

# Estimación de los efectos del cambio climático en la recarga de los acuíferos de la Plana de La Galera y del aluvial del Ebro en Tortosa mediante modelos hidrológicos de balance de agua

B. Pisani Veiga<sup>(1)</sup>, F. J. Samper Calvete<sup>(1)</sup> y Yanmei Li<sup>(1, 2)</sup>

(1) Universidad de A Coruña. ETS de Ingenieros de Caminos C y P, Campus Elviña, CP 15192, A Coruña  
bpisani@udc.es  
jsamper@udc.es  
yanmeili@udc.es

(2) Departamento de Ingeniería de Minas, Metalurgia y Geología, Campus de Guanajuato, CP 36000, Universidad de Guanajuato, Guanajuato, GTO, México.

## RESUMEN

La creciente evidencia del cambio climático motiva la necesidad de cuantificar sus posibles efectos en los recursos hídricos. En este trabajo se presentan los resultados de la evaluación de los efectos del cambio climático en la recarga de los acuíferos de la Plana de La Galera y del aluvial del Ebro en Tortosa. Dicha evaluación se basa en las predicciones de temperatura,  $T$ , y precipitación,  $P$ , para los periodos 2020-2050 y 2069-2099 obtenidas con tres modelos climáticos del proyecto ENSEMBLES para el escenario de emisión A1B. Las predicciones de  $T$  y  $P$  a escala regional se han trasladado a la escala de las cuencas mediante un método de regresión estadística de reducción de escala. Los efectos de los cambios de  $T$  y  $P$  en los recursos hídricos se han evaluado con un modelo hidrológico de balance de agua resuelto con el programa VISUAL-BALAN. Los resultados de los modelos numéricos indican: 1) Un aumento de las temperaturas medias anuales; 2) Una disminución de las precipitaciones anuales que podría ir acompañada de un leve aumento de  $P$  en los inviernos; 3) Una intensificación de las condiciones de aridez; y 4) Una reducción de la recarga de los acuíferos de hasta un 30% a finales de siglo respecto a la recarga del periodo 1960-1990. Las previsiones tienen incertidumbres asociadas a los escenarios de emisión, los modelos de circulación, los métodos de reducción de escala, los modelos hidrológicos, y las hipótesis sobre los futuros usos del suelo, prácticas agrícolas y sistemas de riego. Estas incertidumbres se podrán reducir considerando las simulaciones de los modelos climáticos más recientes y utilizando técnicas de reducción de escala más contrastadas.

Palabras clave: cambio climático, hidrogeología, recarga, recursos hídricos, VISUAL-BALAN

## ***Assessment of the effects of climate change on groundwater recharge in the Galera Plain and Ebre alluvial aquifers in Spain by means of hydrological water balance models***

### ABSTRACT

*The increasing evidence related to climate change motivates the need to evaluate its impact on groundwater resources. Here we report the evaluation of the effects of climate change on the recharge of the Plana de La Galera and the Tortosa alluvial aquifers, near the Ebre Delta. Such evaluation is based on the predictions of temperature,  $T$ , and precipitation,  $P$ , of 3 climate models for the A1B emission scenario obtained within the ENSEMBLES project for the periods of 2020-2050 and 2069-2099. The regional predictions for  $T$  and  $P$  have been downscaled at the basin scale by means of statistical regression techniques. The effects of the changes in  $T$  and  $P$  on water resources have been evaluated with a hydrological water balance model solved with VISUAL-BALAN. Model results show: 1) an increase in mean annual  $T$ ; 2) a reduction of annual  $P$  with the possibility of a moderate increase in rainfall during winters; 3) an increase in arid conditions; and 4) a reduction of aquifer*

recharge of up to 30% compared with recharge in the period 1960-1990. Model predictions may be unreliable due to uncertainties in the definition of the scenarios, the predictions of regional climate models, the downscaling techniques, hydrological models and the hypotheses adopted for the future use of the soil, agricultural practices and irrigation systems. Such uncertainties could be reduced by considering the predictions of the most recent climate models and by improving the downscaling techniques.

**Key words:** climate change, hydrogeology, recharge, VISUAL-BALAN, water resources

## ABRIDGED ENGLISH VERSION

### Introduction and methods

Climate models predict an increase in temperature,  $T$ , and a decrease in precipitation,  $P$ , for the Mediterranean regions. These trends will decrease the available water resources and increase the water demand for crops (Stigter et al., 2012). Groundwater abstraction rates will increase and the aquifers will be subjected to stronger pressures (Eheart y Tornil, 1999; Goderniaux et al., 2009).

Groundwater resources play a major role in arid and semi-arid areas such as those of the Mediterranean region where water resources show a strong temporal and spatial variability (McCarthy et al., 2001; Green et al., 2007). Recent climate studies in Mediterranean Europe show trends of rising temperature and scarcer precipitation for the XXI Century (AEMet, 2009; Giorgi, 2006; Giorgi and Lionello, 2008). These trends will imply fewer water resources in the future. Therefore, the ability to accurately predict the effects of climate change in Mediterranean basins is urgently needed (Alley et al., 2002; Sophocleous, 2004; Allen et al., 2004).

Climate change related studies on groundwater in Mediterranean areas have not been abundant so far (Candela et al., 2009; Ortuño et al. 2009). Here we present the evaluation of the effects of climate change on the groundwater resources of the Plana de La Galera and the Tortosa alluvial aquifers. A hydrological model was developed for computing the water balance in the soil, the unsaturated zone and the aquifer. The model was solved with VISUAL-BALAN (Samper et al., 1999). The water balance and the groundwater recharge was computed for the historic control period 1960-1990 and for the prediction periods 2020-2050 and 2069-2099 using  $P$  and  $T$  data from the following 3 regional climate models (RCM) selected from the ENSEMBLES project (Van der Linden y Mitchell, 2009): CNRM-RM5.1, C4IRCA3 and ICTP-REGCM3.

The Plana de La Galera (Figure 1) is a graben filled with Mesozoic, Tertiary and Quaternary materials (Figure 2). The aquifer is a multi-layer system and its base is very deeply located (1000-1500 m). The uppermost layer of the aquifer includes foothills and alluvial fans of Quaternary materials with a thickness of 100-300 m. The lower layers constitute the karstic limestone Mesozoic aquifer which exhibits regional and local groundwater flow systems.

The Tortosa aquifer (Figure 1) is part of the Ebre River alluvial aquifer. The aquifer is made up of detritic Quaternary materials, mainly gravels, sands and mud-rock. Two layers can be identified: a recent alluvial layer (5-20 m) and an older layer (50-100 m), separated by a low permeability layer of silts.

The study area was divided into 11 homogeneous zones (Figure 3) based on the type and use of the soil (Bossard et al., 2000), the type of vegetation and the type of irrigation and the irrigation rate (CHE, 2004). The water balance equations are solved in each homogeneous zone independently.

The model parameters were calibrated by trial-and-error by fitting the computed hydraulic heads to measured water-table data from 1998 to 2008 at 8 wells and piezometers unaffected by groundwater pumping. The correctness of the fit was evaluated by the RMSE.

Table 1 shows the calibrated values of the main model parameters and the RMSE of the fit for 5 homogeneous zones which include all the crop types. Figure 4 shows the fit of the piezometric levels in two piezometers (Figure 3).

The predictions take into account the expected future changes in climate, but not changes in the use of soil or in the irrigation system or rate.

### Results and discussion

#### Temperature and precipitation

A significant increase in  $T$  is predicted for the simulation periods (Figure 5; Table 2). The mean annual  $T$  in the Plana de La Galera will increase 2 °C in 2020-2050 and 4 °C in 2069-2099. The  $T$  in the Tortosa alluvial plain will increase 1.5 and 3.5 °C, respectively. The potential evapotranspiration is also expected to increase due to the increase in  $T$ . The annual  $P$  will decrease (Figure 5; Table 2), even though  $P$  may increase moderately in the winter (Figure 6). The precipitation in the Plana de La Galera will decrease 2% in the period 2020-2050 and 6% in 2069-2099. The decrease in  $P$  in the Tortosa alluvial plain will be 4% in the first period and 6% in the second period. These changes will increase the climate aridity. However, relevant discrepancies among the predictions of the climate models of the ENSEMBLES Project should be taken into account (Table 2).

*The predicted increase in T will not be uniform throughout the year. The largest increase in T will occur in the autumns and summers for both simulation periods.*

*Figure 6 shows the expected changes in the mean monthly value of P for both aquifers and simulation periods. It is expected that the monthly P will decrease, especially in the springs. The dispersion in the predictions for other seasons is greater than that of the springs.*

### **Groundwater recharge**

*The future climate changes will lead to a decrease in groundwater recharge due to the increase in actual evapotranspiration (AET) and the decrease in P. Table 2 shows the expected changes of the mean annual values of P, T, AET and recharge.*

*The annual groundwater recharge is expected to decrease 23% in the Plana de La Galera and 22% in the Tortosa alluvial aquifer in the period 2020-2050. For the period 2069-2099 groundwater will decrease 27% in the Plana de La Galera aquifer and 31% in the Tortosa alluvial aquifer. Groundwater recharge will decrease throughout the year, even though some climate models predict an increase in P in the winters.*

*The greatest decrease in the recharge in the Plana de La Galera aquifer will occur in the autumns and springs. In the current conditions almost 40% of the recharge takes place in the autumn. The decrease of the recharge in the Tortosa alluvial aquifer will be more evenly distributed throughout the year.*

*Figure 6 shows the expected changes in the mean monthly values of P and the net groundwater recharge for the two simulation periods. The net groundwater recharge is assumed to be equal to the computed groundwater which includes irrigation return flows minus the groundwater pumping. The net recharge may be negative when the pumped volume exceeds the recharge.*

*The predictions of the effects of climate change on groundwater resources must be considered with caution because they contain important doubts due to uncertainties in the climate and hydrological models, the downscaling techniques and the hypotheses about the future use of the soil and the water. Although these predictions are by no means totally accurate, it is very likely that climate change will have important effects on groundwater resources and the ecosystems which depend on the groundwater springs. The results of this study show in general terms the possible changes which are expected in the Plana de La Galera and Tortosa alluvial aquifers.*

*The uncertainties related to the hydrological model can be reduced by improving the calibration in the homogeneous zones, especially in the zones where no piezometric data are available. The model can also be improved by taking into account groundwater pumping in the aquifer water balance. Future studies should consider possible changes in land use, crops and water demand. The irrigation channel between Cherta and Calig, which will allow an increase in the area irrigated with surface water, should also be taken into account.*

### **Introducción**

El desarrollo humano conlleva un aumento de las presiones sobre la biosfera, en particular sobre los recursos hídricos y los acuíferos. El cambio climático podría agravar todavía más dichas presiones provocando cambios en la disponibilidad y necesidades del agua tanto para el consumo humano como para el desarrollo animal y vegetal (Green *et al.*, 2007).

El previsible aumento de T y la disminución de P previstas para la mayor parte del área mediterránea provocarán una disminución de los recursos hídricos y un aumento de las necesidades de los cultivos de secano y de regadío (Stigter *et al.*, 2012). Como consecuencia se producirá una mayor demanda de agua subterránea y por lo tanto los acuíferos se podrían ver sometidos a una mayor presión (Eheart y Tornil, 1999; Goderniaux *et al.*, 2009).

El agua subterránea constituye un recurso esencial en regiones áridas y semiáridas como las mediterráneas que se caracterizan por una marcada variabili-

dad temporal y espacial en la disponibilidad de recursos hídricos (Mc Carthy *et al.*, 2001; Green *et al.*, 2007). Por ello, es muy importante evaluar los efectos del cambio climático en los recursos hídricos en estas regiones (Alley *et al.*, 2002; Sophocleous, 2004; Allen *et al.*, 2004).

El mantenimiento de las zonas húmedas de regiones costeras mediterráneas depende fundamentalmente del aporte de agua dulce de buena calidad y de la capacidad para impedir la intrusión marina (Custodio, 2000, 2001, 2005; Ranjan *et al.*, 2006). En particular, las zonas húmedas que dependen de las aguas subterráneas son especialmente vulnerables al descenso de los niveles piezométricos y a la disminución de las descargas de los manantiales que abastecen a sus ecosistemas (Candela *et al.*, 2009; Stigter *et al.*, 2012). El deterioro de la calidad de los retornos de los regadíos y la disminución de la recarga subterránea natural conllevan un aumento de la concentración de sales en los acuíferos, que dependiendo de los tiempos de tránsito, terminan llegando a las zonas húmedas.

La evaluación de los efectos del cambio climático se basa en postular posibles escenarios climáticos futuros que se obtienen mediante la combinación de un escenario de emisión de CO<sub>2</sub>, un Modelo de Circulación General (MCG) y un Modelo de Circulación Regional (MCR) (Xu y Singh, 2004; Stigter *et al.*, 2012). Los MCG resuelven las ecuaciones de la dinámica atmósfera-océano en todo el planeta utilizando entre otros datos de entrada las concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera. Trabajan con tamaños de malla muy grandes ( $\approx 10^2$  km) que dificultan su aplicación a escala local. Los MCR resuelven las ecuaciones de la dinámica atmosférica a escala regional con tamaños de malla del orden de 10<sup>1</sup> km y utilizan como condiciones de contorno los resultados de los MCG (Van der Linden y Mitchell, 2009; van Roosmalen *et al.*, 2010). A pesar de que la resolución espacial de los MCR es adecuada para muchos estudios, sus predicciones un siempre reproducen adecuadamente los datos medidos en las estaciones meteorológicas. Por ello, es necesario corregir las predicciones del MCR a escala local utilizando los parámetros deducidos para el periodo de control (Andréasson *et al.*, 2004). Otra posibilidad consiste en aplicar los cambios previstos por el MCR a las series de datos históricos (Kilsby *et al.*, 2007; Wood *et al.*, 2002). En todo este proceso se introducen incertidumbres que se deben tener en cuenta al analizar los resultados. Fowler *et al.* (2007) y Stoll *et al.* (2011) presentan una descripción de las técnicas más utilizadas para la reducción de escala de los resultados de los modelos climáticos regionales.

Los estudios climáticos realizados en la Europa mediterránea muestran una tendencia de aumento de las temperaturas y de disminución de las precipitaciones en el siglo XXI (AEMet, 2009; Giorgi, 2006; Giorgi y Lionello, 2008). Esta tendencia se traducirá en una disminución de los recursos hídricos. Candelà *et al.* (2009) y Ortuño *et al.* (2009) presentan evaluaciones de los efectos del cambio climático en la recarga de los acuíferos mediterráneos. La mayoría de estos trabajos se han centrado en el balance en las capas más superficiales del suelo y en la percolación subterránea (Green *et al.*, 2007, Bell *et al.*, 2007). En el marco del proyecto CLIMWAT se evaluaron los efectos del cambio climático en tres zonas costeras mediterráneas y sus ecosistemas asociados de Portugal, España y Marruecos (Stigter *et al.*, 2011; 2012; Pisani *et al.*, 2011). En España se seleccionaron española los acuíferos de la Plana de La Galera y del aluvial del Ebro en Tortosa.

En este artículo se presenta la evaluación de los efectos del cambio climático en los recursos hídricos de la Plana de La Galera y del aluvial del Ebro

en Tortosa. Se han considerado tres escenarios climáticos de los proyectos PRUDENCE (<http://prudence.dmi.dk>), ENSEMBLES (Van der Linden y Mitchell, 2009) y del 4º informe del IPCC (IPCC, 2007). Los efectos de los cambios hidroclimáticos en los recursos hídricos y en la recarga de los acuíferos se han con un modelo hidrológico de balance hídrico del agua en el suelo, la zona no saturada y el acuífero que se ha aplicado a zonas de cultivo de secano y de regadío. Siguiendo las recomendaciones de Holman (2012) se han realizado los cálculos para una amplia banda de predicciones. En primer lugar se presentan los principales rasgos de la zona de estudio. Después se describen los escenarios climáticos. A continuación se presenta el modelo de balance hídrico. Posteriormente se presentan los resultados haciendo hincapié en el análisis de las limitaciones e incertidumbres de las predicciones realizadas. El artículo termina con el resumen y las principales conclusiones.

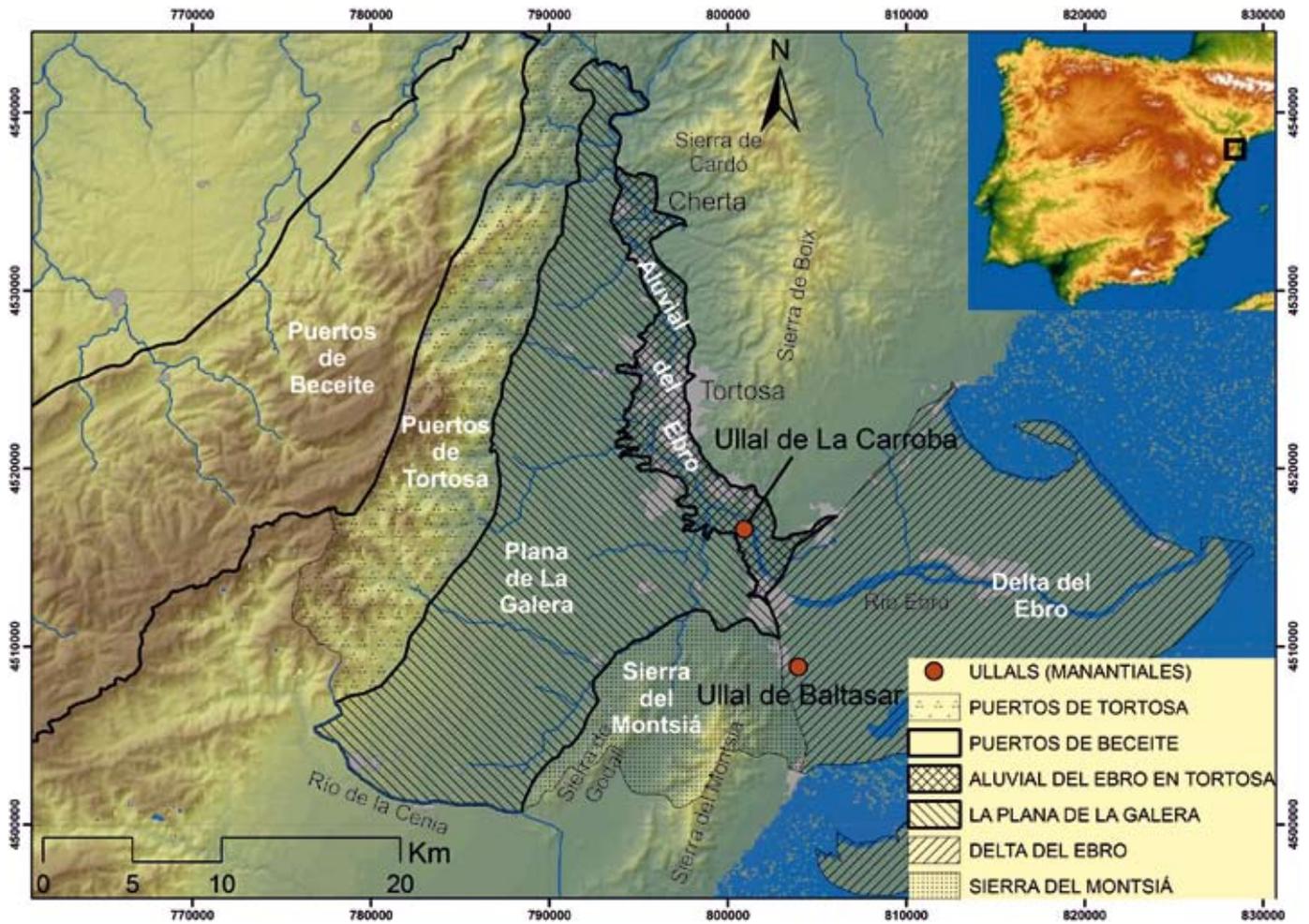
### Descripción de la zona de estudio

La Plana de La Galera tiene una extensión de 368 km<sup>2</sup> y está situada en la provincia de Tarragona. Está limitada por los Puertos de Tortosa y Beceite al oeste, las sierras de Montsiá y Godall al sureste y el río Ebro al noreste (Figura 1). Es una zona llana cuya altitud oscila entre el nivel del mar y 530 m s.n.m. El aluvial del Ebro en Tortosa (67 km<sup>2</sup>) se localiza al sur de la ciudad de Cherta, al oeste de las sierras de Boix y del Cardó y al este de la Plana de La Galera (Figura 1).

La Plana de La Galera es una fosa tectónica formada por materiales mesozoicos, terciarios y cuaternarios (Figura 2). El acuífero cuaternario de la Plana de La Galera está formado por conglomerados y gravas calcáreas. Por debajo de los materiales cuaternarios y terciarios se encuentran las calizas mesozoicas que conforman un acuífero regional cárstico multicapa que está confinado bajo el muro del cuaternario. El espesor del cuaternario es del orden de 100-300 m mientras que el espesor del acuífero regional es de 1000-1500 m (CHE, 1999).

La recarga del acuífero cuaternario se produce en toda la extensión del afloramiento. Recibe además el aporte subterráneo de los acuíferos de los Puertos de Tortosa y Beceite por el límite Oeste (Figura 1). Las principales zonas de recarga del acuífero regional se encuentran en las montañas de los Puertos de Tortosa.

La descarga de los acuíferos de la Plana de La Galera, tanto del cuaternario como del regional, se produ-



**Figura 1.** Situación de la zona de estudio y límites de los acuíferos de la Plana de La Galera y del aluvial del Ebro en Tortosa. Se indican también los acuíferos colindantes.

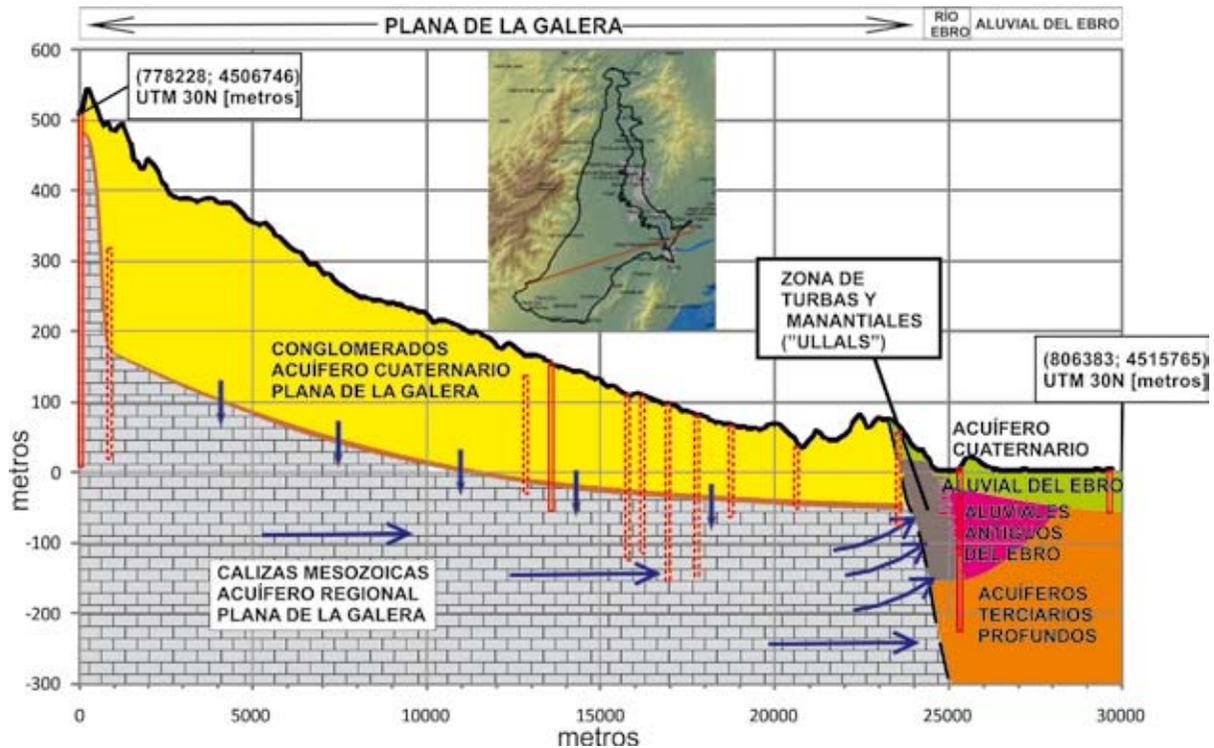
**Figure 1.** Location of the study zone and limits of the Plana de La Galera and Tortosa alluvial aquifers. Neighbouring aquifers are also indicated.

ce fundamentalmente de forma subterránea hacia el río Ebro y el acuífero calcáreo del Delta del Ebro hacia el este y en forma localizada en algunos manantiales en el límite occidental del delta. El acuífero regional cárstico también descarga en algunos tramos del río de la Cenia hacia el sur (Figura 1). En otros tramos, en los que el río de la Cenia discurre sobre calizas cretácicas, se produce el drenaje subterráneo y el río desaparece en sumideros cársticos.

El acuífero aluvial de Tortosa (Figura 1) está formado por las terrazas cuaternarias de los materiales detríticos más recientes (15 a 20 m de espesor) y de las gravas y arenas más antiguas (50 a 100 m de espesor; Figura 2). Ambos niveles están separados por un paquete de limos arenosos que confina al aluvial antiguo que incluye materiales de antiguos lechos del río Ebro. La recarga del aluvial de Tortosa se produce por infiltración de la lluvia, los retornos de riego y el flujo

subterráneo procedente del acuífero de la Plana de La Galera. El acuífero descarga en el río Ebro y hacia el delta del Ebro (CHE, 1999).

Los manantiales más importantes de la zona, o *ullals* –como se los conoce localmente– se localizan en el contacto entre las calizas mesozoicas de base y los sedimentos arcillosos y limosos de baja permeabilidad del delta. Esta configuración fuerza al agua subterránea a ascender y descargar en la superficie del terreno. Las descargas corresponden principalmente al acuífero de la Plana de La Galera y en menor grado a los acuíferos del aluvial del Ebro y del Montsià (Figuras 1 y 2). Los manantiales alimentan ecosistemas de especial importancia botánica y zoológica e incluyen el manantial de La Carroba (CHE, 1999) y los manantiales de Baltasar que se encuentran dentro del Parque Nacional del Delta del Ebro y forman parte del Convenio Ramsar.



**Figura 2.** Corte hidrogeológico de la Plana de La Galera y del aluvial de Tortosa, cuya traza se indica en la figura más pequeña. La línea negra punteada indica la falla regional que limita los acuíferos de la Plana de la Galera y del aluvial del Ebro. Las flechas azules indican las direcciones principales del flujo subterráneo. Los sondeos utilizados para elaborar el corte se indican en rojo. Se indican con línea continua los sondeos que se encuentran sobre la traza del corte y con línea punteada los que se han proyectado sobre traza estando a menos de 2.8 km. **Figure 2.** Hydrogeological cross section of Plana de La Galera and Tortosa alluvial aquifers (the trace of the cross section is indicated in the small map). The black dashed line indicates the fault which divides La Plana de La Galera and the Ebre aluvial aquifers. The blue arrows indicate the main directions of the groundwater flow. The boreholes which have been used to make the cross section are indicated in red, with continuous lines the boreholes located over the trace of the cross section and with dashed lines the remaining boreholes (which are not further than 2.8 km from the trace).

### Escenarios climáticos

Un escenario climático se define como la combinación de un escenario de emisión de CO<sub>2</sub>, un MCG y un MCR. En el presente estudio se seleccionaron las previsiones de P y T de 3 MCR del proyecto ENSEMBLES que tienen una resolución espacial adecuada (25x25 km<sup>2</sup>). y cuyas predicciones llegan hasta 2100 (Van der Linden y Mitchell, 2009). En el proyecto ENSEMBLES se analizó el escenario de emisión moderado A1B y se hicieron predicciones con un amplio abanico de modelos. Según el IPCC (2000), la línea evolutiva del escenario de emisión A1B de la siguiente manera: "...La línea evolutiva y familia de escenarios A1 describe un mundo futuro con un rápido crecimiento económico, una población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo y disminuye posteriormente, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Sus características distintivas más importantes son la convergencia entre regiones, la creación de capacidad y el aumento de las interacciones culturales y sociales... Los tres grupos A1 se diferen-

cian en su orientación tecnológica: utilización intensiva de combustibles de origen fósil (A1FI), utilización de fuentes de energía no de origen fósil (A1T), o utilización equilibrada de todo tipo de fuentes (A1B)".

Se han seleccionado los modelos climáticos regionales CNRM-RM5.1, C4IRCA3 y ICTP-REGCM33 del proyecto ENSEMBLES ya que presentan ventajas respecto a los restantes modelos del proyecto PRUDENCE y del 4º informe del IPCC. Por un lado consideran un escenario de emisión moderado (A1B). Además, tienen una buena resolución en sus cálculos (25x25 km<sup>2</sup>), un periodo de simulación que llega hasta 2100 y consideran una horquilla razonablemente amplia de predicciones.

Para establecer los criterios de comparación en la climatología y en la hidrología se fijó como periodo de referencia o de control el comprendido entre 1960 y 1990 para el que se dispone de datos históricos diarios de P y T en 18 estaciones en la zona de estudio. Se evaluaron los cambios previstos para mitad y fin del siglo, seleccionando para ello los periodos de 30 años comprendidos entre 2020 y 2050 y entre 2069 y 2099, respectivamente.

Las series mensuales de ENSEMBLES de P y T en el periodo de control 1960-1990 se redujeron de escala para cada zona homogénea del balance mediante regresión lineal. Para cada uno de los doce meses del año, se consideraron todos los datos mensuales de P y T entre 1960 y 1990 y se ordenaron en forma creciente. Se hizo lo mismo para los valores calculados por cada uno de los MCR de ENSEMBLES en ese mismo periodo. Se construyeron diagramas de percentiles del tipo QQ-Plot para cada mes del año, colocando en el eje de las abscisas los valores calculados por cada modelo y en el de las ordenadas los datos históricos. Se calcularon así los coeficientes de las regresiones lineales correspondientes a cada mes del año que se utilizaron posteriormente para la reducción de escala de las predicciones mensuales de ENSEMBLES para los periodos 2020-2050 y 2069-2099 (Zhang *et al.*, 2010).

Las series diarias para esos periodos se generaron a partir de las series mensuales reducidas de escala con el código GEN-BALAN (Álvares y Samper, 2009; Álvares, 2010) utilizando los métodos propuestos por Zhang (2005).

### Modelo de balance hídrico

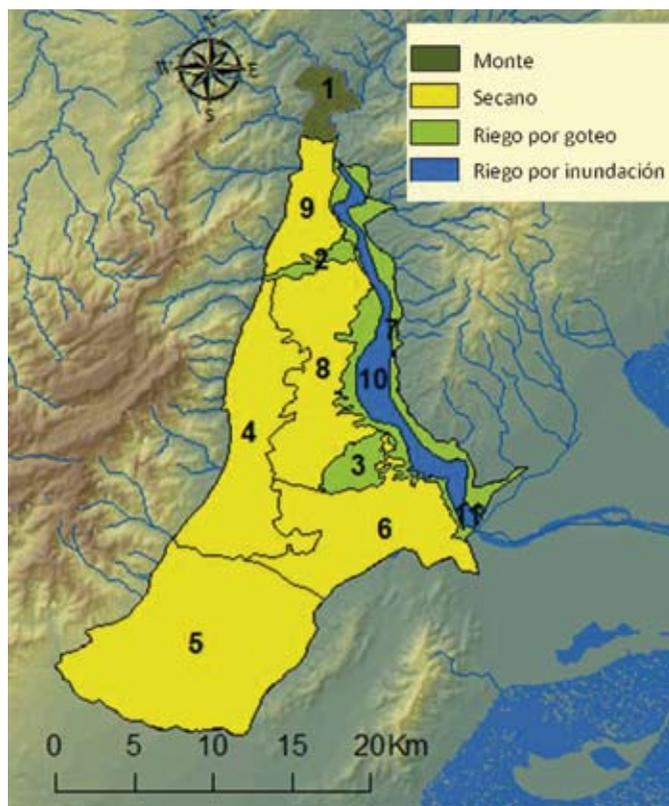
El modelo de balance hídrico de la Plana de La Galera y del aluvial del Ebro en Tortosa se realizó con el código

VISUAL-BALAN (Samper *et al.*, 1999). Este código resuelve diariamente el balance de agua en el suelo edáfico, la zona no saturada y el acuífero, utilizando como datos de entrada los datos diarios de P y T. Las componentes del balance se resuelven secuencialmente comenzando con las del suelo edáfico y finalizando con las del acuífero.

Los principales parámetros del modelo son: 1) El espesor del suelo, la reserva útil, la conductividad hidráulica, las capacidades de infiltración (mínima y máxima), y los coeficientes de la evapotranspiración (correspondientes al suelo); 2) Los coeficientes de agotamiento del flujo hipodérmico y de la percolación para el flujo en la zona no saturada; y 3) Los coeficientes de agotamiento y almacenamiento, la transmisividad y el número de celdas en que se divide el acuífero.

El modelo conceptual de VISUAL-BALAN es de tipo agregado. El código resuelve los balances hídricos de forma independiente en cada zona homogénea de parámetros. Para este estudio se delimitaron 11 zonas homogéneas de parámetros teniendo en cuenta los usos del suelo, el tipo de cobertura vegetal y los regadíos (Bos-sard *et al.*, 2000; CHE, 2004). Las superficies de las zonas homogéneas oscilan entre 9 y 124.5 km<sup>2</sup> (Figura 3).

Los parámetros del modelo se calibraron por tanteos sucesivos con datos de niveles piezométricos medidos entre 1998 y 2008 en 6 piezómetros del acuí-



**Figura 3.** Zonas homogéneas del modelo hidrológico de balance hídrico definidas en función de los siguientes usos del suelo: monte, cultivos en secano, cultivos con riego por goteo y cultivos con riego por gravedad.

**Figure 3.** Homogeneous zones of the hydrological water balance model defined according to the following different uses of the soil: woods, non-irrigated crops, drip-irrigated crops and flood-irrigated crops.

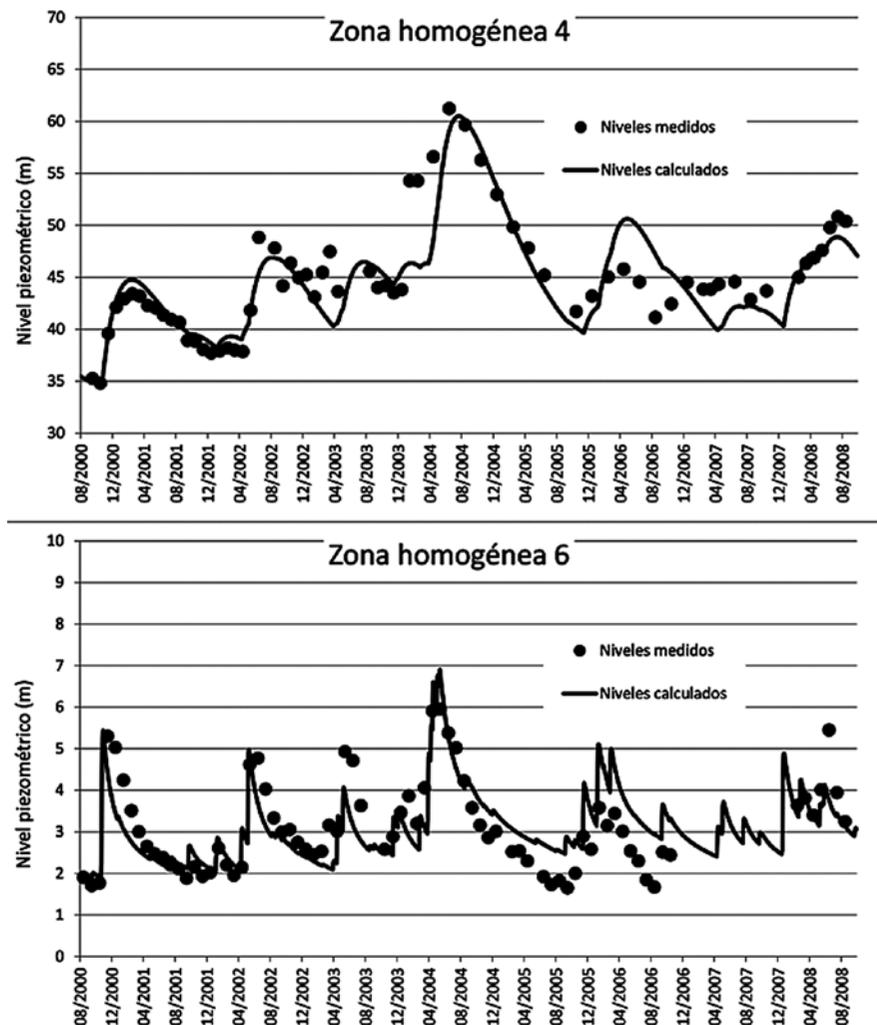
fero de la Plana de La Galera y 2 del aluvial de Tortosa. Los piezómetros escogidos no están muy afectados por bombeos. La bondad del ajuste se evaluó visualmente y mediante de la raíz del error cuadrático medio, RMSE (*root mean square error*).

La Tabla 1 presenta los valores calibrados de los principales parámetros del modelo. Samper *et al.* (1999) presentan para una descripción completa de los parámetros. La Figura 4 muestra el ajuste de los niveles calculados a los medidos en dos de los piezómetros utilizados para la calibración que están situados en las zonas homogéneas 4 y 6 (Figura 3). El mejor ajuste de niveles se obtuvo en las zonas de secano (zonas 4, 5, 6, 8 y 9). El ajuste fue peor en la zona 10 de regadío por gravedad o inundación. Los parámetros del balance en la zona 1 (ocupada por bosques) y en la 11 (arrozales regados por gravedad) no se calibraron ya que no se dispone de datos piezométricos. Los valores de los parámetros en dichas zonas son muy similares a los de las zonas vecinas. En la Tabla 1 se

presentan los valores de RMSE del ajuste de niveles en 5 zonas homogéneas. También se muestran los valores normalizados,  $RMSE/(h_{max}-h_{min})$ , donde  $h_{max}$  and  $h_{min}$  son los niveles medidos máximo y mínimo, respectivamente. Los usos del suelo y tipos de regadío de las 5 zonas homogéneas seleccionadas abarcan todas las variedades de la cuenca.

El modelo de balance hídrico tiene en cuenta los aportes de agua de los regadíos, pero no considera los bombeos ni las recargas laterales procedentes de acuíferos vecinos en la ecuación del balance del acuífero. Samper *et al.* (2011) presentan un modelo numérico de flujo subterráneo en elementos finitos que tiene en cuenta los bombeos y las conexiones con otros acuíferos y que utiliza como entrada la recarga calculada con VISUAL-BALAN.

Se realizaron pasadas del modelo hidrológico en el periodo de control 1960-1990 y en cada uno de los escenarios de cambio climático seleccionados para los periodos 2020-2050 y 2069-2099. Estos escenarios



**Figura 4.** Niveles piezométricos calculados y medidos en dos piezómetros situados en las zonas homogéneas 4 y 6, respectivamente (Figura 3).  
**Figure 4.** Measured and computed piezometric heads in two wells located in homogeneous zones 4 and 6, respectively (Figure 3).

Zona	Parámetros calibrados mediante datos de niveles				
	1	4	6	7	10
piezométricos	No	Sí	Sí	Sí	Sí
RMSE (m)	-	2.66	0.71	0.70	1.22
RMSE/( $h_{max}-h_{min}$ ) (*)	-	0.10	0.16	0.18	0.41
Uso del suelo	Monte	Olivares en seco	Mosaico de cultivos en seco	Frutales regados por goteo	Frutales regados por inundación
Dotación de riego (mm/año)	0	0	0	500	1000
Área (km <sup>2</sup> )	11.428	67.048	53.534	38.004	27.384
<b>Suelo</b>					
Reserva útil (mm)	175	87.5	100	100	100
Conductividad hidráulica vertical (mm/d)	86.4	86.4	86.4	86.4	86.4
<b>Intercepción</b>	Horton	Horton	Horton	Horton	Horton
Tipo de cubierta	Pinares	Huertos	Alfalfa, veza y pastos	Huertos	Huertos
Altura de la planta (m)	-	-	0.4	-	-
Factor de capacidad de almacenamiento	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Factor del coeficiente de intercepción	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
<b>Recarga en tránsito diferida</b>					
<b>Flujo preferente</b>					
CKRD	Método convencional	Método convencional	Método convencional	Método convencional	Método convencional
FRD	Fisuras	Fisuras	Fisuras	Fisuras	Fisuras
ETP	0.4	0.3	0.4	0.4	0.7
ETR	0.4	0.3	0.3	0.3	0.5
	Thornthwaite	Thornthwaite	Thornthwaite	Blanney-Cridle	Blanney-Cridle
	Penman-Grindley	Penman-Grindley modificado	Penman-Grindley modificado	Penman-Grindley modificado	Penman-Grindley
CRPG (mm)	87.5	60	75	10	50
CEPG	0.6	0.75	0.75	0.4	0.5
<b>Escorrentía</b>	Horton	Horton	Horton	Horton	Horton
Capacidad mínima de infiltración (mm/d)	50	45	45	50	27
Capacidad máxima de infiltración (mm/d)	60	60	60	60	33
<b>Zona no saturada</b>					
Método	Explicito	Explicito	Explicito	Explicito	Explicito
Coefficiente de agotamiento del flujo hipodérmico (d <sup>-1</sup> )	0	0	0	0	0
Conductividad hidráulica vertical (mm d <sup>-1</sup> )	86.4	0.1	0.1	0.1	0.1
Coefficiente de agotamiento de la percolación (d <sup>-1</sup> )	0.5	0.02	0.5	0.5	0.5
<b>Acuífero</b>					
Método	Multicelda	Multicelda	Multicelda	Multicelda	Multicelda
Número de celdas	5	5	5	5	5
Transmisividad (m <sup>2</sup> d <sup>-1</sup> )	500	250	700	625	625
Coefficiente de almacenamiento	0.03	0.0094	0.03	0.13	0.13
Nivel de referencia (m)	0.5	30.1	0.17	0	0
Longitud del acuífero (m)	2000	4500	7400	2000	1000

**Tabla 1.** Valores de los parámetros del balance en 5 zonas homogéneas del modelo que cubren los distintos tipos de usos del suelo, cultivos y métodos de riego. Los valores de los parámetros han sido calibrados en todas las zonas excepto las zonas 1 y 11. (\*  $h_{max}$  and  $h_{min}$  son los niveles medidos máximo y mínimo, respectivamente)

**Table 1.** Parameter values in 5 homogeneous zones of the model representative of the different land uses, crop types and irrigation methods. The parameters have been calibrated in all the zones except zones 1 and 11. (\*  $h_{max}$  and  $h_{min}$  are the maximum and minimum values of the piezometric level, respectively)

consideran los resultados de los siguientes tres modelos MCR: CNRM-RM5.1, C4IRCA3 y ICTP-REGCM3 (Pisani *et al.*, 2011).

Las series diarias de P y T obtenidas mediante la reducción de escala de las predicciones de los MCR se utilizaron como datos de entrada del modelo de balance hídrico para calcular los recursos y la recarga subterránea en los periodos de predicción. Las predicciones realizadas para los distintos escenarios de cambio climático tienen en cuenta los cambios en el clima, suponiendo que los usos del suelo y los regadíos son similares a los actuales. Por lo tanto, las predicciones suponen que las dotaciones de riego con aguas subterráneas y superficiales son idénticas a las del periodo histórico.

## Resultados y discusión

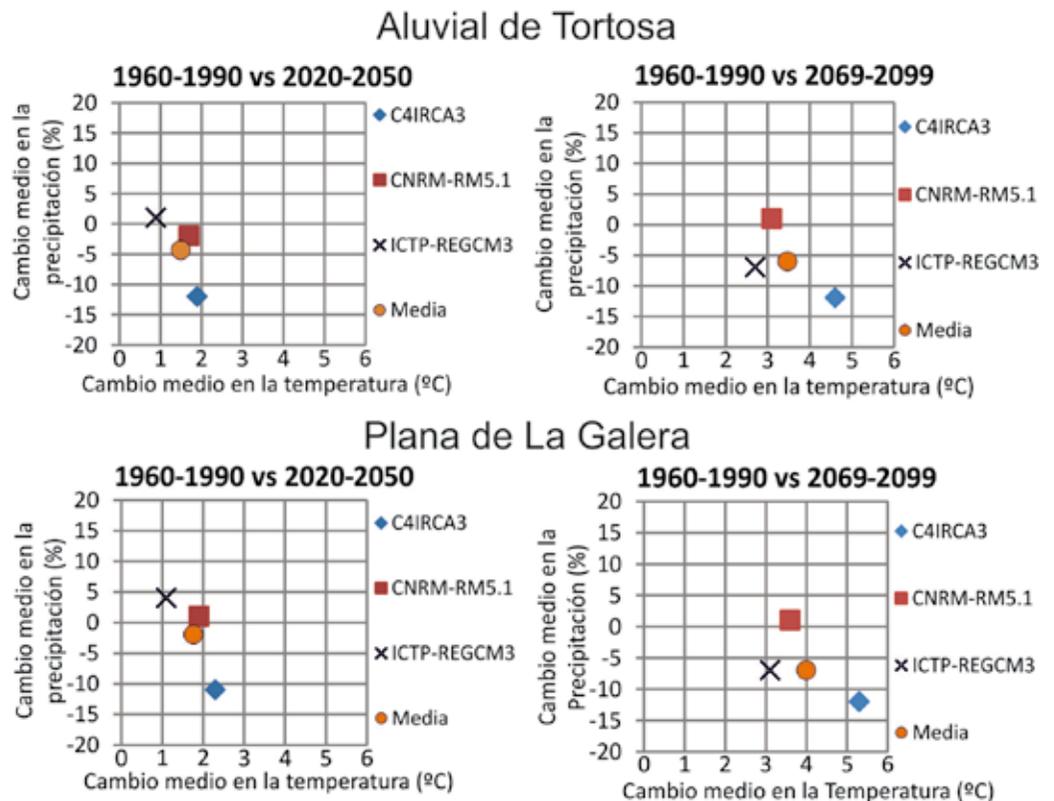
### Temperatura y precipitación

Para los periodos de simulación se prevé un aumento importante de T (Figura 5 y Tabla 2) que en la Plana de La Galera será de 2 °C en el periodo 2020-2050 y de 4 °C en el periodo 2069-2099. En el aluvial del Ebro los aumentos de T serán de 1.5 y 3.5 °C, respectivamente. Se prevé un aumento de la evapotranspiración potencial en toda la zona de estudio. La P media

anual disminuirá, aunque en los meses de invierno podría aumentar moderadamente. La P media anual disminuirá un 2% en el periodo 2020-2050 y un 6% en el periodo 2069-2099 en la Plana de La Galera, mientras que en el aluvial de Tortosa disminuirá un 4% en el primer periodo y un 6% en el periodo 2069-2099. Estos cambios producirán un aumento de la aridez del clima. Se debe tener en cuenta, sin embargo, que hay considerables discrepancias entre los resultados de los distintos modelos climáticos de ENSEMBLES. La discrepancia es mayor para P (Figura 5 y Tabla 2). Por ejemplo, algunos modelos predicen un aumento de P en los inviernos de 2069-2099 en la Plana de La Galera mientras que otros predicen una disminución del 17%.

Los cambios de T no son uniformes a lo largo del año. Se esperan aumentos de T mayores en verano y otoño que en el resto del año en las zonas de ambos acuíferos y para ambos periodos de simulación.

La Figura 6 muestra los cambios previstos para las precipitaciones medias mensuales en los dos acuíferos para los periodos de referencia y simulación. Tanto en la Plana de La Galera como en el aluvial de Tortosa se prevén disminuciones de P para los periodos 2020-2050 y 2069-2099 que se producirán principalmente en la primavera. En las restantes estaciones las predicciones presentan más dispersión (Tabla 2).



**Figura 5.** Cambios previstos en la temperatura media y precipitación anual en el aluvial de Tortosa y en la Plana de La Galera para los 3 modelos climáticos seleccionados.

**Figure 5.** Projected changes of mean annual temperature and precipitation in the Ebre alluvial and La Plana de La Galera aquifers for the 3 selected scenarios.

**Recarga**

Los cambios en P y T producirán una disminución importante en la recarga de los acuíferos debida tanto al aumento de la evapotranspiración real (ETR), producida por el aumento de T, como a la disminución de P. La recarga disminuirá siguiendo la tendencia de las precipitaciones. Además, el aumento de la ETR provocará un aumento en las necesidades de los cultivos y una disminución de la recarga. La Tabla 2 muestra los cambios previstos en P, T, ETR y recarga. La Figura 6 muestra los cambios previstos en las medias men-

suales de P y de la recarga neta entre el periodo de referencia (control) y los dos periodos de previsión. La recarga subterránea neta se calcula como la diferencia entre el volumen de la recarga calculada con el modelo de balance (que incluye los retornos del regadío) y el volumen bombeado del acuífero que coincide aproximadamente con el volumen utilizado para el regadío en la Plana de La Galera y en las zonas más altas del aluvial de Tortosa. Hay que tener en cuenta que la recarga neta puede tomar valores negativos en los meses en los que el volumen bombeado es mayor que la recarga.

Variable	Acuífero	Periodo de control 1960-1990	2020-2050	2069-2099
Precipitación (mm/a)	<i>Aluvial de Tortosa</i>	592	568 (522 - 601)	555 (519 - 596)
	Plana de La Galera	636	626 (573 - 658)	598 (562 - 641)
Temperatura (°C)	<i>Aluvial de Tortosa</i>	17.1	18.6 (18.0 - 19.1)	20.6 (19.8 - 21.7)
	Plana de La Galera	17.2	19.1 (18.4 - 19.7)	21.3 (20.3 - 22.6)
ETR	<i>Aluvial de Tortosa</i>	880	933 (925 - 942)	946 (922 - 965)
	Plana de La Galera	444	476 (450 - 493)	456 (420 - 484)
Dotación	<i>Aluvial de Tortosa</i> <sup>(1)</sup>	728	728	728
	<i>Plana de La Galera</i> <sup>(2)</sup>	49	49	49
Recarga total al acuífero <sup>(3)</sup> (mm/a)	<i>Aluvial de Tortosa</i>	324	253 (217 - 293)	225 (183 - 249)
	Plana de La Galera	149	114 (100 - 123)	109 (101 - 117)
Recarga neta <sup>(4)</sup> (mm/a)	<i>Aluvial de Tortosa</i>	40	-31 (-67 a +9)	-59 (-101 a -35)
	Plana de La Galera	100	65 (51 - 74)	60 (52 - 68)

<sup>(1)</sup> Incluye 444 mm de agua importada desde fuera de la subcuenca

<sup>(2)</sup> Agua bombeada en la propia subcuenca

<sup>(3)</sup> Incluye los retornos del riego

<sup>(4)</sup> La recarga neta se calcula como la diferencia entre la recarga calculada con el modelo de balance y el volumen bombeado del acuífero

**Tabla 2.** Valores medios anuales de la precipitación, temperatura, ETR y recarga subterránea para el periodo de referencia y los de simulación. En cada periodo se presenta la media y el rango de dispersión de los escenarios

**Table 2.** Mean yearly values of precipitation, temperature, actual evapotranspiration and aquifer recharge in the control and simulation periods. Dispersion ranges and mean values are also presented for each scenario

La recarga disminuirá un 23% en la Plana de La Galera y un 22% en el aluvial de Tortosa en el periodo 2020-2050. En el periodo 2069-2099 se prevén disminuciones de 27% y 31%, respectivamente. La dispersión de las predicciones de P entre los diferentes escenarios conduce a que exista también dispersión en las predicciones de la recarga. Sin embargo, salvo en un escenario, se prevén disminuciones de la recarga en las 4 estaciones del año, independientemente de que algunos escenarios prevean pequeños incrementos estacionales de P. La excepción es el escenario construido con el modelo C4IRCA3 que prevé en la Plana de La Galera un aumento de la recarga en el invierno para el periodo 2069-2099.

Las mayores disminuciones en la recarga en la Plana de La Galera se esperan en primavera y otoño. Mientras que en las primaveras la recarga disminuirá gradualmente a lo largo del siglo, en los otoños la mayor disminución de la recarga se producirá entre el periodo de control y el periodo 2020-2050, fundamentalmente debido a la evolución prevista de P. Se debe tener en cuenta que en esta zona la mayor parte de la recarga se produce en el otoño (aproximadamente un 40% de la recarga anual) mientras que la recarga del invierno es un 27% de la total.

En el aluvial de Tortosa se prevé una disminución de la recarga uniforme en todas las estaciones del año. La mayor parte de la superficie de este acuífero está ocupada por cultivos de regadío en los que la recarga se produce fundamentalmente por los retornos del

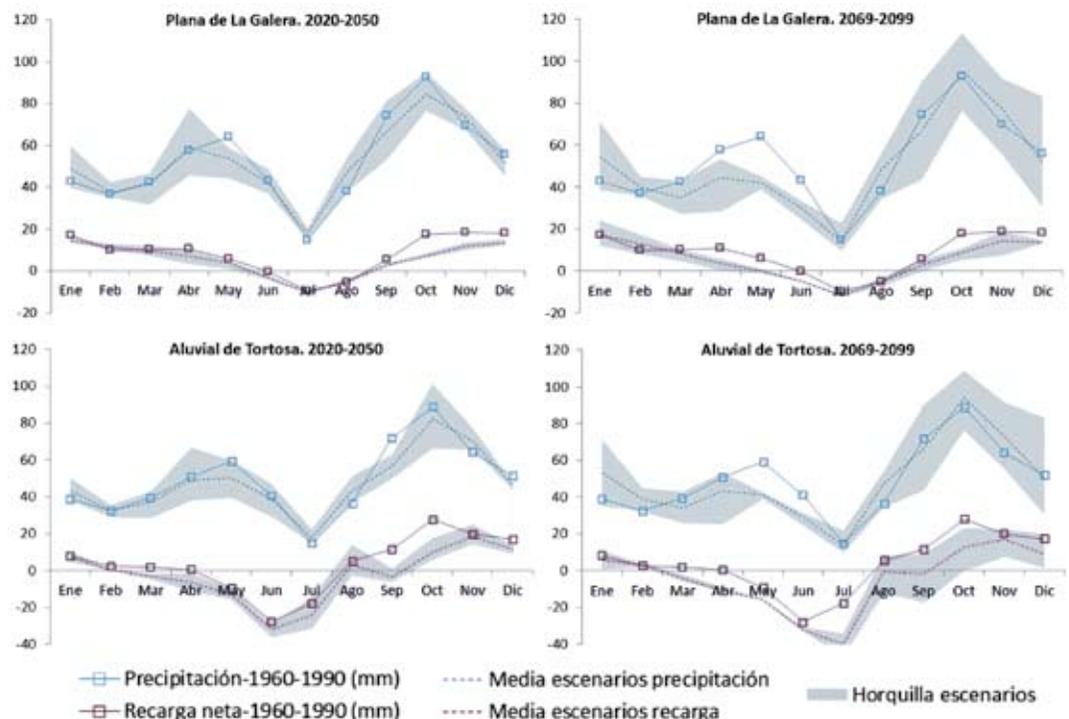
regadío. De hecho, la mayor parte (51%) de la recarga anual se produce en el verano.

Los predicciones difieren significativamente de unas zonas homogéneas a otras, dependiendo de si se riega o no. La disminución de la recarga al acuífero coincide prácticamente con la disminución de P en las zonas en secano. Sin embargo, en las zonas regadas la disminución de la recarga es mayor que la disminución de la P debido al aumento en las necesidades de los cultivos.

Las predicciones muestran cambios en la variabilidad interanual de la recarga. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el método utilizado en este estudio para la reducción de escala de las precipitaciones de los MCR basado en una regresión lineal produce una reducción de la varianza en las predicciones. Dicha reducción es tanto mayor cuanto menor es el coeficiente  $R^2$  de la recta de regresión. Por lo tanto, la reducción de la variabilidad interanual de la recarga que se ha obtenido se debe al procedimiento utilizado para la reducción de escala y no permite analizar de forma correcta las frecuencias esperadas de las sequías.

### Resumen y conclusiones

Se ha presentado la evaluación de los efectos del cambio climático en el balance hídrico de la Plana de La Galera y el aluvial del Ebro en Tortosa utilizando las predicciones de tres modelos climáticos del proyecto



**Figura 6.** Precipitación y recarga neta media mensual (mm/año) para el periodo de control y los de simulación. Se muestra el rango de dispersión entre los 3 escenarios.

**Figure 6.** Mean monthly precipitation and net aquifer recharge (mm/year) during control and simulation periods. The dispersion range between the 3 scenarios is also shown.

ENSEMBLES. Las predicciones indican un aumento de las  $T$  medias anuales y estacionales. En la Plana de La Galera la temperatura media anual aumentará  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  en el periodo 2020-2050 y  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  en el periodo 2069-2099. En el aluvial del Ebro los aumentos serán de  $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , respectivamente. Los aumentos de  $T$  serán mayores en los meses de verano y otoño. El aumento de temperatura producirá un aumento de la evapotranspiración potencial y de las necesidades hídricas de los cultivos en la zona de estudio.

Las predicciones de  $P$  de los distintos modelos muestran más dispersión que las predicciones de  $T$  y apuntan a una disminución de las  $P$  anuales que varían entre un 2% (periodo 2020-2050) y un 6% (periodo 2069-2099) en la Plana de La Galera. En el aluvial de Tortosa las  $P$  anuales disminuciones entre 4 y 6%, respectivamente. Los resultados de los modelos presentan disparidades en las predicciones de variación de la  $P$  estacional. Estos cambios indican un aumento de la aridez del clima.

Los resultados de los modelos hidrológicos para los periodos de simulación indican que la recarga media anual disminuirá un 23% en el periodo 2020-2050 y un 27% en el periodo 2069-2099 en la Plana de La Galera. En el aluvial de Tortosa las disminuciones previstas son del 22% (2020-2050) y 31% (2069-2099).

Los resultados de los efectos del cambio climático se deben interpretar con cautela ya que contienen incertidumbres debidas a: 1) Las incertidumbres de los modelos climáticos; 2) Las limitaciones de los métodos de reducción de escala; 3) Las hipótesis sobre el mantenimiento de los usos del agua y del suelo en el periodo de predicción; y 4) Las incertidumbres del modelo de balance hídrico. Las incertidumbres de los modelos climáticos se irán reduciendo conforme se vayan perfeccionando los modelos climáticos. Otro aspecto mejorable es la técnica para reducir las series de  $P$  de los MCR a la escala de la cuenca. La regresión lineal no ha permitido el estudio de la variabilidad interanual debido a la reducción de la varianza en las predicciones de  $P$ . Las incertidumbres del modelo hidrológico de balance se podrían reducir mejorando la calibración del modelo en las distintas zonas homogéneas, utilizando para ello datos adicionales de niveles piezométricos. El modelo se podría mejorar también considerando los bombeos en el balance en el acuífero. En futuros trabajos se deberán considerar otras hipótesis sobre posibles cambios futuros en los usos del suelo, los cultivos y las demandas de agua. También se deberá considerar la entrada en funcionamiento del canal de regadío entre Cherta y Calig, que permitirá regar con aguas superficiales zonas que hasta ahora se riegan con aguas subterráneas.

Es muy probable que el cambio climático tenga efectos importantes en los recursos subterráneos y en los ecosistemas dependientes de los manantiales. Sin embargo, las predicciones de los modelos se deben tomar con cautela. A pesar de sus incertidumbres, los resultados de este estudio muestran en términos generales los posibles cambios que se pueden esperar en la Plana de la Galera y en el aluvial de Tortosa. Se constata que los usos del suelo y las prácticas agrícolas pueden influir notablemente en los efectos del cambio climático en los recursos hídricos.

### Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado en el marco del Proyecto CLIMWAT del Programa CIRCLE-MED del espacio europeo de investigación ERA-NET. La parte española del proyecto se ha realizado con financiación de un proyecto de la Xunta de Galicia (Ref. 08MDS016118PR). Se agradece muy especialmente a la Agència Catalana de l'Aigua, especialmente a Carlos Loaso, por su contribución al proyecto, proporcionando información, aportando medios y destinando tiempo para las visitas de campo. También se agradece la colaboración prestada por la Confederación Hidrográfica del Ebro por facilitar la información utilizada en el estudio. Finalmente, se agradece la colaboración prestada por Emilio Custodio de la UPC y las contribuciones de los participantes en el proyecto CLIMWAT, en especial a Luis Ribeiro y Tibor Stigter coordinadores del proyecto. Se agradecen los comentarios y sugerencias de dos revisores anónimos que han contribuido a mejorar el artículo.

### Referencias

- AEMet. 2009. Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España. Agencia Estatal de Meteorología, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Madrid, España.
- Allen, D.M., Mackie, D.C. and Wei, M. 2004. Groundwater and climate change: a sensitivity analysis for the Grand Forks aquifer, southern British Columbia, Canada. *Hydrogeology Journal* 12, 270–290.
- Alley, W.M., Healey, R.W., LaBaugh, J.W. and Reilly, T.E. 2002. Flow and storage in groundwater systems. *Science* 296:1985–1990.
- Álvares, D. 2010. Acoplamiento de modelos hidrológicos semidistribuidos y GIS: Aplicación a la evaluación de los efectos del cambio climático. Tesis Doctoral. Universidad de Coruña.
- Álvares, D. and Samper, J. 2009. Evaluación de los recursos hídricos de la cuenca hidrográfica del Ebro mediante GIS-

- BALAN. En: *IX Jornadas de Zona no Saturada, ZNS'09*, Barcelona. Vol IX, 491-498.
- Andréasson, J., Bergström, S., Carlsson, B., Graham, L.P. and Lindström, G. 2004. Hydrological change–climate change impact simulation for Sweden. *Ambio*, 33 (4–5), 228–234.
- Bell, V.A., Kay, A.L., Jones, R.G. and Moore, R.J. 2007. Development of a high resolution grid-based river flow model for use with regional climate model output. *Hydrology and Earth System Sciences* 11:532–549.
- Bossard, M., Feranec, J. and Otahel, J. 2000. Corine Land Cover technical guide – Addendum 2000. EEA Technical Report 40.
- Candela, L., von Igel, W., Elorza, F.J. and Aronica, G. 2009. Impact assessment of combined climate and management scenarios on groundwater resources and associated wetland (Majorca, Spain). *Journal of Hydrology* 376 (3-4), 510-527.
- CHE (Confederación Hidrográfica del Ebro). 1999. Delimitación de unidades hidrogeológicas de la cuenca del Ebro (Plan Hidrológico). INTECSA (Consultor). Informe inédito. Zaragoza. [http://oph.chebro.es/documentacion/DelimitacionUnidadesHidrogeologicas /DelimitacionUnHidro.html](http://oph.chebro.es/documentacion/DelimitacionUnidadesHidrogeologicas/DelimitacionUnHidro.html) (último acceso abril de 2013).
- CHE, 2004. Mapas de cultivos y regadíos: <http://oph.chebro.es/ContenidoCartoRegadios.htm> (último acceso abril 2013).
- Custodio, E. 2000. Groundwater-dependent wetlands. *Acta Geologica Hungarica*, 43-2:173-202.
- Custodio, E. 2001. Aguas subterráneas y humedales. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, Asociación Española de Hidrología Subterránea, 24, 3-30.
- Custodio, E. 2005. Aspectos hidrológicos de los humedales que dependen del agua subterránea. En: *1ª Reunión Internacional de Expertos sobre la Regeneración Hídrica de Doñana*.
- Eheart, J.W. and Tornil, D.W. 1999. Low-flow frequency exacerbation by irrigation withdrawal in the agricultural Midwest under various climate change scenarios. *Water Resources Research* 35(7), 2237–2246.
- Fowler, H.J., Blenkinsop, S. and Tebaldib, C. 2007. Linking climate change to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology* 27: 1547–1578.
- Giorgi, F. 2006. Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters* 33, L08707.
- Giorgi, F. and Lionello, P. 2008. Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change*, 63 (2–3), 90–104.
- Goderniaux, P., Brouyère, S., Fowler, H.J., Blenkinsop, S., Therrien, R., Urban, Ph. and Dassargues, A. 2009. Large scale surface – subsurface hydrological model to assess climate change impacts on groundwater reserves. *Journal of Hydrology*, 373, 122–138.
- Green, T.R., Taniguchi, M. and Kooi, H. 2007. Potential impacts of climate change and human activity on subsurface water resources. *Vadose Zone Journal*, 6, 531–532.
- Holman, I. P., Allen, D. M., Cuthbert, M. O. and Goderniaux, P. 2012. Towards best practice for assessing the impacts of climate change on groundwater. *Hydrogeology Journal*, 20, 1–4.
- IPCC. 2000. Resumen para responsables de políticas. Escenarios de emisiones. Informe especial del Grupo de Trabajo III del IPCC. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Organización de Naciones Unidas. <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-sp.pdf> (último acceso abril 2013).
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.
- Kilsby, C.G., Tellier, S.S., Fowler, H.J. and Howels, T.R. 2007. Hydrological impacts of climate change on the Tejo and Guadiana Rivers. *Hydrology and Earth Systems Sciences*, 11 (3), 1175-1189.
- McCarthy, J.J., Canziani, O.F., Leary, N.A., Dokken, D.J. and White, K.S. 2001. Climate change 2001, impacts, adaptation, and vulnerability. Contribución del Grupo de Trabajo II al Tercer Informe de Evaluación del IPCC. [http://www.grida.no/climate/ipcc\\_tar/wg2/index.htm](http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg2/index.htm) (ultimo acceso enero 2012).
- Ortuño, F., Jódar, J. and Carrera, J. 2009. Cambio climático y recarga de acuíferos en Catalunya. En: *Agua y Cambio Climático. Diagnóstico de los impactos previstos en Cataluña*. Agència Catalana de l'Aigua. [http://aca-web.gencat.cat/aca/documents/es/publicacions/impactes\\_hidrologics/capitol11\\_lowress.pdf](http://aca-web.gencat.cat/aca/documents/es/publicacions/impactes_hidrologics/capitol11_lowress.pdf) (último acceso abril 2013).
- Pisani, B., Samper, J., Ribeiro, L., Fakir, Y. and Stigter, T. 2011. Evaluación de los impactos del cambio climático en el acuífero de la Plana de la Galera. En: *Jornadas de Zona no Saturada ZNS 2011*. Vol X, 353-358.
- Ranjan, P., Kazama, S. and Sawamoto, M. 2006. Effects of climate change on coastal fresh groundwater resources. *Global Environmental Change*, 16 (4), 388-399.
- Samper, J., Huguet, L., Ares, J. and García Vera, M.A. 1999. Manual del usuario del programa VISUAL BALAN v1.0: código interactivo para la realización de balances hidrológicos y la estimación de la recarga. ENRESA 05/99. Madrid. 134 pp.
- Samper, J., Li, Y., Pisani, B., Ribeiro, L., Fakir, Y. and Stigter, T. 2011. Evaluación de los impactos del cambio climático en los acuíferos de la Plana de la Galera y del aluvial de Tortosa. En: *X Jornadas de Estudios en la Zona No Saturada, ZNS'11*. Salamanca. Vol X, 359-364.
- Sophocleous, M. 2004. Climate Change: Why Should Water Professionals Care? *Ground Water* 42: 5.
- Stigter, T., Ribeiro, L., Samper, J., Fakir, Y., Tavares, P., Silva, A., Hugman, R., Shapouri, M., Pisani, B., Li, Y., Monteiro, J.P., Fonseca, L., Nunes, J.P., Oliveira, R., Tomé, S., El Mandour, A., Yacoubi-Khebiza, M. and El Himer, H. 2011. CLIMWAT: Assessing and managing the impact of climate change on coastal groundwater resources and dependent ecosystems. En: *Proceedings of the CIRCLE-MED final conference*. Aix-en-Provence, Francia. [http://www.circle-med.net/doc/FinConf\\_Climwat.pdf](http://www.circle-med.net/doc/FinConf_Climwat.pdf) (último acceso abril 2013).
- Stigter, T.Y., Nunes, J.P., Pisani, B., Fakir, Y., Hugman, R., Li, Y., Tomé, S., Ribeiro, L., Samper, J., Oliveira, R., Monteiro, J.P., Silva, A., Tavares, P.C.F., Shapouri, M., Cancela da Fonseca, L. and El Himer, H. 2012. Comparative assessment of climate change impacts on coastal ground-

- water resources and dependent ecosystems in the Mediterranean. *Regional Environmental Change*. Publicado online: DOI 10.1007/s10113-012-0377-3.
- Stoll, S., Hendricks Franssen, H.J., Butts, M. and Kinzelbach, W. 2011. Analysis of the impact of climate change on groundwater related hydrological fluxes: a multi-model approach including different downscaling methods. *Hydrology and Earth Systems Sciences*, 15, 21–38.
- Van Der Linden, P. and Mitchell, J.F.B. 2009. ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, Exeter, UK.
- Van Roosmalen, L., Christensen, J., Butts, M.B., Jensen, K.H. and Refsgaard, J. 2010. An intercomparison of regional climate model data for hydrological impact studies in Denmark. *Journal of Hydrology*, 380 (3–4), 406-419.
- Wood, A.W., Maurer, E.P., Kumar, A. and Lettenmaier, D.P. 2002. Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States. *Journal of Geophysical Research*, 107, 4429-4444.
- Xu, C-Y, and Singh, V.P. 2004. Review on Regional Water Resources Assessment Models under Stationary and Changing Climate. *Water Resources Management*, 18, 591–612.
- Zhang, X.C. 2005. Spatial downscaling of global climate model output for site-specific assessment of crop production and soil erosion. *Agricultural and Forest Meteorology*, 135, 215-229.
- Zhang, Y., Nearing, M., Zhang, X., Xie, Y. and Wei, H. 2010. Projected rainfall erosivity changes under climate change from multimodel and multiscenario projections in Northeast China. *Journal of Hydrology*, 384, 97–106.

Recibido: abril 2013

Revisado: abril 2013

Aceptado: mayo 2013

Publicado: octubre 2013