Llamas, M. R. (1989). Normative analysis of groundwaters from the Madrid Basin. Spain. *6th Congreso Internacional sobre Interacción Agua-Roca*, Douglas Miles editor, Rotterdam: 341-347.
- Llamas, M. R. (1987). Recursos Hídricos. Cap. 3 del libro *La naturaleza en Madrid*. Comunidad de Madrid, Consejería de Agricultura y Ganadería, Madrid: 95-132.
- Martín-Loeches, M. (1995). *Hidrogeología de las rocas ígneas y metamórficas de un sector de la cuenca hidrográfica del río Alberche y su relación con las aguas subterráneas de la cuenca de Madrid*, Tesis Doctoral, UAH.
- Martín-Loeches, M., Muñoz, I., Sastre, A. y Vicente, R. (1997). *Brackish groundwater manifestations in the meridional limit of Spanish Central System. Hydrogeology of hard rocks*, Ed. AIH-GE: 267-290.
- Molina Pérez, A. (1989). *Procesos geoquímicos de interacción roca-agua relacionados con el flujo subterráneo en las arcosas del acuífero de Madrid*, Tesis Doctoral, UCM.
- Octavio de Toledo (1975). *Estudio hidrogeológico de la cuenca alta del río Guatén*, Tesis de licenciatura, UCM, inédito.
- Paredes, C., Muñoz, A., Vives, L., Pérez, E., Galindo, C., Serrano, A., Casquet, C., Eraso, A., Mazadiego, L., Llamas, J., De Vicente, G., Carrera, J., Elorza, F. J., Vela, A. y Bajos, C. (1997). Modelización estocástica de las fracturas hidrogeológicamente conductivas de El Berrocal (proyecto Hidrobap). *Hydrogeology of hard rocks*, Ed. AIH-GE: 183-198.
- Rebollo, L. (1977). *Estudio hidrogeológico regional de la cuenca media y baja del río Guadarrama*, Tesis Doctoral, UCM, Madrid.
- Sastre, A. (1978). *Hidrogeología regional de la cuenca terciaria del río Alberche*, Tesis Doctoral, UCM, Madrid.
- SGOP (1982). *Modelo digital para la simulación del embalse subterráneo de la fosa del Tajo*. SGOP, MOPU, Madrid.
- Vicente, R. (1986). *Hidrogeología regional de la depresión del Campo Arañuelo*, Tesis Doctoral, UAH.
- Yélamos, J. G. (1991). *Hidrogeología de las rocas plutónicas y metamórficas en la vertiente meridional de la Sierra de Guadarrama*, Tesis Doctoral, UAM.

Recibido el 26 de mayo de 2000.

Aceptado el 17 de julio de 2000.