



GOBIERNO
DE ESPAÑA

VICEPRESIDENCIA
TERCERA DEL GOBIERNO
MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

CONFEDERACIÓN
HIDROGRÁFICA
DEL DUERO, O.A.



CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA
DEL DUERO

PROYECTO NAIAD:

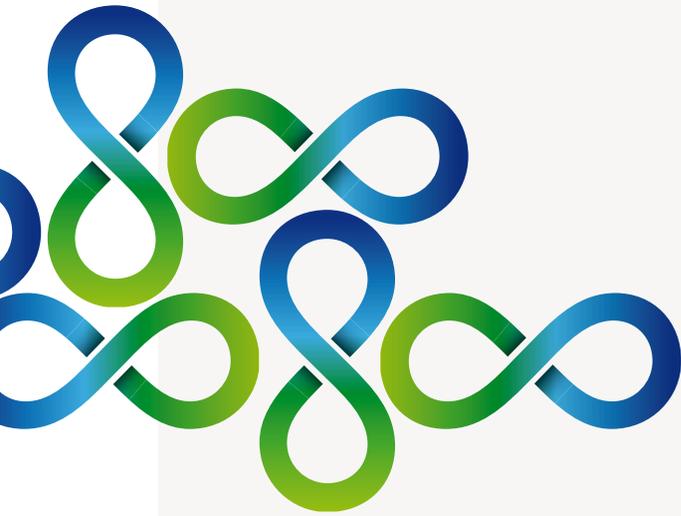
Evaluación del estado
y simulación hidrogeológica
del comportamiento
del acuífero de
Medina del Campo



 NAIAD

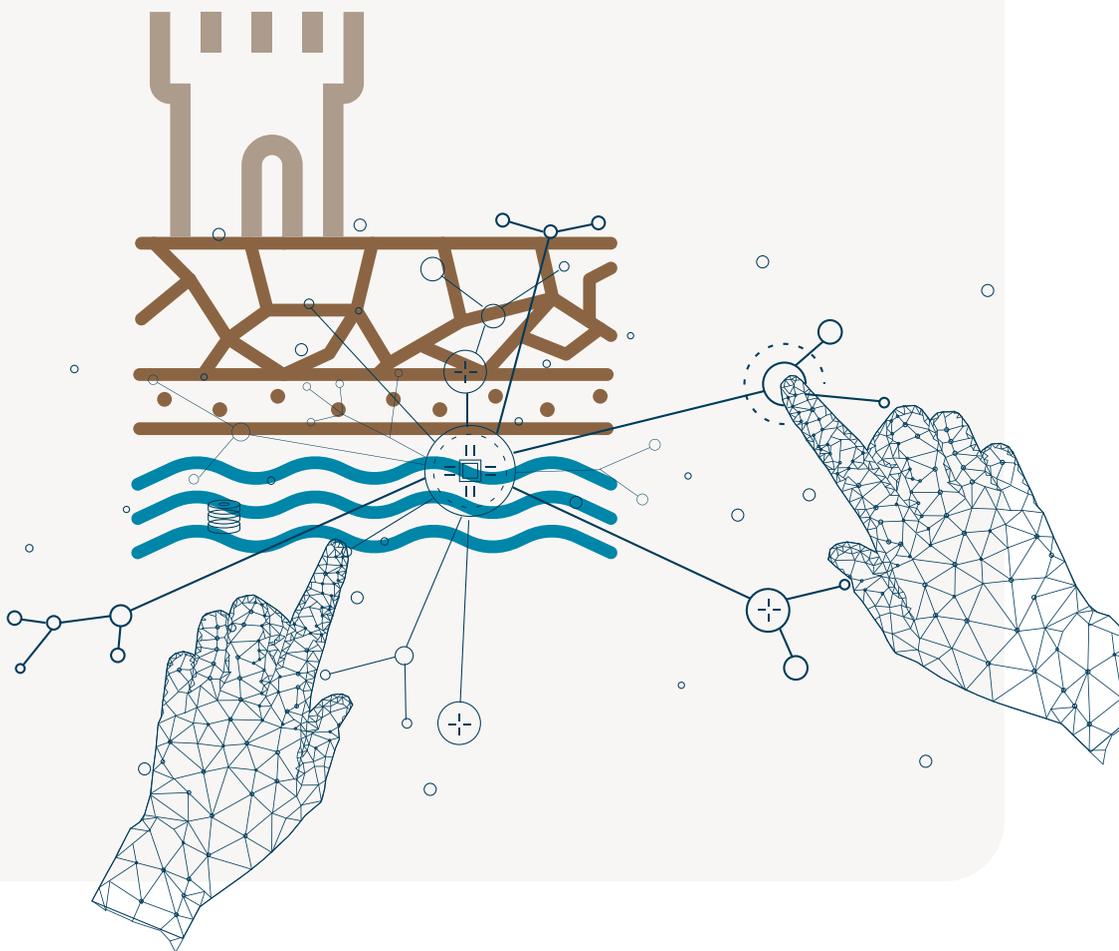


Este proyecto ha recibido financiación del programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea en virtud del acuerdo de subvención nº 214697



PROYECTO NAIAD:

Evaluación del estado
y simulación hidrogeológica
del comportamiento
del acuífero de
Medina del Campo





**PROYECTO NAIAD:
EVALUACIÓN DEL ESTADO
Y SIMULACIÓN HIDROGEOLÓGICA
DEL COMPORTAMIENTO DEL ACUÍFERO
DE MEDINA DEL CAMPO**

Lengua/s: Español

Catálogo de publicaciones oficiales: <http://www.ojo.es>

NIPO: 668-21-015-6

ISBN: 978-84-18508-47-9

DEPÓSITO LEGAL: DL VA 557-2021

EDITA: © MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO
CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL DUERO - 2021
www.chduero.es
1ª EDICIÓN, AGOSTO 2021

DIRECCIÓN Y COORDINACIÓN: Carlos Marcos Primo, CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL DUERO.
EDITORES: Beatriz Mayor, Elena López Gunn, Carlos Marcos, Laura Vay

IMÁGENES: © PROYECTO NAIAD / PLAN C
DISEÑO Y MAQUETACIÓN: Carolina Gómez, www.estudioplanc.com



Este proyecto ha recibido financiación del programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea en virtud del acuerdo de subvención nº 730497

ÍNDICE



INTRODUCCIÓN

pag_ **7**

01/ AVANCES EN EL CONOCIMIENTO DE LA MASA SUBTERRÁNEA DE MEDINA DEL CAMPO



pag_ **9**

02/ MODELO GEOLÓGICO 3D



pag_ **15**

03/ MODELO NUMÉRICO REGIONAL DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA Y EVALUACIÓN DE ALGUNOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS RELEVANTES EN LA ZONA



pag_ **23**

04/ ESTUDIO DE LA RECARGA ARTIFICIAL DEL ACUÍFERO



pag_ **31**

05/ ESTUDIO DE LAS RELACIONES ENTRE LOS HUMEDALES SUPERFICIALES Y EL ACUÍFERO: LAS LAGUNAS REALES



pag_ **37**

06/ EVALUACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN EN MEDINA DEL CAMPO

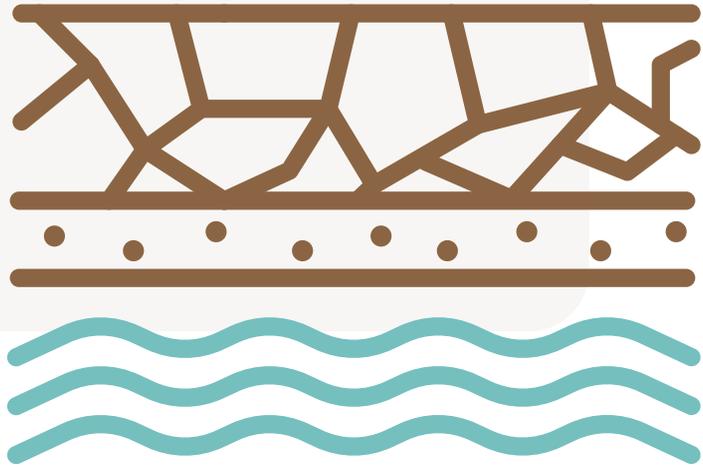


pag_ **45**

REFERENCIAS

pag_ **51**





INTRODUCCIÓN



Este documento recoge **LOS PRINCIPALES RESULTADOS RELATIVOS A LA GENERACIÓN DE CONOCIMIENTO SOBRE LA MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA DE MEDINA DEL CAMPO Y SUS CONEXIONES CON LOS ECOSISTEMAS ACUÁTICOS SUPERFICIALES.**

Estos resultados se han generado en el marco del proyecto *NAture Insurance value: Assessment and Demonstration (NAIAD)* financiado por el programa de Horizonte H2020 de la Comisión Europea y coordinado por la Confederación Hidrográfica del Duero. Se trata de un proyecto realizado entre diciembre de 2016 y agosto de 2020, que reunió a **23 organizaciones europeas** que investigan los servicios que proporcionan los ecosistemas y especialmente su papel en la reducción del riesgo de sequía o inundación a modo de "seguro natural". Para ello, se ha **combinado la ciencia, la práctica y el conocimiento** local en nueve casos demostrativos en ocho países europeos, siendo la Masa de Agua Subterránea de Medina del Campo el caso de estudio en España.



C I E N C I A
P R Á C T I C A
C O N O C I M I E N T O

NAIAD

La Masa de Agua Subterránea Medina del Campo ocupa una superficie de 3.700 km² y está limitada por el río Duero al norte, la Sierra de Gredos al sur y los ríos Adaja y Guareña o Mazores al este y oeste, respectivamente. Actualmente, la masa de agua está gravemente afectada en cuanto a la calidad y cantidad de la misma. **La mayor parte de la Masa de Agua Subterránea tiene concentraciones de nitrato superiores al valor máximo permitido por la legislación.** El descenso de los niveles piezométricos del acuífero ha aumentado los costes de abastecimiento y de extracción, ha inducido un deterioro de la calidad debido a la movilización del arsénico contenido en ciertas formaciones del acuífero y ha desecado humedales y ríos que dependían del agua subterránea. Al mismo tiempo, **la región está perdiendo población y encontrando problemas para mantener y generar nuevos puestos de trabajo.**

El caso demostrativo de la Masa de Agua Subterránea Medina del Campo es particularmente interesante, ya que es de los pocos casos estudiados en el **proyecto NAIAD** donde el riesgo de sequía está presente junto con, y a mayor nivel que, el de inundación. Además, al inicio del proyecto existía una gran incertidumbre en términos de disponibilidad de información confiable sobre las condiciones del sistema acuífero, su geometría y dinámica, así como respecto a sus relaciones con los ecosistemas acuáticos superficiales (ríos y humedales). **Este documento presenta los principales avances de conocimiento** realizados por el Instituto Geológico Minero de España y la Universidad Politécnica de Cartagena en modelización y estudio del sistema acuífero, y las principales conclusiones de los análisis realizados. Más detalles sobre los trabajos realizados y metodologías empleadas pueden encontrarse en *Mayor et al. (2021a)* y *Mayor et al. (2021b)*.



1

Avances en el conocimiento de la Masa Subterránea de Medina del Campo

AUTORES

África de la Hera, Julio López Gutiérrez, Eduardo Peña Corriá.

INSTITUCIÓN

Instituto Geológico y Minero de España (IGME)





La Masa de Agua Subterránea de Medina del Campo (MASMC) constituye un acuífero detrítico multicapa complejo, formado por una sucesión alternante de sedimentos terciarios-cuaternarios (Paleógeno-Mioceno-Cuaternario) detríticos gruesos (gravas y arenas) que se comportan como acuíferos, dentro de una matriz limo-arcillosa (que se comporta como acuitardo). Desde el punto de vista hidrodinámico, en conjunto se trata de un acuífero multicapa, aunque en los primeros 50 m se ha identificado un comportamiento predominante de acuífero libre (materiales cuaternarios y niveles superiores del Mioceno), posiblemente debido a las conexiones hidráulicas entre los distintos tramos más transmisivos y a la interconexión mediante sondeos. A partir de los 50 m se comporta, sin embargo, como un acuífero multicapa con tramos semiconfinados o confinados según las zonas, incluyendo al conjunto de materiales (Mioceno Superior, Mioceno Inferior y Paleógeno). Esto se ve reflejado en la evolución de los niveles piezométricos, que muestran un mayor rango de fluctuación cuanto mayor es su nivel de confinamiento.

La geometría del acuífero se caracteriza por presentar un basamento ígneo-metamórfico varisco, sobre el que se ha identificado un Cretácico superior detrítico-carbonatado (sondeo La Seca). Este zócalo se encuentra fracturado, como consecuencia de la orogenia Alpina, estructurándose en bloques con zonas de distinto espesor de relleno sedimentario terciario, como se detalla en el capítulo 2. Se distinguen 3 sectores bien diferenciados en la MASMC (*Figura 1 a*): el sector Norte se caracteriza por ser la zona con menor relleno sedimentario y por la presencia de materiales cretácicos en la base de las formaciones acuíferas; el sector central, por ser el que presenta mayor espesor de relleno sedimentario; y el sector sur, por ser el más próximo a la zona de recarga, con el basamento más somero. Los datos litoestratigráficos, basados en la interpretación de más de 60 columnas litológicas de sondeos realizados dentro de los límites de la MASMC, ponen de manifiesto un acuñamiento hacia el oeste de la unidad conocida como Facies Cuesta del Mioceno Superior (constituida por margas, yesos, y eventualmente, hacia el suroeste por sedimentos detríticos) que actúa hidrogeológicamente como acuitardo. Esta unidad, que constituye el impermeable de base del acuífero cuaternario de Los Arenales, llega a desaparecer en la mitad occidental de la MASMC. La relevancia de este dato es importante: significa que en la MASMC no existen dos acuíferos superpuestos, como está definido en la MAS (masa de agua subterránea) colindante al Este de Los Arenales, sino que en esta MASMC todo el relleno terciario constituye un único acuífero, pero sin olvidar su carácter multicapa, que le confiere unas propiedades físicas y químicas propias a cada nivel acuífero específico en profundidad.

Al sur de Medina del Campo, existen indicios que señalan la presencia de una falla, no cartografiada hasta la fecha (*Figura 1b*). Esta falla constituye la discontinuidad estructural que genera la salida al exterior de un flujo salino profundo que viaja por el fondo del acuífero. Se trata de un flujo de aguas cloruradas sódicas con elevada conductividad eléctrica. La existencia en esa zona de aguas cloruradas sódicas nos llevó a identificar un antiguo punto de descarga del acuífero regional, localizado en el lugar conocido como Las Salinas, al sur de Medina del Campo (*Figura 1b*), actual emplazamiento del Balneario Palacio de Las Salinas. Desde el siglo XVII existe documentación que certifica la existencia de un manantial de aguas cloruradas sódicas en esa zona. Dicho manantial dio origen al Balneario de Las Salinas en el siglo XIX, que perdura hasta nuestros días. Sin embargo, dicho manantial ya no existe en la actualidad. La extracción intensiva de aguas subterráneas en este acuífero ha podido ser la causa de que dicho punto de descarga del acuífero perdiera potencial hidráulico para seguir manando y todo parece indicar que desapareció a finales de los años 90 (*De la Hera-Portillo et al., 2021*).



3) Se observa una recuperación de los niveles piezométricos a partir de 2010. Esto parece ser respuesta a la detención de los bombeos en la región de La Moraña, debido a un acuerdo con la Confederación Hidrográfica del Duero para sustituir el uso de las aguas subterráneas por aguas superficiales procedentes del Embalse de Las Cogotas. Aunque aún son datos muy preliminares, estos registros ponen de manifiesto la respuesta del sistema a la supresión de las extracciones. La recuperación es tenue pero progresiva. Estos hechos permiten dar un foco de luz a la recuperación del acuífero, ante la perspectiva de un escenario tendencial a reducir los bombeos que permita recuperar el buen estado de las aguas subterráneas. 4) La conductividad eléctrica aumenta con la profundidad (*Tabla 1*).

SONDEO	Form. geol. (1)	Prof. (m)	Ranuras (m)	Periodo	Prof. Media de los niveles (m)	CE (mS/cm)	CE media (mS/cm)
A-ALDEASECA	MI	534	sd	2003-2010	-78	0,70-0,90	0,80
B-ARÉVALO	Q+MS	200	67,50-163,50	2000-2010	-84	0,2-0,3	0,25
C-BARROMÁN	MI	200	Sd	1999-2010	-52	0,5-1,0	0,75
D-CASTELLANOS	MI	200	44,50-181	2003-2010	-45	0,85-1,10	0,95
E-LANGA	MS	194	51-192	2000-2010	-94	0,4-0,5	0,45
F-MADRIGAL	MI	192	31,50-94	2001-2010	-28	0,6-0,7	0,65
G-NAVA DE A.	Q+MS	203	47,50-107,50	2000-2010	-111	0,3-0,45	0,40
H-PALACIOS R.	Q+MS	200	Sd	2004-2010	-111	0,29-0,31	0,30

Tabla 1. Resumen de los datos de los 8 sondeos monitorizados. Sd= sin datos. A, C, D y F presentan menor profundidad en los niveles de aguas subterráneas y mayor conductividad eléctrica, que podría estar asociado a formaciones del Mioceno Inferior. B, G y H presentan mayor profundidad de los niveles de agua subterránea y valores más bajos de conductividad eléctrica, lo que podría estar asociado con formaciones del Mioceno Superior. (1) Q= Cuaternario; MI=Mioceno Inferior; MS= Mioceno Superior.





Conclusiones clave_

- En la MAS de Medina del Campo existe un **acuñamiento de las Facies Cuesta hacia el oeste**, que conforma que todo el relleno sedimentario terciario se comporte como un único acuífero multicapa.
- En la mitad oriental de la MASMC hay **presencia de una formación profunda del Cretácico** cuyo papel se desconoce en el funcionamiento hidrogeológico del sistema, que se deformó solidariamente con el basamento Varisco durante la orogénia Alpina.
- La existencia de una falla de zócalo alpina no cartografiada, al sur de Medina del Campo, está relacionada con la **existencia de un antiguo punto de descarga del acuífero regional hoy desaparecido** (en el lugar conocido con el topónimo Las Salinas).
- El sistema acuífero revela una significativa **sensibilidad a los bombeos**, ya que la sustitución del uso de aguas subterráneas por aguas superficiales para riego, afecta a los niveles de agua subterránea con una recuperación tenue y progresiva que puede suponer una recuperación significativa si se toman medidas para la gestión a mayor escala.



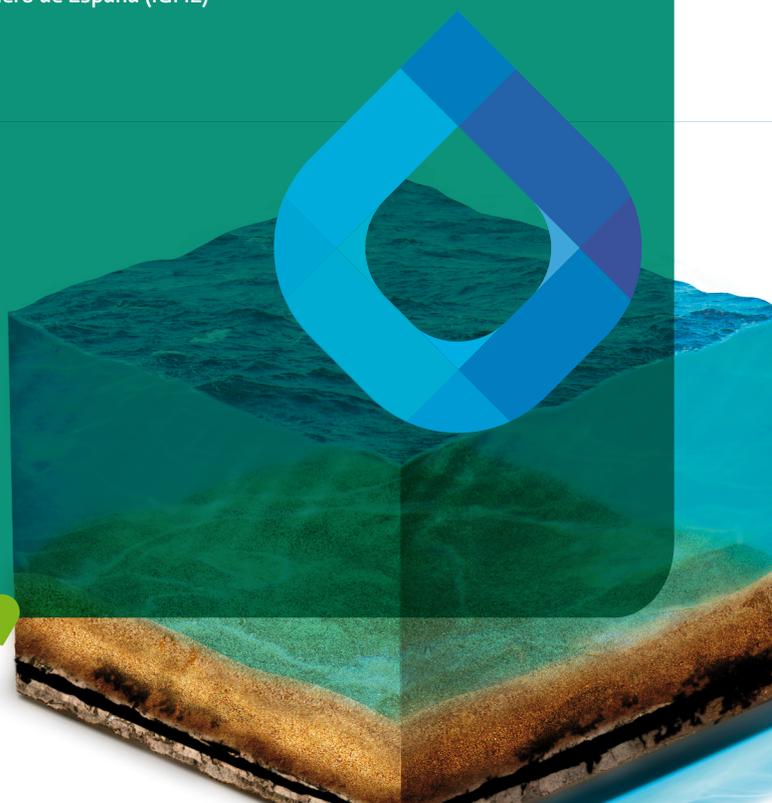
Modelo geológico 3D

AUTORES

Carlos Marín Lechado, Julio César López Gutiérrez, Ana Ruiz Constan, Félix Rubio Sánchez-Aguillilla, África de la Hera-Portillo

INSTITUCIÓN

Instituto Geológico y Minero de España (IGME)





MODELO 3D



Se ha realizado un **mapa de síntesis geológica con fines hidrogeológicos**, respetando las divisiones cronoestratigráficas de las grandes unidades, pero integrando las formaciones con comportamiento hidrogeológico similar. Este documento es la base sobre la que se ha elaborado un modelo geológico 3D.

Se ha construido un modelo geológico 3D que muestra los espesores y la distribución de los sedimentos y las rocas del Mioceno, Paleógeno y Cretácico en la masa de agua subterránea de Medina del Campo. El modelo 3D se construye a partir de la cartografía geológica de síntesis mencionada arriba, sondeos eléctricos verticales y datos gravimétricos junto con sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo adquiridos en el proyecto NAIAD.

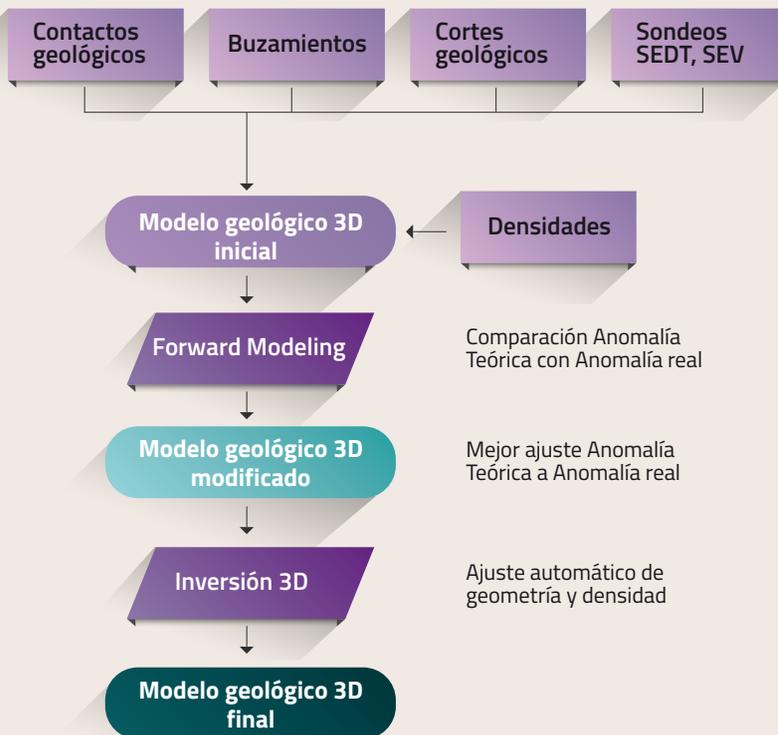


Figura 2.1 Esquema de modelización



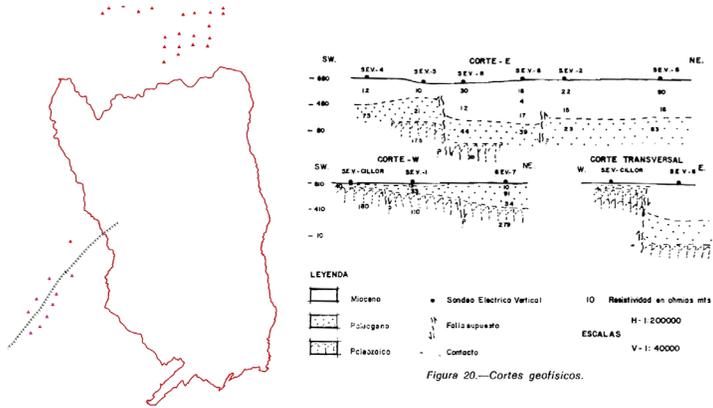


Figura 20.—Cortes geofísicos.

Figura 2.2. Sondeos eléctricos

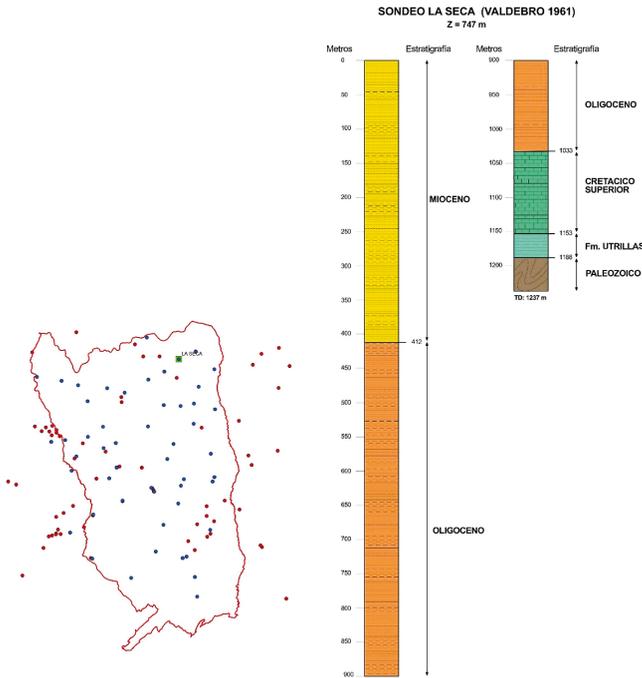


Figura 2.3. Conjunto de sondeos

Un aspecto metodológico importante ha sido el uso de inversión gravimétrica 3D con el programa Geomodeller.

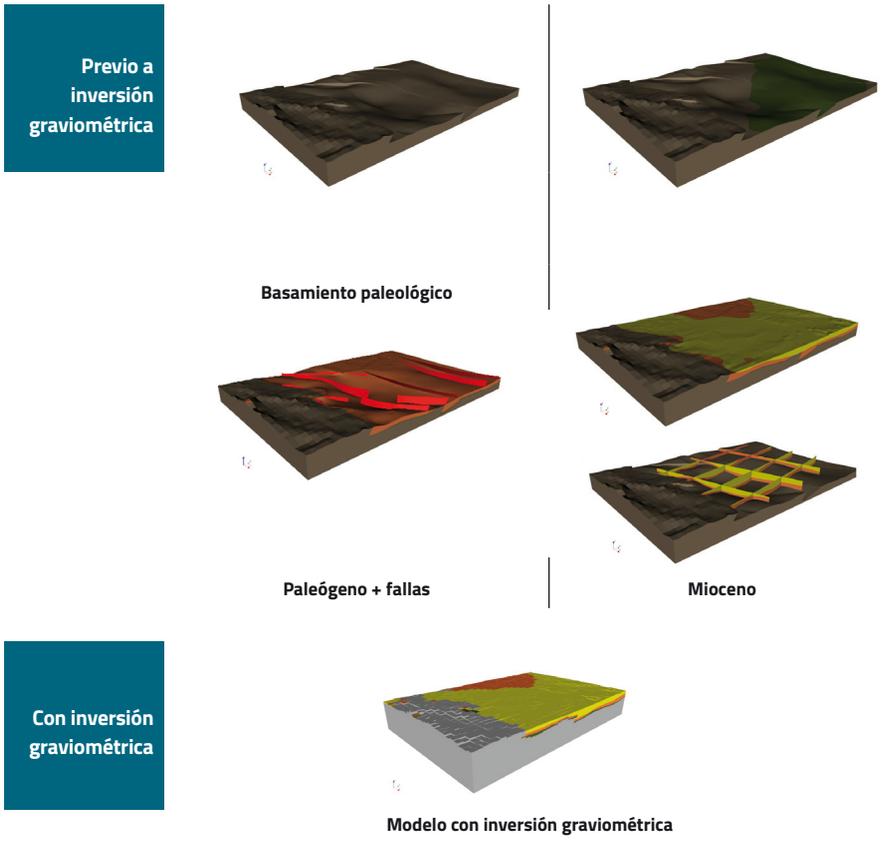
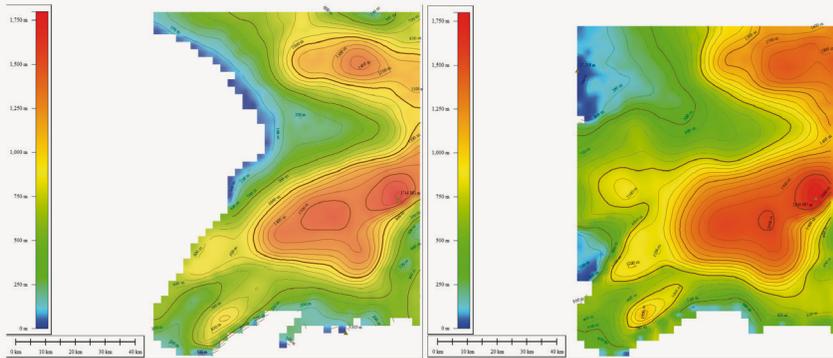


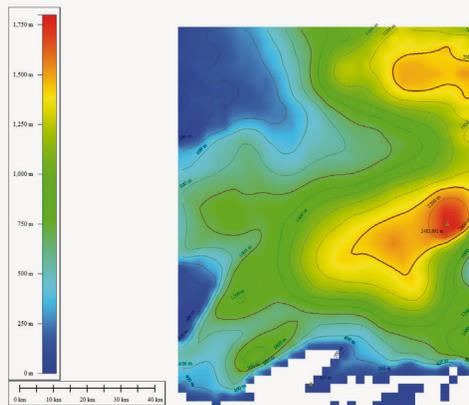
Figura 2.4. Visión de las distintas capas del modelo.

Asimismo, se han elaborado tres columnas litoestratigráficas representativas de las tres zonas en las que se ha subdividido la MASM (Figura 1.a). Incluyen el tipo de acuífero, las relaciones de conexión hidráulica entre las formaciones presentes, y la información relativa a los parámetros hidrogeológicos de los que existen datos o que se han deducido, como la permeabilidad, la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento. Estas columnas hidro-estratigráficas aportan un valioso recurso de síntesis y compilación del estado de conocimiento hidrogeológico, así como un resumen gráfico que puede ser extrapolado sin dificultad con garantías de utilidad, posibilitando estudios comparativos. No obstante, la representatividad de los parámetros hidráulicos necesita de nuevos ensayos de bombeo y mejoras de estimación.



Profundidad del muro
del mioceno
(metros desde superficie)

Profundidad muro
del Paleógeno
(metros desde superficie)



Profundidad del techo del
basamento paleozoico
(metros desde superficie)

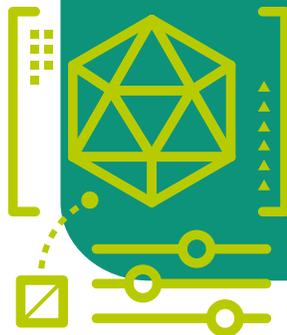
Figura 2.5. Profundidad de los muros de las distintas capas.

El modelo 3D muestra una geometría compleja afectada por fallas de dirección E-O a ENE-OSO y NE-SO. Este modelo geológico 3D representa un avance importante en el conocimiento de la geometría de la masa de agua y tendrá implicaciones en los futuros modelos de flujo de esta parte de la cuenca y en la definición de sus recursos y reservas.



Conclusiones clave_

- Se ha realizado un modelo geológico 3D que soporta toda la información geológica y geofísica disponible y de nueva adquisición en la región.
- El modelo 3D supone una aportación importante al conocimiento del subsuelo de la región con aplicación a futuros modelos de flujo.





Modelo numérico regional de flujo de agua subterránea y evaluación de algunos servicios ecosistémicos de las aguas subterráneas relevantes en la zona

AUTORES

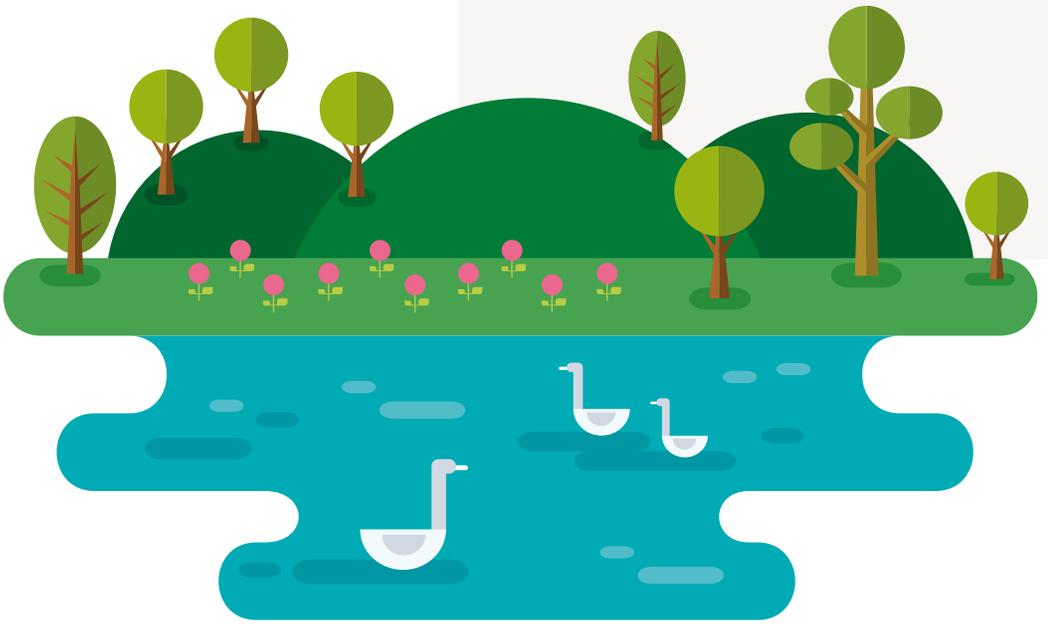
Marisol Manzano¹, Mar Alcaraz², Malgorzata Borowiecka¹, Virginia Robles¹, Marta Faneca²

INSTITUCIONES

¹Universidad Politécnica de Cartagena, UPCT, con la colaboración de ²DELTA RES.



SERVICIOS ECOSISTÉMICOS



Las aguas subterráneas de la Masa de Agua Subterránea Medina del Campo (MASMC) suministran diferentes servicios ecosistémicos, tales como la *Provisión de agua para riego y usos urbanos, o la generación y mantenimiento de ecosistemas superficiales*. Para conocer el comportamiento del sistema acuífero regional, su relación con valiosos ecosistemas superficiales de la zona tales como humedales, ríos y bosques de ribera, y el impacto relativo del cambio climático y la gestión del sistema acuífero en la evolución de los niveles, se ha construido un modelo numérico de flujo de agua subterránea. El ámbito espacial modelado engloba las masas de agua subterránea de Medina del Campo y sus adyacentes Los Arenales y Tierra del Vino, con el fin de definir lo mejor posible las condiciones hidráulicas en los límites oriental y occidental de la masa Medina del Campo (Figura 3.1). La modelación se realizó con MODFLOW-2005 (Harbaugh et al, 2017), utilizando la versión iMod (Vermeulen et al, 2019). La calibración se realizó con PEST (Doherty y Hunt, 2010).



Figura 3.1. Izquierda: Dominio espacial del modelo y estructura vertical. Derecha: Zonas de permeabilidad horizontal (basadas en el mapa hidrogeológico de España; IGME, 1982, 1989, 1991).

Para reflejar la heterogeneidad hidrogeológica vertical, el modelo consta de tres capas (Figura 3.2). La capa superior representa el acuífero libre, que recibe la recarga de la lluvia y descarga a los ríos y a las capas más profundas; la capa intermedia representa el acuitado, que transmite agua entre las capas superior e inferior, y la capa inferior representa el acuífero semiconfinado, de gran espesor y que en la actualidad descarga principalmente a través de pozos y al río Duero. El dominio del modelo se dividió en una malla de 312 columnas y 213 filas, con celdas de 500x500 m. El periodo modelado va de 1950 a 2350; el intervalo de 1950 a 2018 se usó para calibrar el modelo y el de 2018 a 2050 para simular la evolución esperable de los niveles de ambos acuíferos bajo distintos escenarios. Las condiciones de contorno, la recarga y la tasa de explotación usadas para la calibración se muestran en Tabla 3.1. El modelo se calibró con datos de 67 puntos de observación distribuidos por las tres masas de agua, proporcionando un ajuste de regresión del 96,72 % con un coeficiente de regresión de 0,935, lo que se puede considerar un ajuste de alta fiabilidad. El error medio absoluto fue de 13 m.



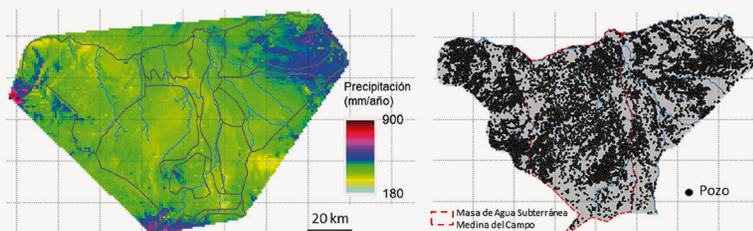


Figura 3.2. Izquierda: Precipitación media usada para calcular la recarga. Derecha: Distribución de las explotaciones (fuente de los datos: www.chduero.es).

CONDICIONES DE CONITORNO

- Ríos: zonas de recarga o descarga. Definido por la topografía y un valor de conductancia (calibrado manualmente).
- Contornos: flujo nulo, salvo en los límites S (flujo lateral establecido) y N (descarga al río Duero).

RECARGA

- Se estableció en el 6 % de la precipitación media regional (tomada de www.chduero.es), con base en los resultados de un balance de tritio realizado por el CEDEX (Plata et al., 2006).

EXTRACCIONES

- Extracciones autorizadas (las 3 masas): 1,3 hm³/día, de unos 20.000 pozos.
- En la Masa de Medina: 0,7 hm³/día, de unos 5.700 pozos.
- Notable incertidumbre respecto a:
 - Profundidades de bombeo.
 - Evolución temporal de extracciones.
 - Función temporal de extracciones simple, basada en datos oficiales y en observaciones.

Tabla 3.1. Condiciones de contorno, recarga y función de explotación usadas para la calibración.

Tras alcanzar una calibración aceptable, el modelo se usó para simular la evolución de los niveles piezométricos en ambos acuíferos para cuatro escenarios de gestión y tres escenarios climáticos acordados entre los investigadores de NAIAD y la CHD. Los escenarios de gestión se implementaron a través del Índice de Explotación (IE, relación entre salidas y entradas de agua), que indica un régimen de explotación sostenible cuando su valor es 1 o inferior. En cada escenario, el valor del IE se redujo linealmente desde su valor actual (1,65, según datos de la CHD) hasta el valor objetivo (IE_o) para el año 2050: 0) IE_o=1,65, escenario sin cambios; 1) IE_o=0,85; 2) IE_o=0,8; 3) IE_o=0,0. El escenario 2) es el objetivo de CHD, el escenario 1) se modeló para conocer la sensibilidad del sistema a pequeños cambios en la gestión de las aguas subterráneas; el escenario 3) sirve de referencia. Los escenarios climáticos se definieron a través del valor de la precipitación: A) sin cambios; B) la precipitación aumenta un 3 % para 2050 (valor promedio de varios modelos de proyección climática preparados por uno de los participantes en NAIAD, el Centro de Servicios Climáticos de Alemania); C) la precipitación disminuye un 8 % para el 2050 (según CEDEX, 2017) (Tabla 3.2).



El impacto relativo de los diferentes escenarios sobre el servicio de *Provisión de agua para riego y usos urbanos* (es decir, sobre el incremento de agua subterránea almacenada disponible para usos humanos) se evaluó comparando los resultados de los modelos en términos de cambios piezométricos totales (en m) y de tasa de evolución (m/año) entre 2018 y 2050 y 2350. Los resultados (*Tabla 3.2*) indican que, en el corto plazo (año 2050), el nivel piezométrico en el centro del área (cerca de la ciudad de Medina del Campo) sería el mismo que en el año 2018 (sin cambios) para $IE_0=0,8$; 1 m más bajo (-1 m) para $IE_0=0,85$ y 3 m más alto para $IE_0=0,0$, bajo cualquier escenario climático. A largo plazo (año 2350), el nivel piezométrico sería 2 m más alto con $IE_0=0,8$ que con $IE_0=0,85$ para cualquier escenario climático, y entre 27 y 30 m más alto para $IE_0=0,0$. **Por tanto, la gestión del agua subterránea tiene un impacto mucho mayor en la recuperación piezométrica** (y de agua almacenada y disponible) **que el cambio climático**. Además, pequeños cambios de gestión producen impactos notables. Este resultado se observa muy claramente en la *Figura 3.3*.

Escenarios climáticos / Escenarios de gestión	0- IE_0 Sin cambios	1- $IE_0 = 0,85$ para 2050 y más allá	2- $IE_0 = 0,8$ para 2050 y más allá	3- $IE_0 = 0,0$ para 2050 y más allá
A- Precipitación sin cambios	En 2050: -10 m	2050: -1 m 2350: +4 m (0,012 m/año)	2050: 0 m 2350: +6 m (0,018 m/año)	2050: +3 m 2350: +29 m (0,087 m/año)
B- Precipitación aumenta 3 % para 2050 (NAIAD, 2019)	En 2050: -10 m	2050: -1 m 2350: +5 m (0,015 m/año)	2050: 0 m 2350: +7 m (0,021 m/año)	2050: +3 m 2350: +30 m (0,090 m/año)
C- Precipitación disminuye 8 % para 2050 (CEDEX, 2017)	En 2050: -10 m	2050: -1 m 2350: +2 m (0,006 m/año)	2050: 0 m 2350: +4 m (0,012 m/año)	2050: +3 m 2350: +27 m (0,081 m/año)

Tabla 3.2. Cambios piezométricos en 2050 y 2350 respecto a la situación en 2018 calculados para un pozo ubicado cerca de la ciudad de Medina del Campo bajo los escenarios climáticos y de gestión considerados.

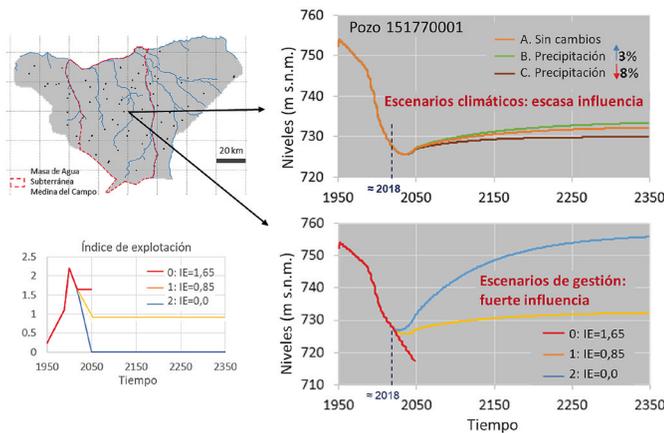


Figura 3.3. Evolución modelada del nivel piezométrico en un punto de control situado en el centro de la zona bajo los principales escenarios de gestión del agua subterránea y cambio climático considerados.

El impacto sobre el servicio *Generación y mantenimiento de ecosistemas superficiales* (es decir, sobre las condiciones para la descarga de aguas subterráneas en arroyos y humedales) se evaluó comparando el área total inundada resultante del afloramiento de agua subterránea en la superficie. Puesto que los cambios climáticos considerados tienen un impacto muy pequeño, la evaluación se basó solo en el efecto de los cambios en la gestión del agua subterránea. Suponiendo un área inundada total de 76.000 ha en el año 1950 como referencia de las condiciones naturales (estimada con el modelo en régimen estacionario), y un área inundada remanente del 31 % para el año 2018, para el escenario objetivo de CHD $IE_0=0,8$ se produciría una recuperación del 35 % de la superficie en el año 2050, y del 54 % en el año 2350 (Figura 3.3). Estimaciones adicionales mostraron que con $IE_0=0,8$ se necesitarían hasta 2025 años para recuperar toda la superficie inundada en régimen natural, mientras que con $IE_0=0,0$ podría recuperarse casi por completo para 2350.

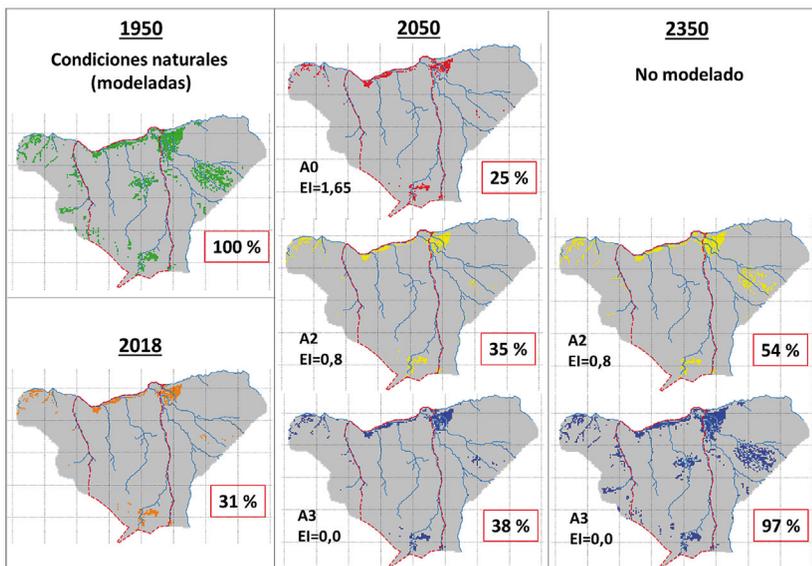


Figura 3.4. Superficie inundada modelada en 1950 (estado natural) y en 2018, 2050 y 2350 para el escenario climático A y los escenarios de gestión 0, 2 y 3 de la Tabla 3.2.



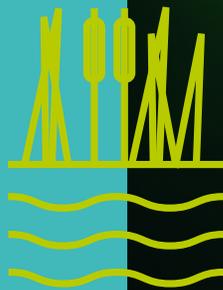
Conclusiones clave_

- La gestión del agua subterránea (modelada mediante la reducción del índice de explotación) tendrá un impacto mucho mayor en la recuperación piezométrica (y de los servicios ecosistémicos del agua subterránea considerados) que el cambio climático (modelado mediante la modificación de la recarga al acuífero regional).
- El sistema acuífero es muy sensible a la gestión de la explotación, ya que pequeñas variaciones del índice de explotación (por ejemplo, de 0,8 a 0,85) tienen un impacto significativo en la recuperación de los niveles a largo plazo.
- En el corto plazo (2050), el impacto tanto del cambio climático como de los cambios de gestión sobre los niveles piezométricos sería irrelevante: no habría una recuperación significativa de los niveles ni de las áreas inundadas (ríos y humedales).
- A largo plazo (2350), los escenarios climáticos son levemente relevantes, mientras que los escenarios de gestión tienen una gran influencia: si cesara la explotación de aguas subterráneas ($IE_0=0,0$), tanto los niveles piezométricos como las áreas inundadas recuperarían su estado natural al cabo de unos 300 años, mientras que para el escenario objetivo de CHD, $IE_0=0,8$, la recuperación requeriría unos 2025 años.



Conclusiones clave_

- Este trabajo ilustra el uso de una metodología sólida para evaluar el impacto y la efectividad relativos de escenarios y estrategias bastante diversas sobre la recuperación de niveles de un gran sistema acuífero regional sobre el cual aún existen incógnitas. A pesar de estas, los resultados obtenidos pueden ser útiles para apoyar decisiones de gestión.



Estudio de la recarga artificial del acuífero

AUTORES

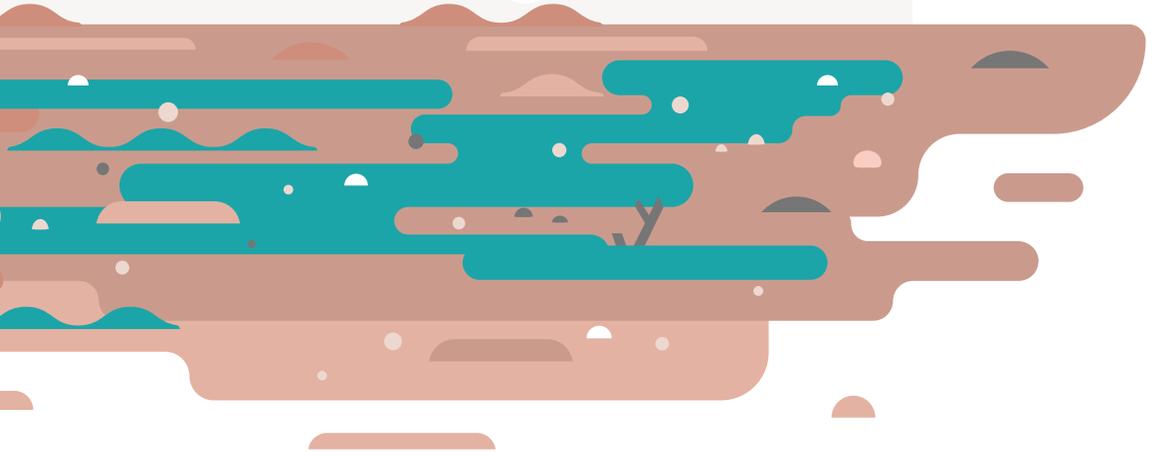
Javier Heredia, Héctor Aguilera, Víctor Gómez-Escalonilla, Pedro Martínez-Santos,
José Antonio de la Orden, Julio López-Gutiérrez

INSTITUCIONES

Instituto Geológico y Minero de España (IGME), con colaboración de
la Universidad Complutense de Madrid, UCM.



RECARGA ARTIFICIAL



Con respecto a las actuaciones relacionadas con recarga artificial al acuífero, la Confederación Hidrográfica del Duero planificó ejecutar cuatro acciones de recarga artificial mediante vertido en cauce en la masa-400047 correspondiente a la Masa de Agua Subterránea de Medina del Campo (MASMC). Su objetivo era recuperar el descenso de niveles del acuífero regional causado por los bombeos.

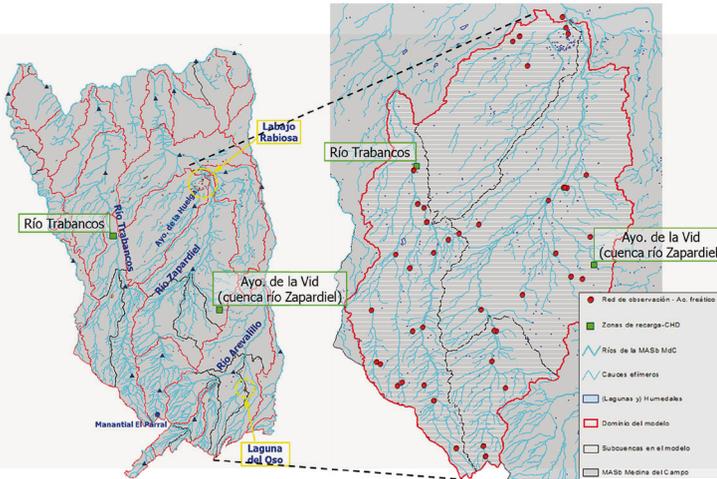


Figura 4.1. Situación de los puntos de recarga considerados

En la MASMC se alternan niveles de materiales de distinta granulometría y potencia y extensión variable. Los materiales finos conforman acuitardos sobre los que existen acuíferos colgados y con ello Zonas No Saturadas profundas. Se ejecutaron dos modelos de flujo 2D de sendas secciones verticales en el río Trabancos y en el arroyo de la Vega (cuenca del Zapardiel), para evaluar si la recarga artificial impacta sobre el acuífero profundo. Se utilizó el código VS2Di (Lappala et al., 1987) y se representaron dos escenarios climáticos: una década en que los años húmedos, medio y secos siguen la secuencia tipo del período 1940-2012 y otra, formada por años medios.

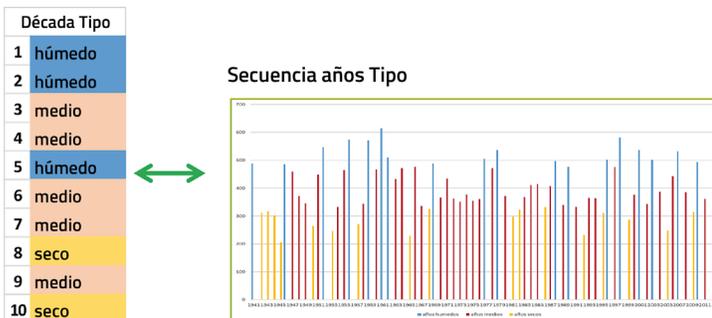


Figura 4.1. Situación de los puntos de recarga considerados

En ninguno de los dos escenarios climáticos, en los dos puntos estudiados, el agua recargada llega al acuífero regional. Ésta es retenida en los acuitardos y el bulbo de saturación en el acuífero colgado más somero no es relevante más allá de los 1000 m. Por otro lado, está en desarrollo un modelo 3D del acuífero colgado freático utilizando el código MODFLOW 2005, que representa las subcuencas alta y media del río Zapardiel. En él se simulará el tramo de cauce inundado para la recarga y se estudia el impacto sobre los cuerpos de agua superficiales y el monto del agua que percola a través del acuitardo.

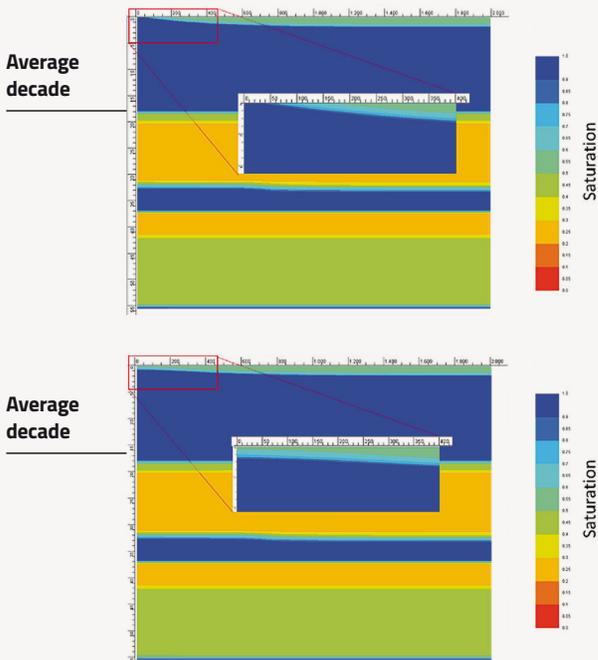


Figura 4.3. Resu

ida
 iza artificial

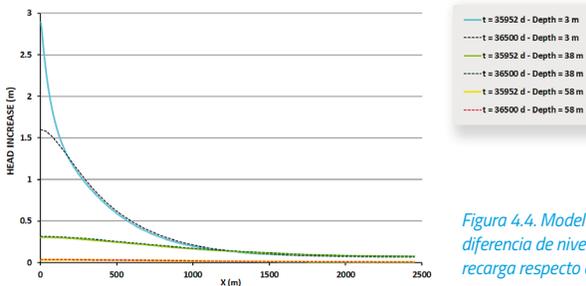


Figura 4.4. Modelo sistema multicapa: diferencia de niveles por efecto de la recarga respecto al régimen natural.



Conclusiones clave_

- En la década estudiada, sólo se infiltra desde el acuífero somero algo menos del 40% del volumen de recarga artificial anual, pero sólo alcanza el acuífero regional profundo una media ponderada del 14% de ésta. En los 2 años iniciales, el efecto de la recarga artificial sobre el acuífero profundo es inapreciable y en el primer lustro la recarga es del 5% del volumen anual vertido.
- El acuífero superficial retiene un 60% del volumen recargado, pero un 14% vuelve al arroyo de la Vega y el resto se concentra en un "corredor" a lo largo de su curso, siendo irrelevante el incremento de niveles del acuífero a más de 1.000 m de distancia. No obstante, esta elevación de la piezometría en torno al arroyo es estable en el tiempo.
- El nivel del acuífero superficial bajo las lagunas Reales y La Rabiosa como efecto de la recarga tiene un incremento inapreciable y se mantiene a 1 m por debajo del lecho de las mismas.





Estudio de las relaciones entre los humedales superficiales y el acuífero: las Lagunas Reales

AUTORES

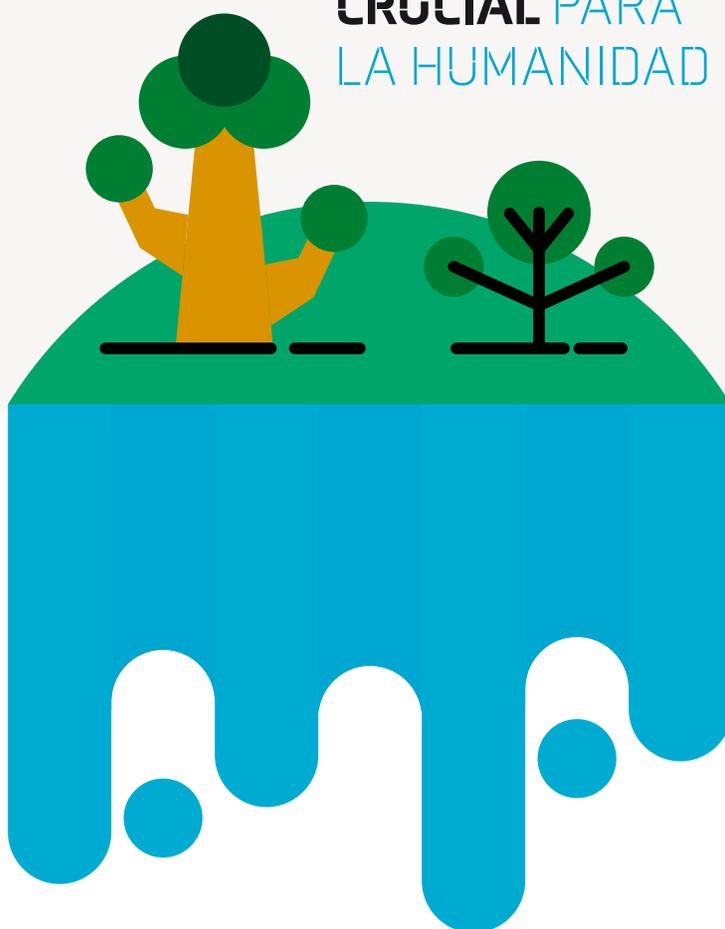
Rosa Mediavilla, Violeta Borrueal-Abadía, Ignacio López-Cilla,
Luis Galán, Juan I. Santisteban

INSTITUCIÓN

Instituto Geológico y Minero de España (IGME), con colaboración del Dpto. Geodinámica,
Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias Geológicas,
Universidad Complutense de Madrid.



LOS HUMEDALES
SON UN RECURSO
CRUCIAL PARA
LA HUMANIDAD



Los humedales son un recurso crucial para la humanidad ya que regulan el clima, albergan gran cantidad de las especies biológicas y juegan un papel clave en el ciclo hidrológico. Con todo, son uno de los ecosistemas más amenazados y, durante el último siglo, más de la mitad de ellos han desaparecido debido, en gran medida, a la acción humana (Stacke y Hagemann, 2012; Davidson, 2014).

Esa tendencia global también se observa en los humedales ubicados en relación a la MASMC, donde una parte de ellos han desaparecido, en las últimas décadas, y otros se encuentran en mal estado de conservación. La pérdida de este patrimonio natural y de los servicios ecosistémicos que prestan es motivo de preocupación para la sociedad y las distintas Administraciones Públicas. Por ello, y con objeto de conocer los factores que han motivado esa degradación de las zonas húmedas y poder desarrollar estrategias de gestión sostenibles, se abordó un estudio detallado de las Lagunas Reales, ubicadas al sur de Medina del Campo (Figura 5.1). Este estudio se ha llevado a cabo desde tres perspectivas: (1) la caracterización del sistema sedimentario actual, (2) el conocimiento del medio a partir de la información obtenida en la documentación histórica y (3) análisis del registro sedimentario del humedal.

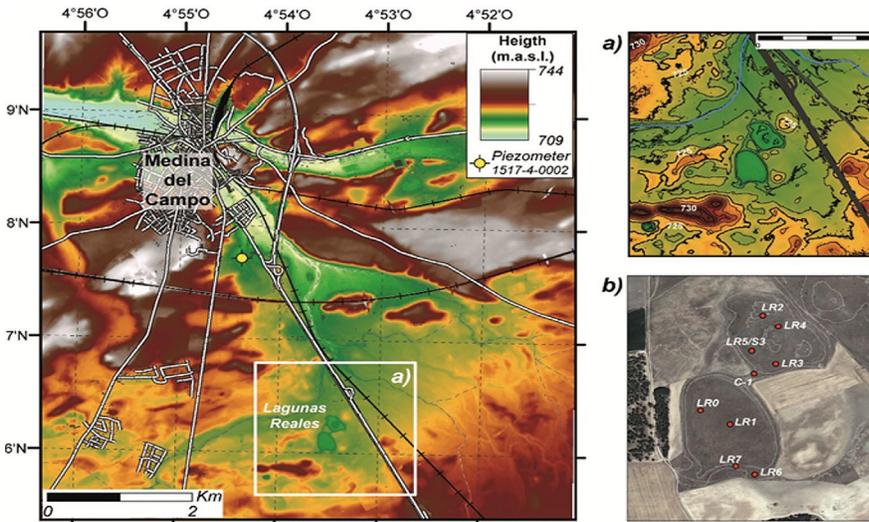


Figura 5.1. Localización de las Lagunas Reales (SE de Medina del Campo, centro de España). a) Detalle e información topográfica y b) localización de los sondeos realizados. Fuente: Mediavilla et al. (2021a).

Los datos analizados para la caracterización del sistema actual indican que hasta 1985 el humedal estuvo alimentado, además de por las aguas de lluvia, por aguas subterráneas y que es en torno a esa fecha cuando se produce la desconexión del acuífero detrítico del Duero, como consecuencia de un descenso piezométrico motivado por una sobreexplotación de las aguas subterráneas para uso principalmente, pero no exclusivamente, agrícola (Figura 5.2).



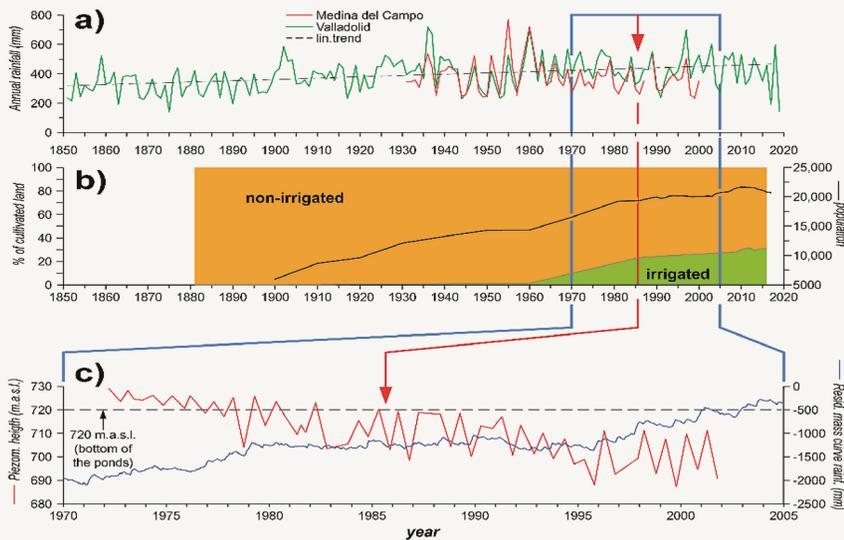


Figura 5.2. Relaciones entre las precipitaciones (a y c), la actividad humana (b, evolución de la población y regadío) y la evolución de la cota piezométrica (c, en azul la precipitación acumulada, en naranja la cota piezométrica del acuífero). Fuente: Mediavilla et al. (2020).

Con posterioridad a 1985, los niveles piezométricos han seguido descendiendo, aunque la precipitación acumulada aumenta. En las Lagunas se observa lámina de agua únicamente en los años de precipitaciones importantes (1991, 1998, 2001, etc.) (Figura 5.3) y durante estos episodios constituyen un área de recarga del acuífero. El análisis de la evolución hídrica de las Lagunas Reales y su relación con la actividad antrópica pone de manifiesto que la resiliencia del humedal a las afecciones antrópicas es muy baja.

En relación con el funcionamiento de las Lagunas Reales, en condiciones naturales, los datos históricos revelan que durante el siglo XX se comportaron como un sistema efímero (lámina de agua no permanente) donde se acumulaban sedimentos siliciclásticos gruesos en los periodos de lluvias importantes, y sedimentos siliciclásticos de decantación y químicos durante los estiajes. Este comportamiento no fue así siempre y los datos históricos indican que las lagunas presentaron una lámina de agua más estable o permanente, al menos, entre 1610 y 1745, periodo en el que la pesca (tencas, anguilas, etc.) fue una actividad importante en las lagunas (Figura 5.4). Esos niveles más permanentes se conseguían de forma natural, probablemente por un aumento en las precipitaciones (periodo más húmedo), dado que las lagunas carecían de aportes de agua de otras fuentes, como las propiciadas por el hombre.

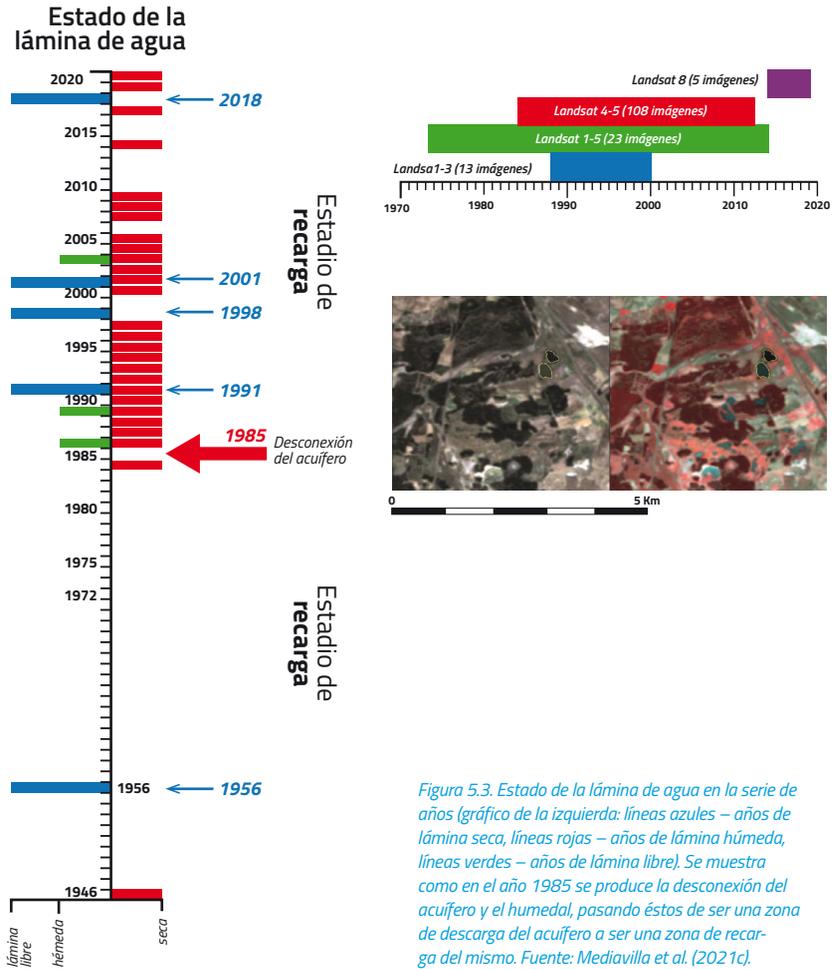


Figura 5.3. Estado de la lámina de agua en la serie de años (gráfico de la izquierda: líneas azules – años de lámina seca, líneas rojas – años de lámina húmeda, líneas verdes – años de lámina libre). Se muestra como en el año 1985 se produce la desconexión del acuífero y el humedal, pasando éstos de ser una zona de descarga del acuífero a ser una zona de recarga del mismo. Fuente: Mediavilla et al. (2021c).

Esta variabilidad del humedal deja su huella también en los sedimentos que se acumulan en dicho sistema. El registro sedimentario (Figura 5.5) indica que las Lagunas se formaron hace algo menos de 3000 años y que su relleno está constituido fundamentalmente por sedimentos siliciclásticos, arrastrados por las aguas de lluvia, y químicos, precipitados a partir de la lámina de agua del humedal. La salinidad de las aguas ha variado a lo largo del tiempo en función de la variabilidad de los aportes de agua a corto y largo plazo (Figura 5.6) Así, los modelos resultantes para las lagunas muestran que los periodos más húmedos (secuencias 3 y 1; Figura 5.4 y 5.5) se caracterizan por altos niveles de agua subterránea que permiten que el agua salina más profunda surja en la superficie, De la Hera-Portillo et al. (2021), y deje su huella digital en la geoquímica de los sedimentos, mientras que los periodos más

secos (secuencias 2 y 3; *Figura 5.4 y 5.5*) se caracterizan por niveles más bajos de agua subterránea y una mayor influencia de las aguas superficiales (menos salinas) que también se registran en los sedimentos. La recurrencia de estas secuencias a lo largo del tiempo demuestra la buena resiliencia del humedal al cambio climático en condiciones naturales.

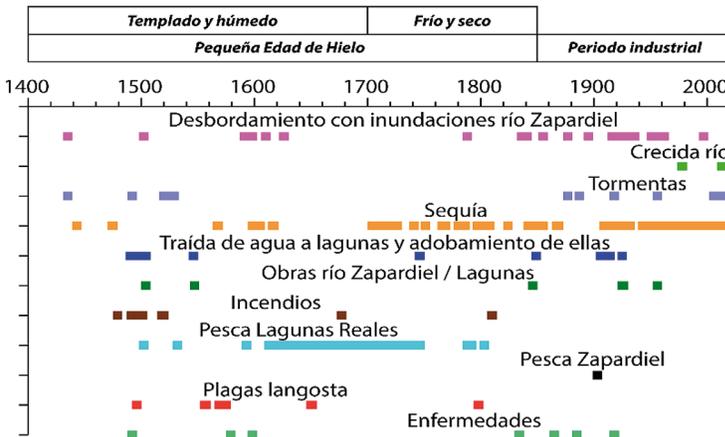


Figura 5.3. Estado de la lámina de agua en la serie de años (gráfico de la izquierda: líneas azules – años de lámina seca, líneas rojas – años de lámina húmeda, líneas verdes – años de lámina libre). Se muestra como en el año 1985 se produce la desconexión del acuífero y el humedal, pasando éstos de ser una zona de descarga del acuífero a ser una zona de recarga del mismo. Fuente: Mediavilla et al. (2021c).

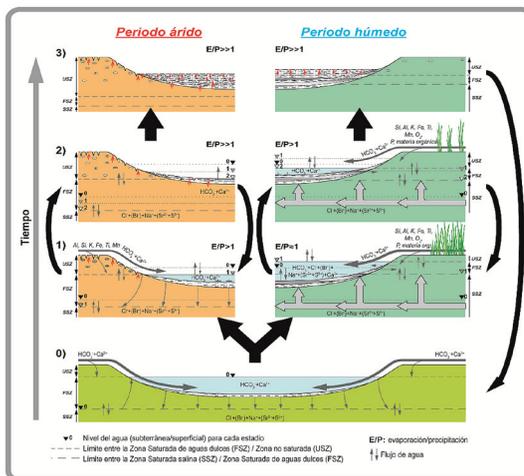
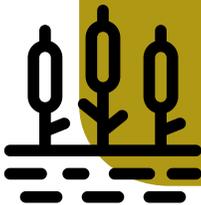


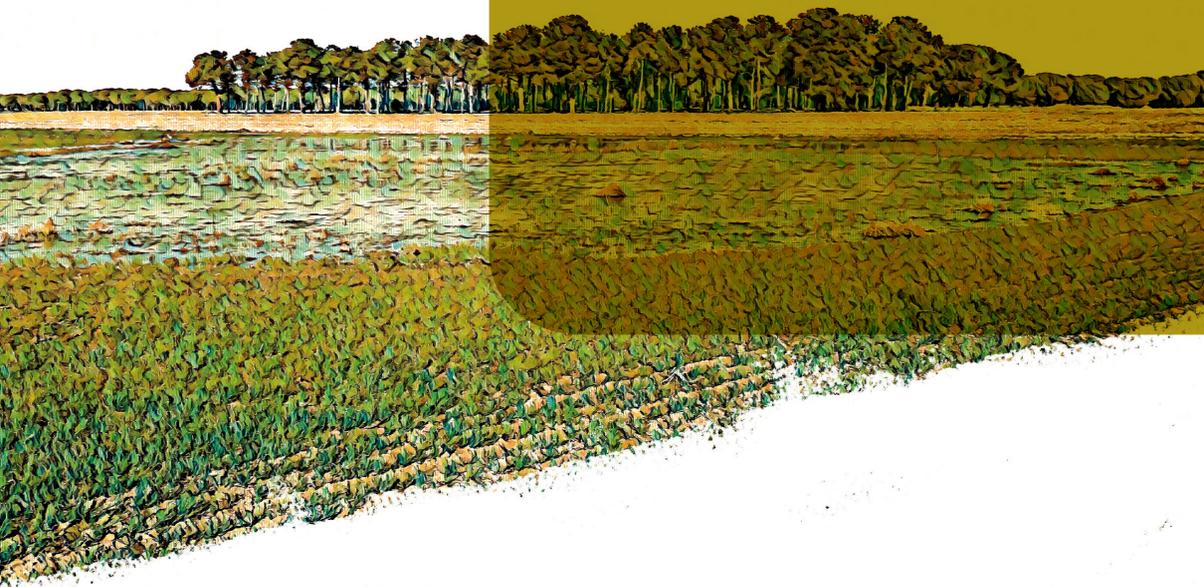
Figura 5.5. Detalle del registro sedimentario en las columnas estudiadas. Fuente: adaptado de Mediavilla et al. (2020).

Conclusiones clave_

- La mayor parte de la superficie funcional de los humedales ha desaparecido. Los servicios ecosistémicos prestados en el pasado contribuían no sólo al bienestar humano, sino a la conservación del patrimonio natural.
- Las Lagunas Reales se alimentaron de lluvia, aguas superficiales y subterráneas hasta 1985, momento en el que se desconectaron del acuífero por la sobreexplotación de las aguas para uso fundamentalmente agrícola. La información reciente muestra que el sistema tiene una pobre resiliencia a la actividad humana.
- Las lagunas Reales tienen una antigüedad de unos 3000 años y era un sistema somero alimentado por aguas superficiales (dulces) y subterráneas (más salinas). La sedimentación siliciclástica tuvo lugar bajo condiciones climáticas cambiantes, lo que indica una buena resiliencia del sistema al cambio climático.
- La sobreexplotación del acuífero durante cerca de 20 años causó la degradación de las Lagunas Reales tras más de dos milenios de existencia durante los que el sistema proporcionó beneficios a la población. Con todo, la capacidad del sistema para recuperarse durante los episodios pasados de estrés hidrológico puede ser una interesante guía para futuros estudios encaminados a la recuperación del humedal.



LAGUNAS REALES



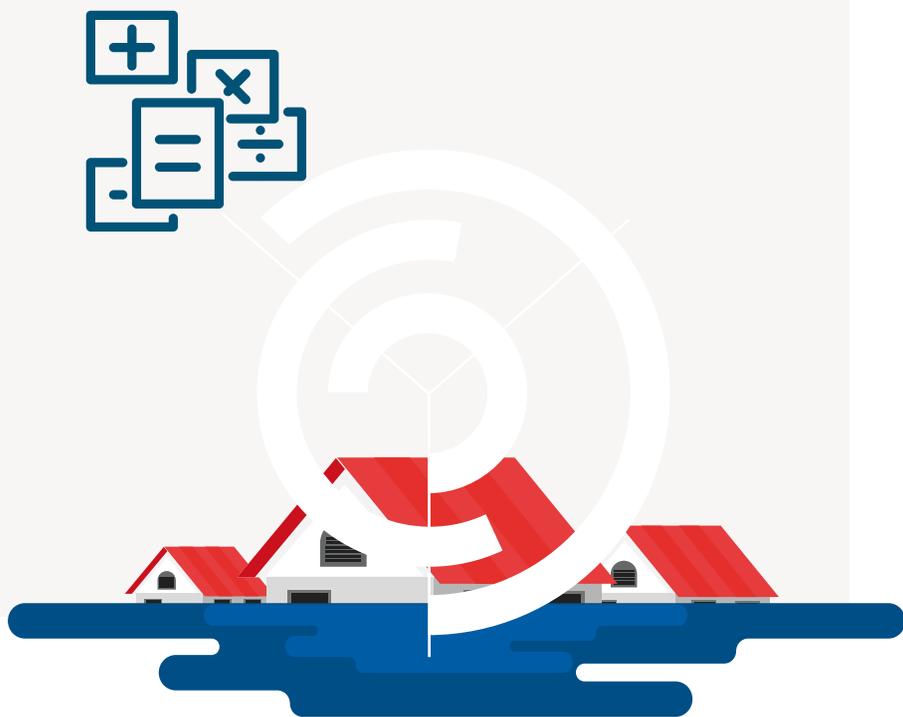
Evaluación del riesgo de inundación en Medina del Campo

AUTOR
Miguel Llorente

INSTITUCIÓN
Instituto Geológico y Minero de España (IGME)



EVALUACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN



Se ha realizado una evaluación del riesgo de inundación realizada en la Masa de Agua Subterránea de Medina del Campo (MASMC). La MASMC presenta un clima donde la variabilidad es la principal característica con respecto a los registros pluviales, con baja precipitación anual donde la contribución de un solo día de lluvia es muy significativa. Esto significa que los eventos de lluvias intensas son raros y los días sin incidencia de lluvia son los más frecuentes. Dado que la contribución de eventos de un solo día a la precipitación anual es significativa, no es una sorpresa que los años sucesivos muestren tendencias alternas, como muestra la *figura 6.1*.

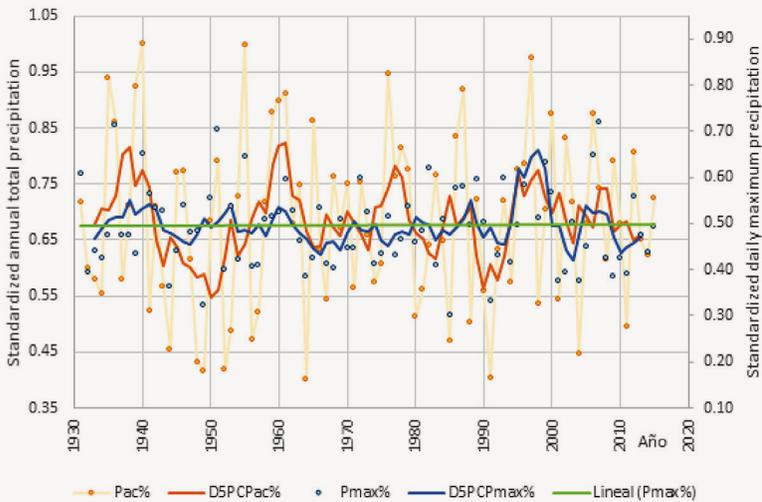


Figura 6.1. Tendencias de precipitación. Pac% en naranja es la precipitación acumulada anual (normalizada) y Pmax% en azul es la precipitación máxima diaria (normalizada), ambas acompañadas de una tendencia media de 5 años (líneas sólidas). La línea plana verde muestra la tendencia lineal.

Los ríos son en su mayoría irregulares, discurriendo mínimo o ningún flujo la mayoría del año. A este promedio de bajo flujo se suman unas pendientes poco pronunciadas a lo largo de toda la MASMC, dando lugar a arroyos estrechos y poco profundos. Combinando dichas características, sería de esperar que se produjeran desbordamientos con relativa frecuencia y, en efecto, los registros históricos corroboran esa percepción, registrando una inundación cada 15 años.

La localidad más afectada por las inundaciones en la región es Medina del Campo, por lo que este estudio pone el foco en el tramo del río Zapardiel que fluye a través de la misma. Se ha demostrado que flujos tan ordinarios como del 2% de probabilidad de ocurrencia anual ya podrían causar desbordamiento, si bien muy limitado. Inundaciones del 0,2 % de probabilidad sin duda tendrán un mayor impacto, llegando a algunos edificios históricos.



La modelización hidráulica en sí se llevó a cabo teniendo en cuenta las infraestructuras que se construyeron específicamente para las inundaciones, a saber, los diferentes métodos de canalización del río Zapardiel a través de la ciudad de Medina del Campo. Hay una serie de infraestructuras (alcantarillas, puentes) tanto aguas arriba como aguas abajo, que seguramente afectan al caudal; sin embargo, ninguna de ellas se incluyó para tener en cuenta sólo las condiciones más similares al estado "natural" del río, excluyendo el canal. Es probable que las infraestructuras que no sean los canales causen bloqueos adicionales y, por lo tanto, un cambio sustancial en las condiciones de flujo. Así que el modelado es en realidad el más cercano a la condición natural como si ninguna otra infraestructura estuviera presente ni aguas arriba (como diques) ni aguas abajo. Los resultados muestran que Medina del Campo puede verse afectada por flujos en condiciones cercanas a las naturales (Figura 6.2). Trabajos adicionales deberían evaluar la oportunidad de utilizar áreas aguas arriba como llanuras de inundación, lo que podría contribuir a la reducción de los picos de flujos máximos.

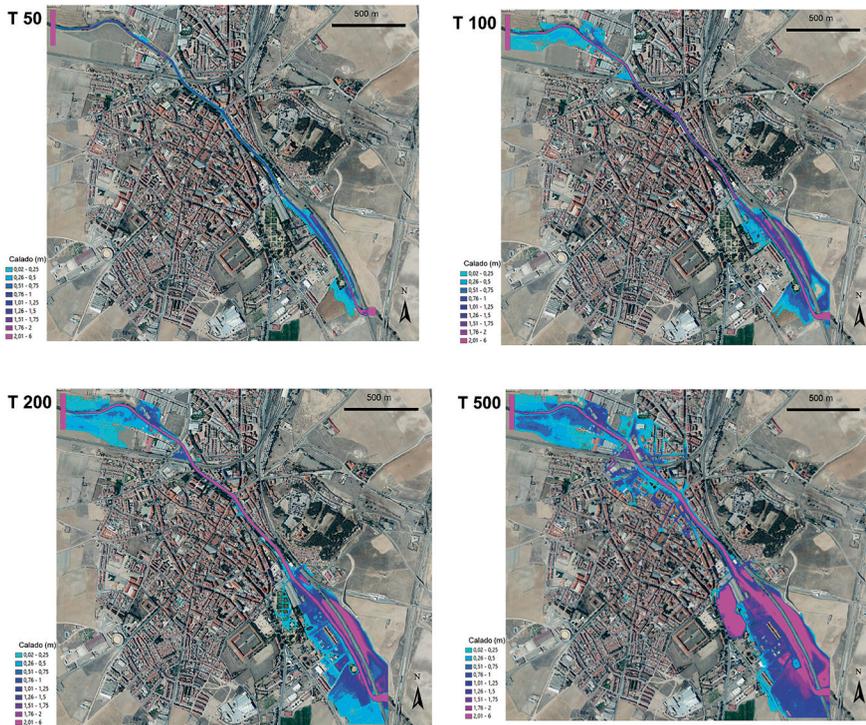


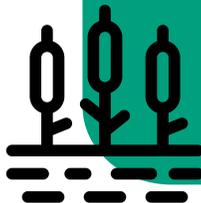
Figura 6.2. Profundidad del agua para la probabilidad de superación anual del flujo diferente considerado: 2%, 1%, 0.5% y 0.02% (50, 100, 200 y 500 período de retorno en años, respectivamente).





Conclusiones clave_

- Medina del Campo sigue siendo propensa a las inundaciones. El alcance de tales inundaciones está muy influenciado por el canal ya construido, y son esperables desbordamientos con probabilidades tan bajas como el 2%. Por tanto, parece claro que las infraestructuras que podrían bloquear el flujo deben ser revisadas y evaluadas. Aún así, con probabilidades anuales de ocurrencia mayores, la extensión de las inundaciones resultantes es limitada, por lo que se espera que sean relativamente superficiales y con bajas velocidades.
- Algunas infraestructuras no evaluadas, incluidos los puentes y pasarelas, dentro del área y aguas arriba, y particularmente las situadas en los límites de entrada del modelo, podrían afectar en gran medida al flujo. Entre las últimas figuran dos puentes muy cercanos que probablemente promoverán la inundación de las áreas justo aguas arriba de la localidad. Por lo tanto, cualquier perturbación respecto a la condición natural en el área aguas arriba podría afectar en gran medida a las inundaciones.



Conclusiones clave_

- Hoy en día, las inundaciones afectarían de forma natural, con una probabilidad del 2% anual (10 años), 50 casas individuales ubicadas en el sureste, con una profundidad superior a 1,3 metros. Una cantidad similar de casas individuales situadas a menos de 0,4 metros del río al suroeste también se verían afectadas. La zona verde de Villa de las Ferias, también en la zona SE, alcanzaría profundidades más allá de los 3m. Siguiendo el flujo aguas abajo, dos o tres filas de casas se verían afectadas por el caudal, incluyendo algunos edificios del Patrimonio Cultural (como las Carnecerías Reales y los edificios más cercanos al río desde el Ayuntamiento).
- En general, Medina del Campo sigue ejerciendo presión sobre el río Zapardiel. La mayor parte de la presión urbanística podría ser impulsada después de los niveles de agua muy variables que generalmente serían cero o cerca de cero la mayor parte del año, la mayoría de los años.





Referencias



CEDEX. (2017). *Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y sequías en España*. Centro de Estudios Hidrográficos del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Ministerio de Fomento, Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.

CHD. (2015). *Plan Hidrológico de la parte española de la demarcación hidrográfica del Duero (2015-2021)*. Memoria del Plan Hidrológico de Cuenca. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

De la Hera_Portillo, A.; López-Gutiérrez, J.; Marín-Lechado, C.; Martínez-Santos, P.; Ruíz-Constán, A.; Corral-Lledó, M.M.; Galindo-Rodríguez, E.; Mediavilla, R.; santisteban J.I.; Rodríguez-Jiménez, E.; Callaú-López, F.M. (2021). *Integrating current and historical water chemistry data with long-term piezometric records to develop a regional-scale conceptual flow model: Las Salinas spring, Medina del Campo, Spain*. *Journal of Hydrology: regional Studies* 34 (2021) 100781. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100781>

Doherty, J.E.; Hunt, R.J. (2010). *Approaches to highly parameterized inversion-A guide to using PEST for groundwater-model calibration*; 2010; SIR; 2010-5169. United States Geological Survey.

Harbaugh, A.W., Langevin, C.D., Hughes, J.D., Niswonger, R.N., and Konikow, L. F. (2017). *MODFLOW-2005 version 1.2.00, the U.S. Geological Survey modular groundwater model: U.S. Geological Survey Software Release*, 03 February 2017.

IGME. (1982, 1989, 1991). *Mapa hidrogeológico de España escala 1:200.000*. Hojas: 37, Salamanca; 29, Valladolid; 38, Segovia.

Lappala, E.G., Healy, R.W. & Weeks, E.P., (1987). *Documentation of computer program VS2D to solve the equations of fluid flow in variably saturated porous media*. USGS Water-Resources Investigation Report 83-4099. U.S. Geological Survey, Reston.



Mayor, B., de la Hera-Portillo A., Llorente M., Heredia J., Calatrava J., Martínez D., Manzano M., García-Alcaraz M.M., Robles-Arenas, V., Borowiecka, M., Mediavilla R., de la Orden JA., López-Gutiérrez J., Aguilera-Alonso, H., Basco L., Faneca M., Trambauer P., Hermawan T., Giordano, R., Gómez E., Zorrilla-Miras P., Rica, M. Vay L., Rubio F., Marín-Lechado C., Ruiz-Constán A., Bohoyo-Muñoz F., Marcos, C., López Gunn E. (2021a) *Multidisciplinary assessment of nature based strategies to address groundwater overexploitation and drought risk in Medina del Campo Groundwater Body*. Chapter 11 in: Lopez Gunn, E., P. Van der Keur, N. Van Cauwenbergh, L. Coent and R. Giordano (eds.). *Greening Water risks: natural assurance schemes*, Springer, Series on water security.

Mayor, B., López Gunn, E., Marcos, C., Vay, L. (2021b) *Explorando medidas basadas en la naturaleza y de gestión para la adaptación al cambio climático en el acuífero de Medina del Campo: lecciones aprendidas del proyecto NAIAD*. Publicación editada por la Confederación Hidrográfica del Duero.

Mediavilla, R., Santisteban, J.I., López-Cilla, I., Galán de Frutos, L., de la Hera-Portillo, A. (2020). *Climate-Dependent Groundwater Discharge on Semi-Arid Inland Ephemeral Wetlands: Lessons from Holocene Sediments of Lagunas Reales in Central Spain*. *Water*, 12, 1911, doi:10.3390/w12071911

Mediavilla, R.; Santisteban, J.I.; Borrueal-Abadía, V.; López-Cilla, I. (2021a). "Past and recent sedimentation at the Lagunas Reales and their long-term evolution". In: NAIAD PROYECT: Sustainable management of the Medina del Campo Groundwater Body, a commitment to the future. Beatriz Mayor, Elena López Gunn, Carlos Marcos, Laura Vay (Eds). Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Confederación Hidrográfica del Duero – 2021.

Mediavilla, R.; Santisteban, J.I.; Borrueal-Abadía, V.; López-Cilla, I. (2021b). *CAPÍTULO 6 Registro sedimentario pasado y reciente de las Lagunas Reales y su evolución a largo plazo*. En: PROYECTO NAIAD: la gestión sostenible del acuífero de Medina del Campo, una apuesta de futuro. Beatriz Mayor, Elena López Gunn, Carlos Marcos, Laura Vay (Eds). Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Confederación Hidrográfica del Duero – 2021. Pp: 61-68.

Mediavilla, R., Santisteban, J.I., Borrueal, V., de la Hera-Portillo, A., López, M. T. Gumiel, J.C. (2021,c). *Evolución hídrica de las Lagunas Reales (Cuenca del Duero, España) durante los siglos XX y XXI*. En: Geo-Temas. Volumen 18. X Congreso Geológico de España, 5-7 Julio 2021, Vitoria-Gasteiz. Jon Errandonea Martín, Idoia Gárate Olave, Sonia García de Madinabeitia, Fernando Sarrionandia Eguidazu (Eds). Pp: 309; ISSN: 1576-5172 (versión impresa). 2792-2308 (versión digital).

Plata Bedmar, A.; Pérez Zabaleta, E., Moreno Sánchez, J. 1996. *Evaluación de la recarga moderna de la unidad hidrogeológica Los Arenales usando técnicas isotópicas*. Revista Digital del CEDEX, (103), 131-145.

Stacke, T.; Hagemann, S. *Development and validation of a global dynamical wetlands extent scheme*. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2012, 16, 2915–2933.

Vermeulen, P.T.M, F.J. Roelofsen, B. Minnema, L.M.T. Burgering, J. Verkaik and A.D. Rakotonirina. 2019. *iMOD User Manual. Version 5.0*, December 24, 2019. Deltares, The Netherlands.







 <p>GOBIERNO DE ESPAÑA</p>	<p>VICEPRESIDENCIA TERCERA DEL GOBIERNO MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO</p>	<p>CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL DUERO, O.A. CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL DUERO</p> 
---	---	--

 NAIAD



Este proyecto ha recibido financiación del programa de Investigación e Innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea en virtud del acuerdo de subvención nº 79067