

Estudios preliminares para el diseño de una instalación de recarga artificial en la zona oriental del acuífero de "El Carracillo, Segovia"

C. Macías Antequera⁽¹⁾, R. Martínez Gamo⁽²⁾ y J. Martínez Rubio⁽³⁾

(1) Grupo de hidrogeología de la Gerencia de Planificación y Gestión Hídrica de TRAGSATEC. C/ Julián Camarillo, Edificio 6B, 28037. Madrid
cmaa@tragsa.es

(2) Grupo hidrogeología de la Gerencia de Planificación y Gestión Hídrica de TRAGSATEC. C/ Julián Camarillo, Edificio 6B, 28037. Madrid
rmg@tragsa.es

(3) Gerente de Planificación y Gestión Hídrica de TRAGSATEC. C/ Julián Camarillo, Edificio 6B, 28037. Madrid
jmr@tragsa.es

RESUMEN

Desde los años 90, la Dirección General de Desarrollo Rural del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, en coordinación con la Consejería de Agricultura de la Junta de Castilla y León ha desarrollado diversas actuaciones encaminadas a definir y conocer el comportamiento del acuífero de El Carracillo frente a ensayos de recarga artificial en superficie. En el año 2006 se puso en marcha, con la colaboración del Grupo Tragsa, la recarga artificial del acuífero con los excedentes invernales del río Cega en su área occidental, sector con una insuficiente capacidad para cubrir toda la demanda de agua de la región. Impulsados por esta situación, se iniciaron los trabajos necesarios para conocer con exactitud las posibilidades del acuífero en el sector oriental (zona almacén). Entre las actividades desarrolladas destaca la perforación de 27 sondeos, con obtención de testigo continuo, además de 6 sondeos de investigación hidrogeológica, en los que se desarrollaron ensayos de bombeo, tanto individuales como de forma conjunta. Se estimó la tasa de infiltración vertical y se cuantificó la superficie susceptible de recarga. Se estudió además la química del agua de recarga procedente del río Cega y del agua del acuífero con objeto de estimar cuáles pueden ser los cambios composicionales que se puedan producir en esta última como consecuencia de la recarga artificial. A partir de los datos obtenidos se actualizó el modelo matemático previamente elaborado, realizando diferentes simulaciones de los posibles escenarios previstos.

Palabras clave: Acuífero, Carracillo, estudios hidrogeológicos, recarga artificial, río Cega.

Preliminary studies for the design of an artificial recharge plant in the eastern part of the "El Carracillo" region, Segovia

ABSTRACT

Since the 90s, the General Directorate for Rural Development of the Ministry of Agriculture, Food and Environment, in coordination with the Department of Agriculture of the Regional Government of Castile and Leon, has carried out various activities with the aim of defining and understanding the behaviour of the Carracillo aquifer compared to artificial recharge trials on the surface. In 2006, with the collaboration of the Tragsa Group, artificial recharge with winter surplus of the Cega River in the western paleo-landform area was initiated. This sector has insufficient capacity to respond to all the water demand of the region. Driven by this situation, the work required to ascertain the possibilities of the aquifer in the western storage area sector were started. Among the activities carried out, the drilling of 27 boreholes to obtain continuous samples should be highlighted, plus 6 hydrogeological investigation boreholes, in which pumping tests were made, both individually and jointly. The vertical infiltration rate was estimated and the surface area for recharging was quantified. The water chemistry of the recharges from the Cega River and of the native aquifer was also studied in order to foresee what might be the compositional changes in the aquifer water. Based on this data a mathematical model, which had been developed in 2001, was updated by carrying out various simulations of possible scenarios.

Key words: artificial recharge, aquifer, Carracillo, the Cega river, hydrogeological studies.

ABRIDGED ENGLISH VERSION

Introduction and background

The region of El Carracillo, located in the north of the province of Segovia between the rivers Cega and Piron (Figure 1), is one of the regions with the greatest economic interest in Castile and Leon, having an irrigable area of approximately 7,500 ha. Continued groundwater withdrawals from the aquifer have caused steep drops in levels, which have resulted in a structural imbalance between the extractions and the ability of the aquifer to regenerate.

Given the socio-economic importance of the use of groundwater resources in the region, and the scenario described above, the Directorate General of Rural Development of the Ministry of Agriculture, Food and Environment in coordination with the Department of Agriculture of the regional Government of Castile and Leon has undertaken the necessary measures aimed to both study and define the aquifer of El Carracillo and to manage the water resources available in the region.

After analyzing the problem, it was decided that the main action should be the recharge of the aquifer through the infiltration of surface water from the winter surplus of the Cega River.

In 2000, the work for the catchment of water in the Cega River was carried out during a preliminary phase; the diversion dam (Salto de Abajo) was repaired, from which emerge pipes (900 and 1,200 mm in diameter and 20 km long) which, in turn, provide 4 outputs (photos 1, 2 and 3). In 2004, the execution of the project work was approved and a distribution network to channel those waters through the unconfined aquifer was constructed, so as to promote an even infiltration and winter recharge throughout the quaternary structure. The infiltration surface was obtained from the renovation of existing water courses and streams and from the recovery of those partially missing (photos 4, 5 and 6). Thus, the volume of recharge water was directed towards the western sector of the aquifer known as the paleo-landform area.

Once the artificial recharge was underway from 2006 onwards, hydrogeological studies detected that the western sector of the aquifer did not have enough capacity for the demand of the entire region. The municipalities located in the northern part of the region, where there is no quaternary aquifer and therefore no recharge capacity, were not supplied.

Faced with this unresolved problem and based on the results of the hydrogeological studies carried out, the El Carracillo User Community requested the Ministry of Agriculture, Food and Environment to draft a project to bring water from the aquifer in the western (storage area) sector and lead it in a pressurized manner to the areas without recharge capacity (Figure 1).

Which is why the Tragsa Group, at the request of the Directorate General for Water of the Ministry of Agriculture, Food and Environment and the Department of Agriculture of the regional Government of Castile and Leon, is currently drafting the "Project on Infiltration and Regulation for the Hydraulic Management of Aquifer Los Arenales in the east of the El Carracillo region (Segovia)".

Objectives

The main objective of the hydrogeological work was to ascertain the possibilities of the eastern storage area sector to provide water, so that the necessary operation and size of the construction work could be planned.

The research work and the aquifer characterization developed until 2001 (Galán et al., 2001) allowed us to know that in the eastern sector there was a geological structure formed by an ancient tertiary valley with sand from more recent years. This made it possible to think about its use as an operational and storage area. The valley was permanently saturated with water, presenting a water table a few metres below the surface level (Figures 2 and 3).

To carry out an appropriate water management of the use of this geological structure as a reservoir required a specific project based on reliable and proven data. The research developed and presented in this paper has attempted to answer the unknown and potential problems regarding the use of the El Carracillo quaternary aquifer as a hydraulic control system in the storage area.

Work and results

a) Continuous Sampling Borehole Drilling Campaigns

A first characterization of the aquifer was conducted by the Tragsa Group in 2001 (Galán et al., 2001). As the information about the geometry of the storage area from the 2001 study was insufficient for the purposes of the "Project on Infiltration and Regulation for the Hydraulic Management of Aquifer Los Arenales in the east of the El Carracillo region (Segovia)", 27 continuous sampling boreholes were drilled on 18 different sites in

2002 and 2005 (called boreholes "A" and boreholes "P" respectively). To this end, boreholes "A" and "P" were drilled to be fully penetrative in the quaternary sands (Figure 4).

b) Drilling of Hydrogeological Investigation Boreholes and Individual Pumping Tests

Besides performing continuous sampling boreholes, 6 hydrogeological investigation boreholes, referred to as "SH", which fully penetrated the aquifer, were drilled in 2003. They were located in one of the zones of greatest sand thickness (Figure 5).

The pumping tests of the boreholes drilled in 2003 ("SH") were carried out during the summer of 2004. In each borehole a step-drawdown test and constant rate test were carried out. The goal of these tests was to obtain the hydraulic parameters of the environment of the catchments (Table 1) and the possibilities of exploitation.

c) Joint Extraction Test

In 2005, a year after the completion of the individual pumping tests, the Tragsa Group conducted a joint extraction test in 5 of the 6 hydrogeological boreholes over a period of 16 days. Thanks to this test, the pumping cone generate (Figure 6) was characterized proving the technical feasibility of this type of exploitation and quantifying the reserves in the storage area.

d) Monitoring of the Piezometric Development during six hydrological years

During a total of five years (from 2000 to 2005) the water levels of all the boreholes located in the study area were measured, observing their performance in the natural regime and the effect produced by the pilot artificial recharge test, which was conducted in the area in 2003 (Figure 7).

e) Estimation of the Vertical Infiltration Rate of Quaternary Sands on the basis of the data obtained from a constant rate test

An infiltration test was carried during the pumping test campaign of 2004. A vertical infiltration rate of the sandy soil in the storage area of 4.62 m/day was obtained. Figure 8 shows the bathymetry map of the flooded area caused during the test.

f) Natural Water Course Recharge Test (Ternillo stream) during the joint exploitation test

In the summer of 2005, an infiltration test was conducted to determine the infiltration rate of the natural courses running through the storage area. To this end, water drawn from the aquifer by the pumping test, was moved into the Ternillo stream. In addition, two gauged campaigns were driven (Table 2) obtaining the infiltration rate of each of the gauged sections.

g) Estimation of the Areas Subject to Recharge

A calculation of the areas subject to recharge, such as the depressions (flat or slightly depressed areas located between the dunes) was carried out, in areas where the depth of the aquifer was higher than 15 m (Figure 9). Taking into account these limitations, the total area calculated was 15.74 km²

h) Feasibility Study on Artificial Recharge in the "storage area" from the hydrochemical point of view

In order to predict what may be the compositional changes in aquifer water, recharge from the Cega River and the water from the aquifer was analyzed (Table 3). The results of the study showed no significant alterations in the composition of the water of the aquifer and that it will comply with the Spanish legislation on water reuse.

i) Simulation of Different Scenarios in the Mathematical Model

A mathematical model of groundwater flow simulation has been developed in order to predict and evaluate the response of the aquifer to the planned artificial recharge processes, as well as its response to other actions that might arise (pumping tests, simulation of exploitations, etc.).

Multiple changes have been made to the first mathematical model developed in 2000 (Galán et al., 2001), on the basis of new data obtained to refine the knowledge of the aquifer. The last change made to the model consisted of an update that took place in 2006, once the results of the latest above mentioned tests had been analyzed (Figure 10).

Conclusions

The main conclusions of the hydrogeological studies undertaken to elaborate the "Project on Infiltration and Regulation for the Hydraulic Management of Aquifer Los Arenales in the eastern of the El Carracillo region (Segovia)" were:

- 1. The continuous sampling boreholes provided a detailed knowledge of the geometry of the eastern area of the El Carracillo aquifer, known as the storage area allowing the Tragsa Group to define the suitable areas for artificial recharge.*
- 2. The permeability and transmissivity values obtained from pumping tests are suitable for carrying out refueling operations.*
- 3. The joint extraction tests confirmed that the exploitation design will be viable.*
- 4. The follow-up study of the piezometric evolution proves that the natural regime is in the eastern part of the aquifer.*
- 5. The vertical infiltration rate of sandy soil is 4.62 m / day.*
- 6. The infiltration rate in natural channels with presence of vegetation is around .89 to 0.67 m / day.*
- 7. The surface capable of receiving flows from the Cega River (depressions on the land with aquifer thickness greater than 15 m) is 15.74 km²*
- 8. Taking into account the composition of the recharge water, a significant impact which would induce groundwater problems during the recharge operation it is not expected.*
- 9. The results of successive mathematical model simulations will determinate the final size of the artificial recharge.*

Introducción y contexto

La comarca de El Carracillo se encuentra en el norte de la provincia de Segovia (figura 1), enmarcada dentro de la llamada Tierra de Pinares. Presenta una extensión de unas 15.000 hectáreas y se extiende entre los ríos Pirón y Cega. Forman parte los términos municipales de Sanchonuño, Gomezserracín, Chatún, Campo de Cuéllar, Arroyo de Cuéllar, Narros de Cuéllar, Chañe, Fresneda de Cuéllar, Remondo, Navalmanzano y Samboal.

La comarca se ubica dentro de la masa de agua subterránea 022.045 Los Arenales (figura 1). Esta masa está constituida por las arenas, limos, arcillas y margas que componen el relleno terciario de la cuenca sedimentaria del Duero originada por reactivación, a finales del Cretácico, de los sistemas de fallas tardihercínicas del Macizo Hespérico. Estos materiales, de naturaleza fluvial, se disponen en capas lenticulares de arena distribuidas en una matriz limosa o arcilloarenosa, que, en conjunto, presentan espesores entre 500-1000 m. Los materiales cuaternarios se disponen discordantes recubriendo parcialmente los sedimentos terciarios. En el extremo Noreste los depósitos terciarios quedan confinados bajo las calizas del Páramo de Cuéllar, mediante los materiales de la Facies Cuesta.

Los sedimentos depositados durante el Cuaternario constituyen la unidad acuífera objeto del presente estudio y ocupan casi totalmente la zona formando una capa o manto que recubre los materiales más antiguos. Como se aprecia en la figura 2, estos sedimentos se caracterizan por tener diversos orígenes; de-

pósitos fluvio-eólicos, formados por arenas arcósicas y arcillas, de edad pleistocena; depósitos fluviales, formados por arenas, gravas y limos los cuales dan lugar a las terrazas en la margen izquierda de los ríos Cega y Pirón; y eólicos, que están compuestos por arenas eólicas y en las que se pueden diferenciar dos unidades morfoestructurales dentro de estas arenas, el manto eólico y el campo de dunas, formado por el manto dunar y el cordón dunar. También existen fondos endorreicos-lagunares, formados por limos, arcillas y materia orgánica.

Las figuras 1 y 3 muestran el contorno de lo comúnmente denominado acuífero de "El Carracillo", donde los depósitos cuaternarios presentan su mayor espesor saturado.

La actividad económica principal de la comarca está ligada a la agricultura, con una superficie regable que abarca unas 7500 ha, de las que se riegan unas 3300 ha por campaña. Los cultivos más importantes son la zanahoria, patata, fresa, col, puerro, lechuga, maíz dulce y endibia. En esta comarca se produce el 90% de la remolacha dulce de mesa y un elevado porcentaje de la zanahoria y el maíz dulce que se comercializa en toda España. Este hecho, ligado a la gran calidad de sus productos, hace de ella una de las comarcas de mayor interés económico de Castilla y León.

El paso de las tierras de cultivo de secano a regadío, desarrollado por iniciativa privada en los años setenta del pasado siglo, a partir de la explotación de pozos del acuífero cuaternario superficial, determinó el auge económico de la comarca, incentivado por el hecho de que la proximidad del nivel freático con la superficie permitía un regadío intensivo a bajo coste.

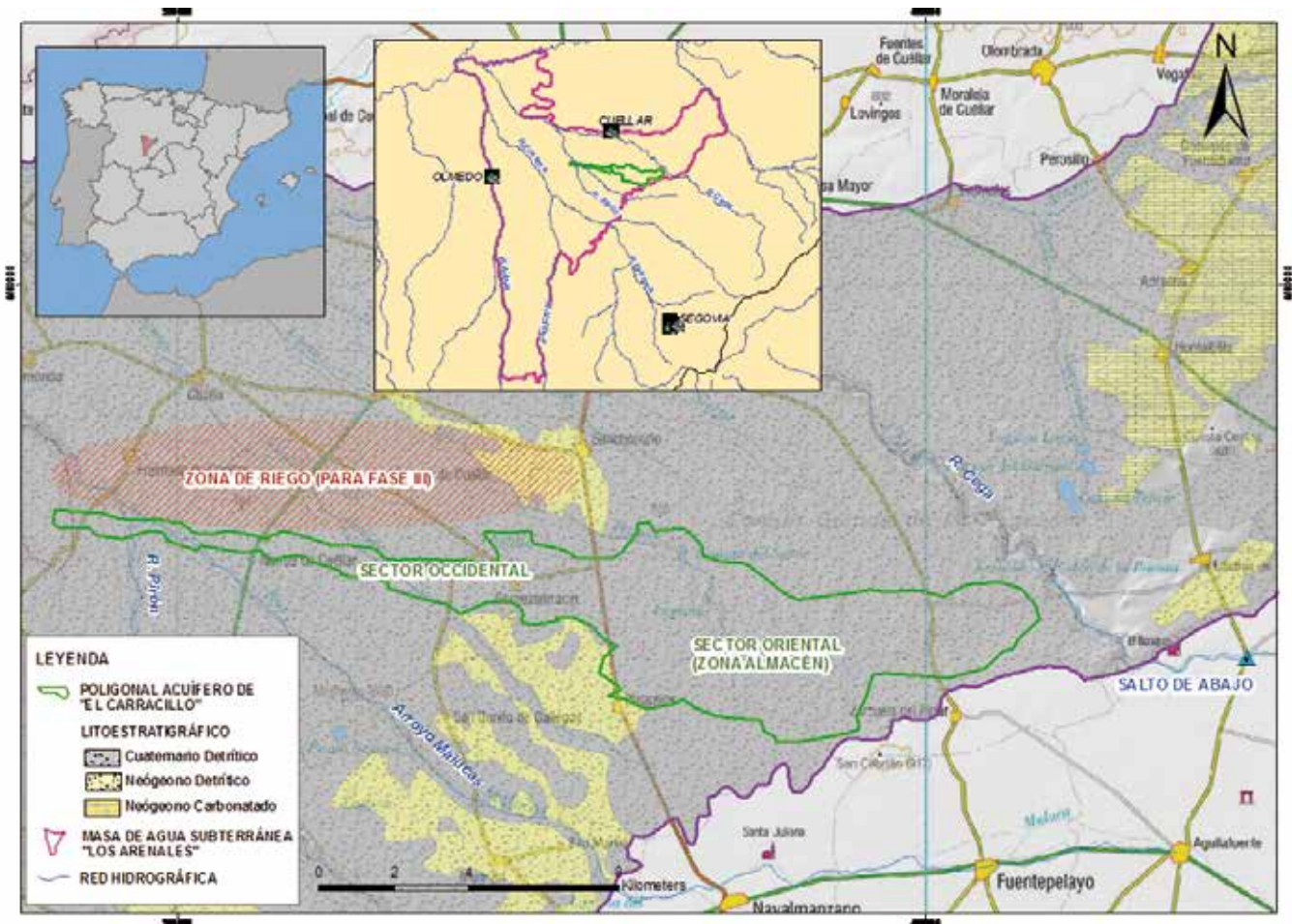


Figura 1. Plano general de situación de la comarca de El Carracillo.
Figure 1. General map of the situation of the El Carracillo region.

Pero las continuas extracciones de agua subterránea del acuífero ocasionaron descensos acusados en el nivel piezométrico que derivó en un desequilibrio estructural entre las extracciones y la capacidad de recuperación del acuífero.

Dada la importancia socioeconómica del uso de los recursos subterráneos en la comarca, y ante el escenario descrito, la Dirección General de Desarrollo Rural del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medioambiente, en coordinación con la Consejería de Agricultura de la Junta de Castilla y León, ha desarrollado diversas actuaciones encaminadas tanto a estudiar y definir el acuífero de la zona de El Carracillo como a aprovechar los recursos hídricos disponibles en la región.

Una vez analizada la problemática, tratadas las posibles soluciones con los propios usuarios y con ayuda de los resultados de los trabajos de investigación y caracterización del acuífero, se decidió como principio

de acción la recarga del acuífero por infiltración en superficie con aguas procedentes de los excedentes invernales del río Cega.

Así, el 20 de agosto de 2000 fue aprobada la ejecución de las obras del "Proyecto de Trasvase del río Cega a la comarca del Carracillo (Segovia)" y se encargó su realización a la empresa Tragsa. En esta primera fase (Fase I), se realizaron las obras para la captación de agua del río Cega; reparándose el azud de derivación (Salto de Abajo, figura 1), desde el cual parte una conducción en tubería de 900 y 1200 mm de diámetro y 20 km de longitud con 4 salidas (fotos 1, 2 y 3).

Continuando con el plan de acción, el 19 de abril de 2004 se aprueba la ejecución de las obras del proyecto "Recarga del sector occidental del acuífero de Los Arenales en la comarca de El Carracillo (Segovia)"; y nuevamente se encargó la realización a la empresa Tragsa.

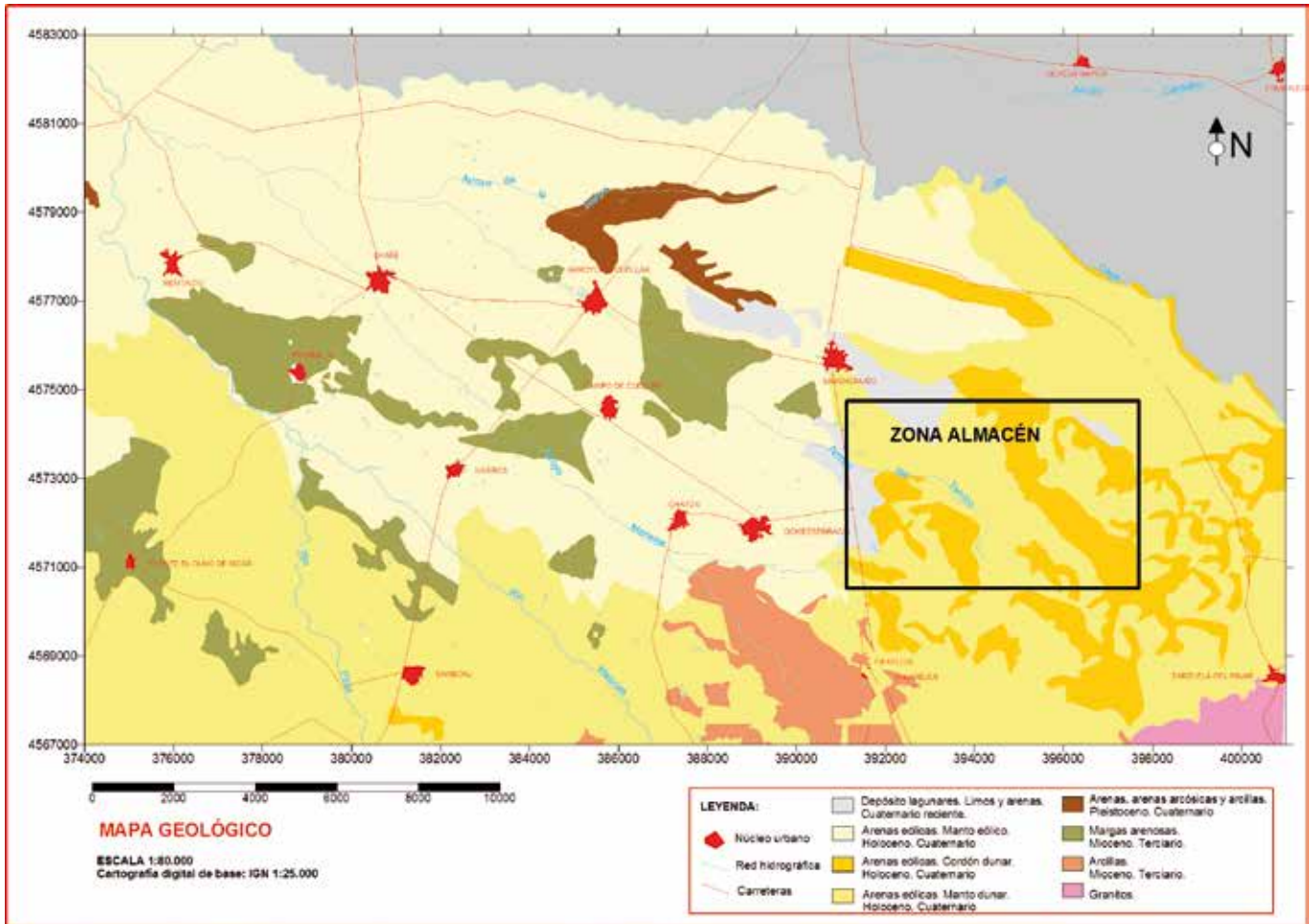


Figura 2. Mapa geológico en el entorno de la comarca de El Carracillo.
Figure 2. Geological map of the El Carracillo region.



Fotografías 1, 2 y 3. Azud de derivación del río Cega, tubería de distribución y punto de suelta.
Photographs 1, 2 and 3. The Cega River dam, distribution pipe and output point.



Fotografías 4 y 5. Canal y balsa de infiltración.
Photographs 4 and 5. Channel and infiltration pond.

En esta segunda fase (Fase II), se preparó la superficie de infiltración en el sector occidental del acuífero cuaternario mediante el acondicionamiento de los cauces y arroyos existentes y de la recuperación de los parcialmente desaparecidos (fotos 4, 5 y 6) cuya traza discurre a través de los términos municipales de Gomezserracín, Chatún, Campo de Cuéllar, Narros de Cuéllar y Fresneda de Cuéllar.

Puesta en marcha la recarga artificial a partir del año 2006, tras la finalización de la Fase II, y tal como indicaban los estudios hidrogeológicos, el sector occidental del acuífero no tiene la suficiente capacidad para almacenar agua que cubra toda la demanda de ésta en la región y todavía quedan sin abastecer en esta fecha los municipios ubicados en la zona norte de la comarca (Sanchoño, Arroyo de Cuéllar, Chañe, Remondo y Fresneda de Cuéllar). Donde se ubican estos municipios, no existe un acuífero superficial bien desarrollado (figura 3) donde pueda practicarse este tipo de recarga artificial. Las captaciones de agua subterránea que abastecen a las explotaciones agrícolas de esta parte de la comarca son sondeos profundos de más de 200 metros de profundidad que captan de los materiales terciarios.

Ante esta problemática, aún sin resolver, la Comunidad de Regantes de El Carracillo solicitó al Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medioambiente, nuevas actuaciones para extraer/almacenar agua en el sector oriental (zona almacén) y conducirla de forma presurizada a las áreas que no admiten recarga (zona de riego en figura 1).

Objetivo

El objetivo fundamental de este trabajo es la investigación de detalle del sector oriental (zona denominada "almacén") que ha servido de base para la redacción del "*Proyecto de Infiltración y Regulación para la Gestión Hidráulica del Acuífero de los Arenales en la Zona Oriental de la Comarca de El Carracillo (Segovia)*"; Fase III.

Los trabajos de investigación y caracterización desarrollados hasta el año 2001 (*Galán et al, 2001*), permitieron conocer con el suficiente detalle el comportamiento hidrogeológico de la comarca para poder zonificar la misma de acuerdo con sus posibilidades de uso.



Fotografía 6. Trazado en planta de la red principal de arroyos para la recarga del sector occidental del acuífero de los Arenales en la comarca de El Carracillo.
Photograph 6 Layout of the main recharging streams in the western sector of the Arenales aquifer in the region of El Carracillo.

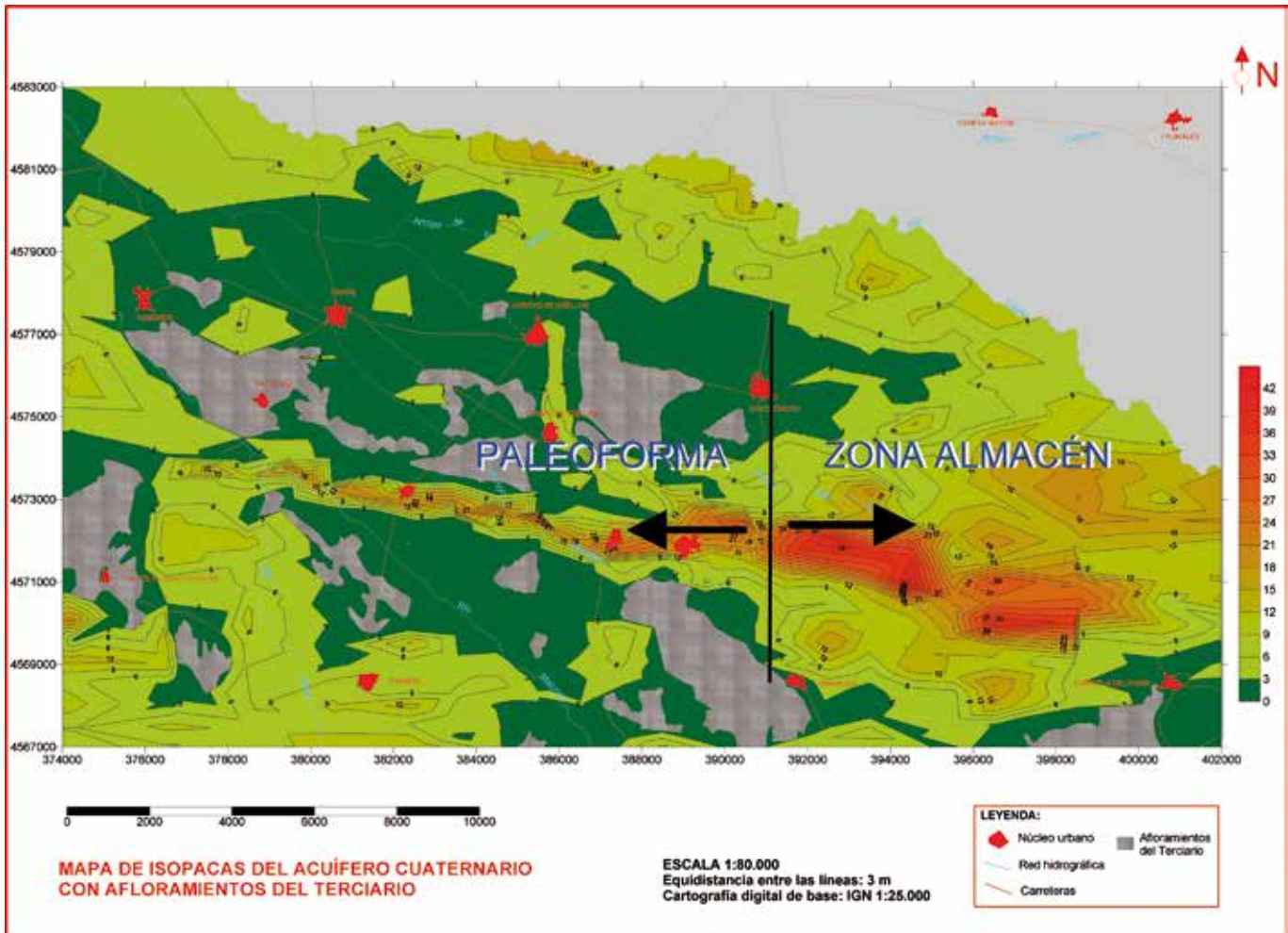


Figura 3. Mapa de isopacas del acuífero cuaternario con afloramientos del terciario.
Figure 3. Isopach map of the quaternary aquifer with tertiary outcrops.

En ellos se mostraba que en el sector oriental existía una estructura geológica cuya morfología y características internas permitían plantear su utilización como zona de explotación y almacenamiento de agua.

El lugar de almacenamiento está formado por un antiguo valle terciario relleno de arenas de edad cuaternaria. Este valle se encuentra de forma permanente saturado de agua, con el nivel freático a escasos metros de la superficie. Además la zona está a una cota topográfica más elevada que el sector regable de la comarca, posee agua de mejor calidad que la utilizada para riego o para consumo y, además, presenta un elevado valor medioambiental por sus característicos pinares.

No obstante, el uso de esta estructura geológica como embalse para realizar una adecuada gestión hidráulica necesitaba de un proyecto específico que estuviese basado en datos más detallados. Las inves-

tigaciones realizadas posteriormente y expuestas en el presente trabajo han tratado de dar respuesta a las incógnitas y problemas planteados ante la posible utilización del acuífero cuaternario de El Carracillo en la zona denominada "almacén" como sistema de regulación hidráulico y han sido la base para la elaboración del proyecto de obra.

Trabajos realizados y resultados obtenidos

a) Campañas de perforación de sondeos con obtención de testigo continuo

Se disponía como punto de partida de una primera aproximación de la geometría de la zona almacén (figura 3) tras las campañas de prospección geofísica y la ejecución de 8 sondeos de testigo continuo realizados

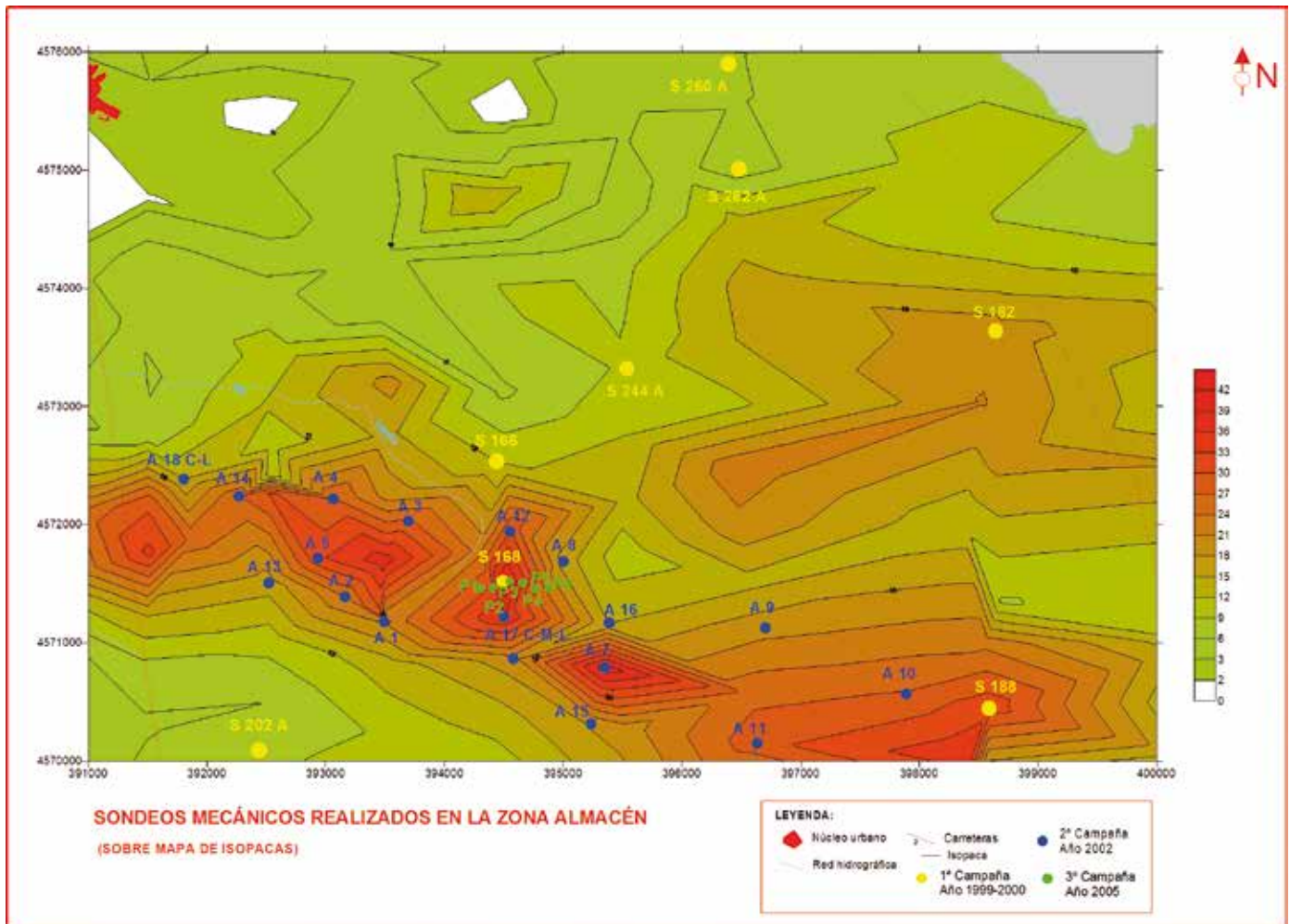


Figura 4. Sondeos de testigo continuo realizado en las diferentes campañas e isopacas resultantes.
Figure 4. Continuous sampling boreholes drilled during several campaigns and the resulting isopach.

durante los estudios orientados a las Fases I y II (presentados en el 2001). Con ello, se planificó una segunda campaña de perforación de sondeos cuyo objetivo era conocer la geometría de la zona almacén con mucho mayor detalle.

El número de sondeos perforados fue de 21 sobre 18 emplazamientos distintos, en dos de ellos se perforó a diferente profundidad. Estos sondeos se nombraron como sondeos "A".

El método de perforación empleado fue el de rotación con obtención de testigo continuo. El diámetro de perforación fue de 110 mm y se entubaron con tubería de PVC de 75 mm. En la mayoría de los casos, los sondeos se construyeron totalmente penetrativos en las arenas cuaternarias, hasta alcanzar el techo de los materiales terciarios que constituyen la base del acuífero.

En el año 2005, se realizó una tercera campaña de perforación como obras de apoyo al ensayo de

extracción conjunta realizado ese mismo año y que se explicará posteriormente. Los sondeos de esta campaña se denominaron sondeos "P".

En la figura 4 se muestran las diferentes campañas de sondeos ejecutados y las isopacas resultantes del acuífero cuaternario.

b) Perforación de sondeos de extracción y ensayos de bombeo individuales

Aparte de la realización de los sondeos con recuperación de testigo continuo, también se perforaron sondeos de extracción al igual que sucedió anteriormente a 2001, cuando el estudio hidrogeológico estaba enfocado a la comarca en general. El objetivo principal de los mismos fue la realización de ensayos de bombeo de cuya interpretación se obtuvieron los parámetros

hidráulicos del entorno de las captaciones y las posibilidades de explotación de las mismas (tabla 1).

Así, durante 2003, se realizaron un total de 6 sondeos (denominados como "SH") que se ubicaron en una de las zonas de mayor espesor de arenas siguiendo una misma alineación perpendicular a las líneas de flujo y con una distancia de separación entre ellos considerablemente menor que los ejecutados en anteriores campañas. Además, se construyeron totalmente penetrativos en el acuífero cuaternario (figura 5).

Los sondeos fueron realizados por el método de percusión y se entubaron en su totalidad, con filtro tipo puentecillo de acero al carbono y galvanizado de 200 mm de diámetro y 8 mm de espesor. Se construyó, además, un filtro de grava de 150 mm de espesor con grava silíceica clasificada de 2 mm.

Los ensayos de bombeo de cada uno de los sondeos se realizaron a lo largo del verano del año 2004. En cada uno de ellos, se realizó un ensayo de tipo escalonado a caudal variable y, posteriormente, un ensayo a caudal constante. El ensayo a caudal variable consistió en 5 escalones de 5, 10, 15, 20 y 25 l/s sin recuperación intermedia con una duración total, según cada ensayo, de entre 4 y 7 horas y media y una recuperación de 1-2 horas al finalizar la prueba. Por el contrario, en el ensayo a caudal constante se bombearon 25 l/s durante 24 horas.

En uno de los sondeos, el SH-4, se realizó una prueba mixta consistente en los mismos cinco escalones que el resto de los sondeos pero prolongando el último escalón (25 l/s) se prolongó durante dos días.

En la tabla 1 se muestran de valores de permeabilidad y transmisividad obtenidos.

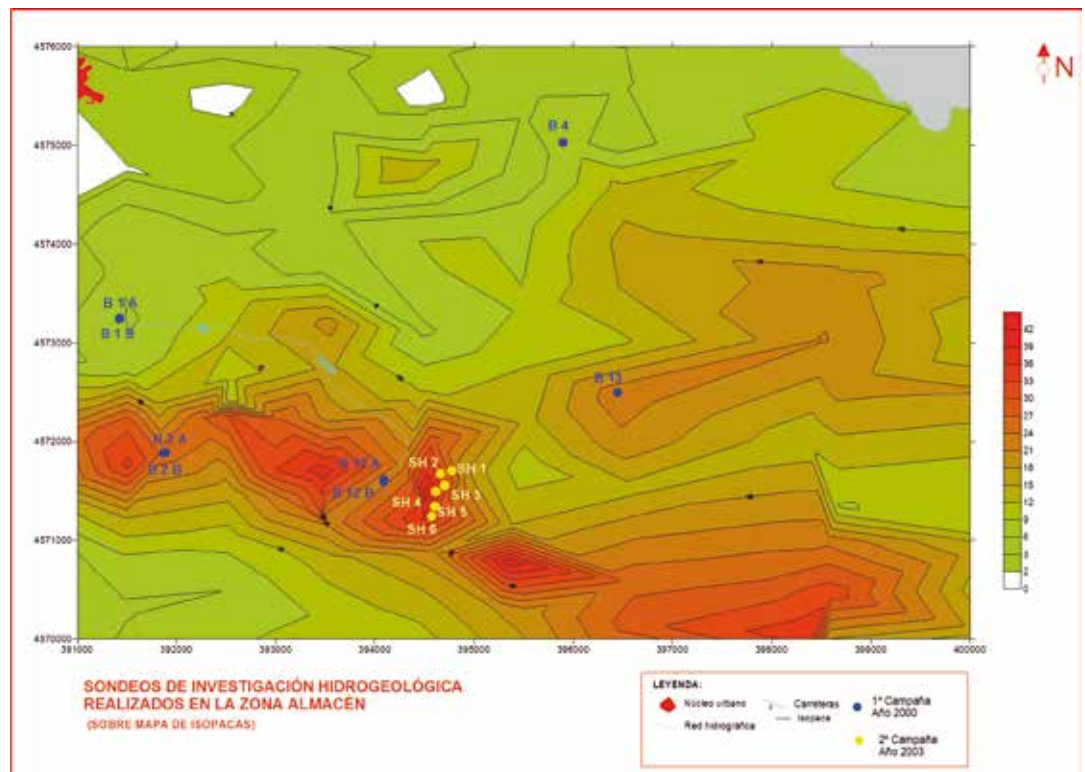
c) Ensayo de extracción conjunta

Un año después de la realización de los ensayos de bombeo individuales, aprovechando la época estival, y, por tanto, la eliminación de posibles recargas adicionales, se realizó un ensayo bombeando conjuntamente en 5 de los 6 sondeos hidrogeológicos, durante 16 días (del 30 de junio al 16 de julio de 2005).

Los caudales extraídos en cada sondeo comenzaron en 10 l/s para luego ir subiendo escalonadamente hasta los 25 l/s. Este caudal se mantuvo desde el día 6 de explotación (día 6 de julio) hasta el final de la prueba. Así, durante 10 días se estuvo explotando el acuífero a lo largo de una línea de sondeos perpendicular al flujo subterráneo de unos 500 m, con un caudal de 125 l/s. En total, al final de la prueba se había extraído un volumen de agua de 151407 m³.

Figura 5. Sondeos de extracción ejecutados en las diferentes campañas.

Figure 5. Hydrogeological investigation boreholes drilled during several campaigns.



Valores de K en m/día			
Método	Jacob	Recq cte.	Media
SH1	61.62	53.20	57.410
SH2	44.90	44.20	44.550
SH3	57.90	53.10	55.500
SH4	78.10**	71.70*	74.900
SH5	65.05	56.20	60.625
SH6	89.90	90.17	90.035

* Dato obtenido del ensayo a Q escalonado.
 ** Cooper-Jacob steptest.

Valores de T en m ² /día			
Método	Jacob	RECQ cte.	Media
SH1	1.540.55	1.330.11	1.435.330
SH2	1.347.88	1.327.29	1.337.585
SH3	1.853.22	1.700.36	1.776.790
SH4	2.501.27	2.293.92	2.397.595
SH5	2.147.58	1.852.70	2.000.140
SH6	2.698.15	2.705.31	2.701.730

* Dato obtenido del ensayo a Q escalonado.
 ** Cooper-Jacob steptest.

Tabla 1. Parámetros hidrogeológicos obtenidos en los ensayos de bombeo de los sondeos SH.

Table 1. Hydraulic parameters obtained from the borehole pumping tests.

Con la caracterización del cono de bombeo generado en el ensayo se pretendía comprobar la viabilidad técnica de una explotación de estas características y cuantificar las reservas de agua en la denominada "zona almacén".

En la figura 6 se muestra las variaciones de la superficie piezométrica tras los 16 días de explotación.

Simulando esta acción y sus resultados en el modelo matemático elaborado para el acuífero, éste se calibró con un valor de porosidad eficaz del 20% y una permeabilidad de 44 m/d.

d) Seguimiento de la evolución piezométrica durante seis años hidrológicos

Aunque estos trabajos no tenían como objetivo principal la zona almacén (se realizaron a nivel de toda la comarca), se han medido durante un total de cinco años los niveles en todos los sondeos construidos también en esta zona, constatando su funcionamiento en régimen natural y el efecto que produjo una prueba piloto de recarga artificial que se hizo en la zona durante el año 2003. A modo de ejemplo en la figura 7 se muestran los resultados obtenidos en el sondeo hidrogeológico B-12B.

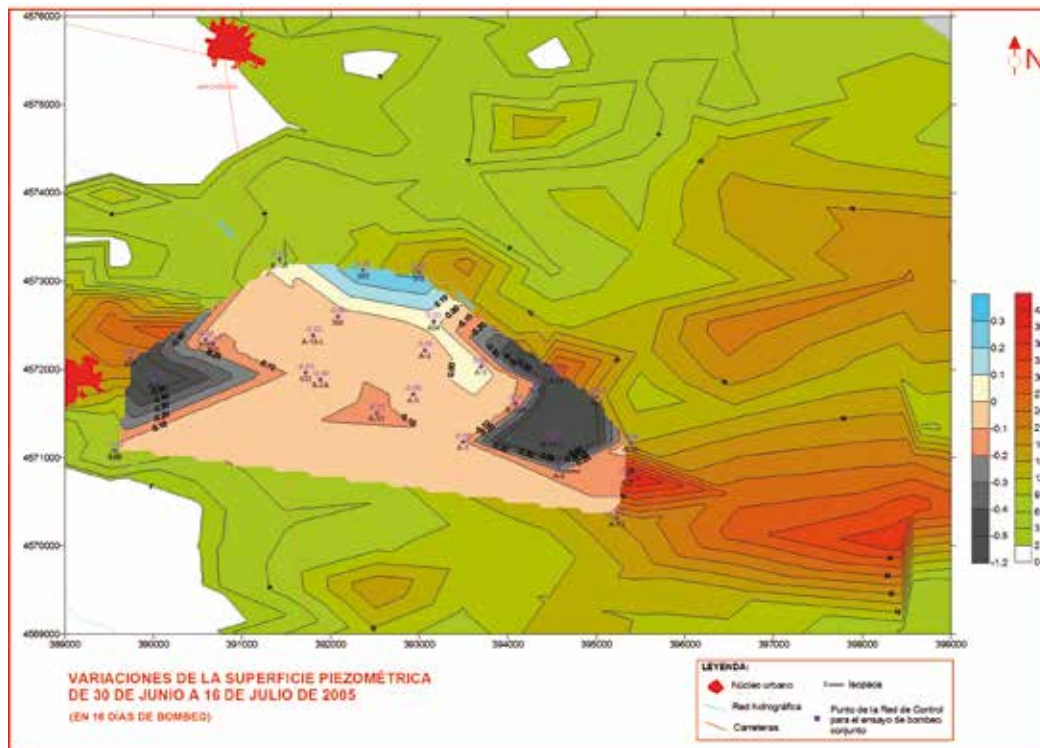


Figura 6. Variaciones en la superficie piezométrica tras los 16 días de explotación.

Figure 6. Variations in the piezometric surface after 16 days extraction.

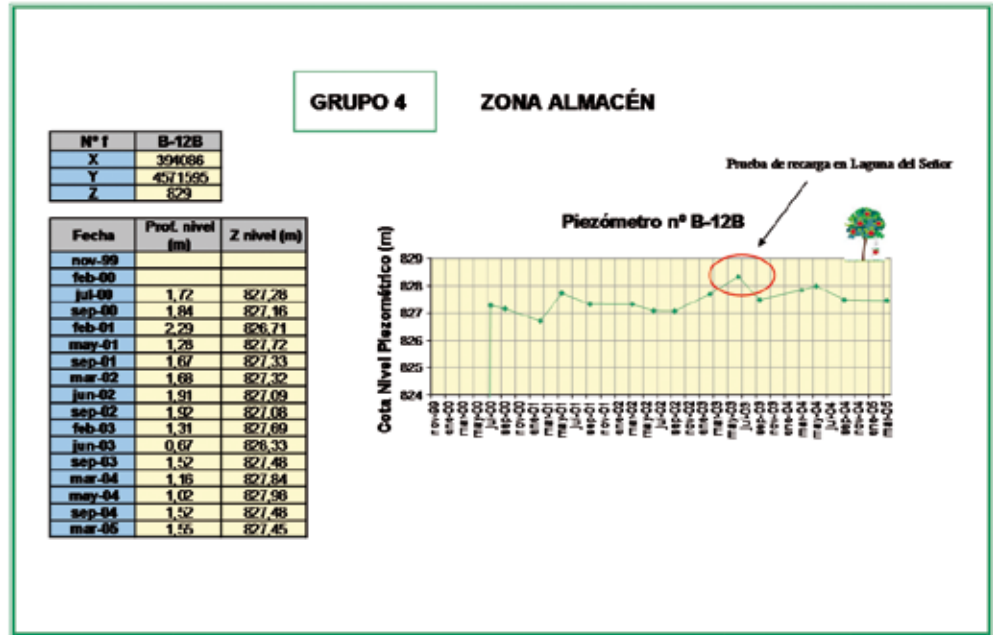


Figura 7. Evolución del nivel piezométrico en el sondeo hidrogeológico B-12B.

Figure 7. Evolution of the groundwater level in the B-12B hydrogeological borehole.

e) Estimación de la tasa de infiltración vertical de las arenas cuaternarias a partir del ensayo de infiltración a caudal constante

El ensayo de infiltración se realizó durante la campaña de ensayos de bombeo del año 2004. Consistió en la derivación, mediante una tubería metálica, del agua extraída de uno de los sondeos de bombeo, concretamente el SH-3, a una zona deprimida cercana

(pero lo suficientemente alejada del bombeo para no interferir en los resultados), donde se midió el tiempo que tardaba el agua en infiltrarse. Una vez alcanzada una superficie de encharcamiento constante capaz de filtrar un caudal de 25 l/s, se realizó un levantamiento topográfico de detalle de la laguna generada. Teniendo en cuenta que la superficie de encharcamiento fue de 467.5 m² y el caudal aportado e infiltrado 25 l/s, se obtuvo una tasa de infiltración vertical del terreno

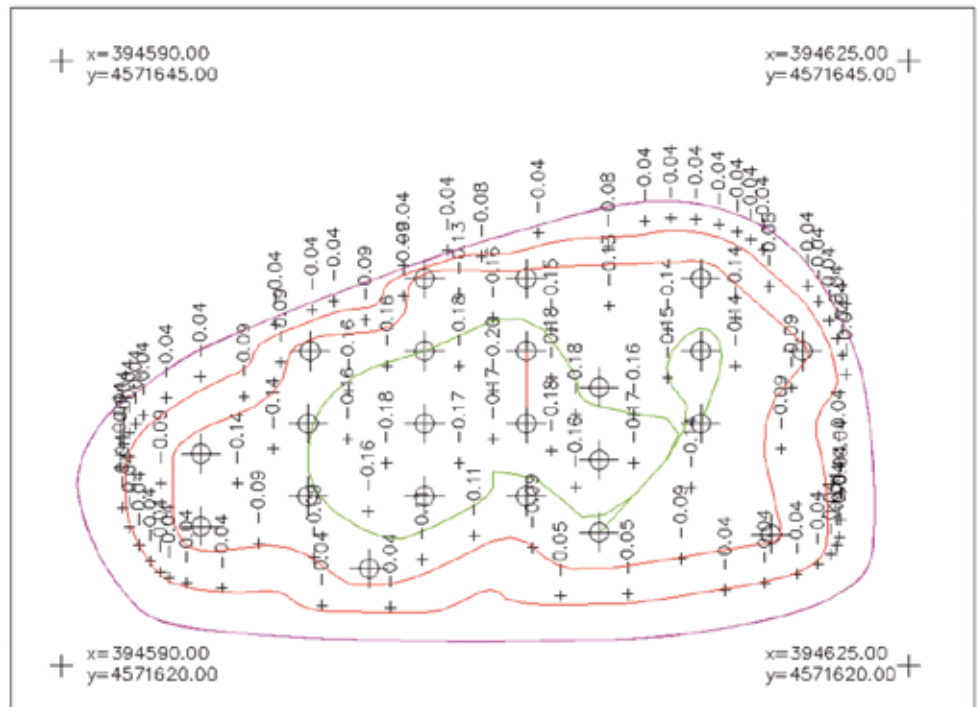


Figura 8. Batimetrías de la laguna de encharcamiento una vez alcanzado el régimen permanente.

Figure 8. Bathymetry of the flooded pool after reaching a stable state.

arenoso en la denominada "zona almacén" de 4.62 m/día.

En la figura 8 se muestra el mapa de batimetrías de la laguna de encharcamiento.

f) Ensayo de recarga en cauce natural (arroyo Ternillo) durante el ensayo de explotación conjunta

La metodología empleada consistió en la derivación del agua extraída del acuífero, durante el ensayo de extracción conjunta, al arroyo Ternillo a lo largo del cual se realizaron aforos diferenciales. El tramo del cauce seco más cercano a los sondeos fue impermeabilizado unos 500 metros para evitar interferir en los resultados del ensayo de bombeo y a partir de esta distancia, cuando el agua circulaba de forma libre, se dispusieron cuatro estaciones de aforo. En total se realizaron dos campañas de aforo en el arroyo. Teniendo en cuenta la superficie de recarga de cada tramo entre estaciones y la diferencia de caudal aforado entre una y otra, se obtuvo la tasa de infiltración en cada uno de los tramos aforados.

Las siguientes tablas muestran las coordenadas de cada estación, el caudal aforado, la superficie de infiltración de cada tramo y la tasa de infiltración calculada para cada uno de ellos.

El tramo 1-2 presentó una capacidad de infiltración bastante más elevada respecto al resto de los tramos, ya que se trataba de un tramo limpiado y acondicionado para derivar las aguas del ensayo de extracción conjunta, además de atravesar un tramo de acuífero con espesores mayores a 15 m. Por el contrario, el tramo 3-4 era un cauce natural con presencia de vegetación, costras y finos en el lecho.

g) Determinación de la superficie susceptible de recarga

Se realizó un cálculo de las superficies susceptibles de recarga considerando como tales a las depresiones relativas del terreno (zonas llanas o ligeramente deprimidas ubicadas entre las dunas), que se encontraran sobre espesores del acuífero superiores a 15 m. Teniendo en cuenta estos factores, la superficie cuantificada fue de 15.74 km². En la figura 9 se muestra la distribución sobre el mapa de las superficies de recarga.

h) Estudio de viabilidad de la recarga artificial de la zona almacén desde el punto de vista hidroquímico

Este estudio se realiza con objeto de prever cuáles pueden ser los cambios composicionales en el agua del acuífero, analizando las posibles repercusiones de la mezcla de ambas aguas en la calidad química y si resulta necesario plantearse algún tipo de pretratamiento más allá de los físicos.

Se analizaron tanto el agua de recarga procedente del río Cega como el agua del acuífero (tabla 3).

A la vista de la composición del agua de recarga, no es previsible una afección significativa al agua subterránea que induzca problemas durante la operación de recarga.

El contenido en sólidos en suspensión, está dentro de los valores máximos admisibles que se indican en el RD 1620/2007 (de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas) para el uso ambiental de recarga de acuíferos por inyección directa (10 mg/l).

Estación	X	Y	Q (l/s)	
			13 julio 2005	16 julio 2005
1	394.049	4.572.235	107.8	114.07
2	393.509	4.572.659	68.9	78.39
3	393.343	4.572.962	74	86.13
4	397.822	4.573.194	60.8	76.22
4	397.822	4.573.194	60.8	76.22

Tramo estaciones	S (m ²)	Tasa de Infiltración (m/d)	
		Tasa de Infiltración	
		13 Julio 2005	16 Julio 2005
1-2	562	5.98	5.48
3-4	1.275	0.89	0.67
1-4	2.100	1.93	1.55
1-4	2.100	1.93	1.55

Tabla 2. Caudales aforados en el arroyo Ternillo y tasas de infiltración obtenidas durante el ensayo de extracción conjunta.

Table 2. Volumetric flow rates in the Ternillo stream and infiltration rates obtained during the joint extraction test.

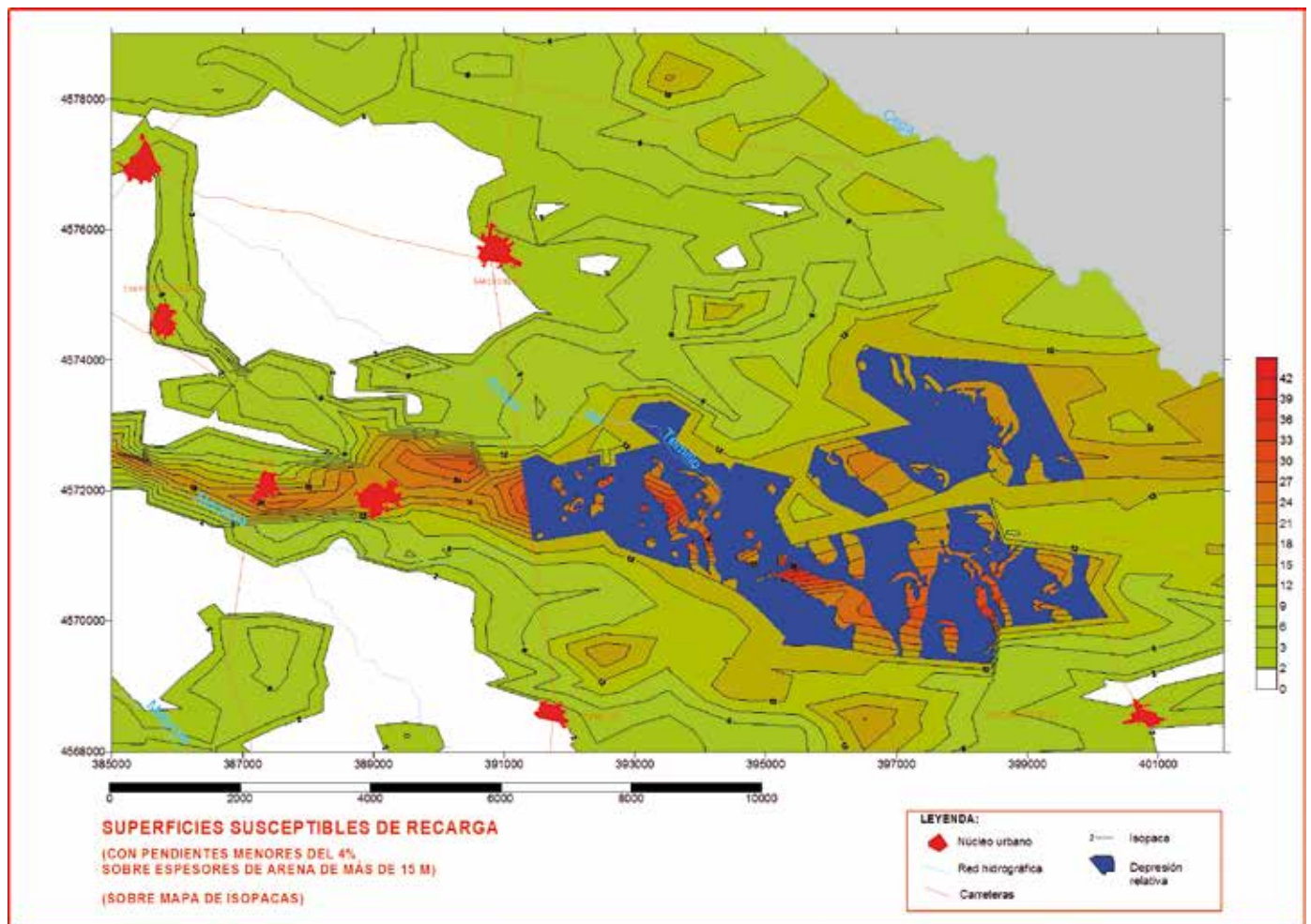


Figura 9. Ubicación de las superficies susceptibles de recarga en la denominada “zona almacén” del acuífero cuaternario de El Carracillo sobre el mapa de espesores del acuífero.

Figure 9. Location of areas subject to recharge of the quaternary aquifer storage area on the aquifer thickness map.

ID	Agua de recarga (Río Cega)		Aguas de recarga (Tub. Deriv.)	Acuífero Terciario	Acuífero Cuaternario			
	Cega-1	Cega-2	1a	417	284	329	347	420
Ca (mg/l)	15	15	19.47	17	9.1	40	22	46
Mg (mg/l)	6	5	6.51	4.3	2.4	5.4	3.2	6.1
Na (mg/l)	5	6	5.88	26	6.1	17	7.4	7.6
K (mg/l)	1	1	0.98	1.8	1.6	2.2	1.4	3.6
HCO ₃ (mg/l)	77	75	89.94	119	36	95	75	103
SO ₄ (mg/l)	5	5	2.48	13	17	41	21	82
Cl (mg/l)	<3	<3	8.72	6.4	5	21	10	9
cond (µS/cm)	139	134	166	216	89	294	178	332
pH	8.1	7.9	8.43	8.1	6.5	6.5	6.7	7.5
SS	n.d.	n.d.	7.6	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
NO ₃ (mg/l)	<1	<1	2.75	2.3	<1	17	1.2	2.5
NO ₂ (mg/l)	n.d.	n.d.	0.01	n.d.	0	0	0	0
CO ₃ (mg/l)	n.d.	n.d.	2.39	0	84	226	164	236

Tabla 3. Análisis químicos de las muestras de agua del acuífero de “El Carracillo” en la zona almacén.

Table 3. Chemical analyses of the water samples taken from the El Carracillo aquifer.



Figura 10. Salida gráfica de *Visual MODFLOW* en la que se muestra la planta de la denominada “zona almacén” del acuífero sobre el mapa de isopacas. La fila 26 está marcada en rojo. Las celdas de color rojo dentro del círculo indican la ubicación de los dispositivos de recarga y la batería de pozos de extracción.

Figure 10. *Visual MODFLOW* graphical output showing the aquifer storage area on the isopach map. Row 26 is highlighted in red. Red cells within the circle indicate the location of recharge devices and extraction wells.

i) Simulación de diferentes escenarios en el modelo matemático

Dado la importancia y magnitud de las actuaciones de recarga artificial planteadas en el acuífero cuaternario de “El Carracillo”, se elaboró un modelo matemático de simulación del flujo subterráneo con el objetivo de predecir y evaluar la respuesta del acuífero a los procesos de recarga artificial (Galán et al, 2001).

Han sido muchas las hipótesis que se han simulado con el modelo en la zona almacén con el objetivo de concretar cuál es el mejor escenario de extracción/recarga de forma que se pueda dar respuesta a la demanda existente de una forma sostenible, garantizando que los volúmenes derivados del río Cega rellenen el vaciado que se pueda provocar en el acuífero durante los meses de extracción. También se han tenido en cuenta posibles escenarios de sequía, cuando la recarga no pueda producirse porque no circulen los caudales mínimos en el río Cega que se exigen para su derivación (1.960 l/s).

A modo de ejemplo se expone en este artículo una de las simulaciones realizadas con Visual Modflow para uno de los escenarios, dispositivos y sondeos de extracción planteados durante la elaboración del proyecto de la fase III.

Las actuaciones de este escenario consisten en la extracción de 5.91 hm³/año de los recursos subterráneos del acuífero desde los meses de marzo a septiembre y una posterior recarga del mismo, con 6.32 hm³ procedentes del río Cega, repartidos entre los meses de enero

a abril. La simulación refleja tres ciclos de extracción y dos de recarga según el siguiente esquema: extracción-recarga-extracción-recarga-extracción.

La recarga se realizaría a través de una red de dispositivos de recarga en superficie compuesta por 18 caces (cuaces naturales de pequeña entidad por donde circula agua en episodios de precipitaciones elevadas que van a ser retroexcavados) y 3 balsas de infiltración y la extracción con 82 sondeos de pequeño caudal (figura 10).

Los datos más significativos que pueden deducirse de esta simulación son dos. El primero es que el promedio de los descensos registrados al final del primer ciclo son de 4.9 m y se reparten de una forma homogénea. El segundo es que en el ciclo de recarga el acuífero no es capaz de asumir la infiltración de 6.32 hm³ durante un periodo de cuatro meses, produciéndose un desbordamiento en dos de las balsas y en doce caces. Las inundaciones son continuas desde mediados de los ciclos de recarga hasta un mes después de concluir éstos. Además, se comprueba que año tras año después de los ciclos de recarga, se produce una recuperación del orden de un metro de los niveles del acuífero. Por este efecto acumulativo, la capacidad de almacenamiento del acuífero será cada vez menor y las inundaciones debidas al desbordamiento de los caces y lagunas serán más importantes.

En esta fase es en la que se está trabajando actualmente y su importancia es muy alta ya que en función de sus resultados será llevado a cabo el dimensionamiento definitivo de la instalación de recarga artificial.

Conclusiones

Los trabajos expuestos en este artículo han servido para planificar la fase III del proyecto que tiene por objeto la definición de las obras y elementos necesarios referentes al Real Decreto-ley 9/1998 en su artículo 2 "Recarga del acuífero del Carracillo. Obras de toma, conducción principal, infiltración y adecuación de las zonas regables (Segovia)", para la creación de la infraestructura hidráulica necesaria para llevar a cabo la gestión hídrica de la parte oriental del acuífero cuaternario de "El Carracillo". Con ello será posible abastecer de agua subterránea a una zona regable del norte de la comarca de 1.450 ha de superficie.

Las conclusiones obtenidas son las siguientes:

1. Los sondeos de testigo continuo han permitido conocer la geometría de la zona oriental del acuífero de "El Carracillo", zona denominada "almacén", con gran exactitud, pudiéndose delimitar zonas aptas para la recarga artificial.
2. Los valores de permeabilidad y transmisividad obtenidos en los ensayos de bombeo son aptos para llevar a cabo las operaciones de recarga.
3. Con el ensayo de extracción conjunta se confirma que la explotación que se está planteando es viable.
4. El seguimiento de la evolución piezométrica constante el funcionamiento en régimen natural de la parte oriental del acuífero.
5. La tasa de infiltración vertical del terreno arenoso es de 4.62 m/día.
6. La tasa de infiltración en los cauces naturales con presencia de vegetación está en torno a 0.89-0.67 m/día
7. La superficie susceptible de recibir los caudales derivados del río Cega (depresiones relativas del terreno con espesor de acuífero superior a los 15 m) es de 15.74 km².
8. A la vista de la composición del agua de recarga, no es previsible una afección significativa al agua subterránea que induzca problemas durante la operación de recarga.

9. Los resultados de las sucesivas simulaciones en el modelo matemático condicionarán el dimensionamiento definitivo de la instalación de recarga artificial.

Referencias

- Galán López, R., López Mendieta, F., Martínez Rubio, J., Macías Antequera, C., Galán Martínez, G. 2001. Recarga artificial del acuífero de Los Arenales en la comarca de "El Carracillo" (Segovia). 1ª y 2ª Parte. VII Simposio de Hidrogeología, Murcia. Tomo XXIV.
- Galán López, R., López Mendieta, F., Martínez Rubio, J., Macías Antequera, C. 2010. Los regadíos y la gestión integral de los recursos hídricos en el acuífero de Los Arenales, comarca de El Carracillo (Segovia). Jornadas técnicas de Aprovechamiento de Aguas Subterráneas para Riego.
- Grupo Tragsa 2012. Borrador del Proyecto de Infiltración y Regulación para la Gestión Hidráulica del Acuífero de los Arenales en la Zona Oriental de la Comarca de El Carracillo (Segovia). Fase III.
- Junta de Castilla y León - EPTISA 1993. Estudio de Viabilidad Técnica, Económica y Social de la Zona Regable de la Comarca de "El Carracillo".
- Junta de Castilla y León - INCISA 1994. Proyecto de Trasvase del Río Cega a la Comarca del Carracillo (Segovia).
- Junta de Castilla y León - Grupo TRAGSA 1998. Geometría del acuífero comarca El Carracillo en Sanchonuño y Gomezserracín (Segovia).
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación - Grupo TRAGSA 1998. Proyecto de Trasvase del Río Cega a la comarca del Carracillo (Segovia).
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación - Grupo TRAGSA 2000. Proyecto Modificado de Trasvase del río Cega a la comarca del Carracillo (Segovia).
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación - Grupo TRAGSA 2001. Proyecto de investigación hidrogeológica y obras de apoyo para la definición del acuífero de los arenales en la comarca de "El Carracillo" (Segovia).
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación - Grupo TRAGSA 2002. Proyecto de Recarga del Sector Occidental del Acuífero de Los Arenales en la Comarca del Carracillo (Segovia).
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación - Grupo TRAGSA 2005. Asistencia Técnica para la gestión de los recursos hídricos en el acuífero de El Carracillo (Segovia).
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación - Grupo TRAGSA 2006. Actualización del modelo matemático de flujo subterráneo hasta octubre de 2005 (periodo de simulación de octubre de 2000 a octubre de 2005).

Recibido: mayo 2013

Revisado: julio 2013

Aceptado: septiembre 2013

Publicado: junio 2014