

## EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y USOS DEL SUELO SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LA CUENCA DEL RÍO TORDERA (BARCELONA, ESPAÑA)

### ASSESSMENT OF WATER RESOURCES UNDER CLIMATE AND LAND-USE CHANGES THE TORDERA BASIN (NE SPAIN)

Candela, Lucila<sup>1</sup>; Tamoh, Karim<sup>1</sup>; Olivares, Gonzalo<sup>2</sup>; Gomez, Manuel<sup>2</sup>; Valdes-Abellan, Javier<sup>3</sup>

#### Resumen

Se presentan los efectos del cambio global en la cuenca del río Tordera (España) para el periodo 2000-2050, escenarios climáticos A2 (medio-alto) definidos por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, 200) y escenarios socioeconómicos (cambios previstos en la cuenca) denominados estable y tendencial. Los efectos sobre los recursos hídricos se han analizado de forma conjunta superficial-subterránea mediante una metodología de tipo acoplado. Para establecer los impactos futuros sobre los recursos hídricos se ha seleccionado el Modelo de Circulación Global ECHAM5 (Max Planck Institute). Los resultados obtenidos indican una disminución de la precipitación del 11.3% y un aumento de la temperatura de 1°C, respecto a los valores históricos de la zona. De acuerdo a la proyección futura (2050) sobre cambios en los recursos hídricos, la escorrentía superficial obtenida mediante simulación con el código HEC-HMS 3.4 experimenta una reducción del 31.8% respecto al valor histórico y la recarga natural, estimada mediante VISUAL-Balan, se reduce en un 11.7%. El balance en el acuífero deltaico simulado mediante MODFLOW 2009.1 Pro muestra igualmente una disminución de los parámetros del balance. Los cambios del uso del suelo previstos de acuerdo a la legislación vigente (escenarios socioeconómicos) no conducen a la generación de un impacto apreciable en los recursos hídricos; según los escenarios definidos la variación de precipitación y temperatura son los parámetros fundamentales del cambio previsto.

**Palabras clave:** Recursos hídricos, cambio climático, escenario A2, Tordera

#### Abstract

Climate change impact on water resources (flow and groundwater changes) based on the downscaled outputs of a General Circulation model-GCM has been investigated in the Tordera catchment (Northwestern part of the Mediterranean area, Spain) for the year 2050. The objective of this paper is to apply a linked methodological approach to investigate the impacts of climate change on a Mediterranean hydrological system by taking into account effects on surface water and groundwater recharge. The methodological approach has been applied in the Tordera basin (NE Spain), which constitutes a good example of a coupled stream/aquifer hydrologic system. Obtained results estimate a maximum decrease of 11.3% in precipitation, an increase of 1 °C of temperature and decrease of 31.8% and 11.7% on runoff and groundwater recharge respectively with respect to the historical values for 2050. Results of groundwater balance of the quaternary aquifer show a decrease of 12% of storage with respect to the historical period while a slight increase of river recharge and seawater intrusion is produced. Land use changes do not show an important contribution on future water resources changes. According to results, most important parameters conditioning future water resources are changes in temperature and precipitation.

The outputs and experience gained in this research can contribute to prepare to cope with forecasted global change impacts on water resources in similar catchments. The conclusions are, to some extent, subject to uncertainties; the level of confidence in regional projections derived directly from GCMs for precipitation is more uncertain than those for temperature.

**Key words:** Water resources, climate change, A2 scenario, Tordera

#### 1. INTRODUCCIÓN

Según los resultados procedentes de los modelos acoplados atmósfera-océano (GCM), para el horizonte 2100 en el área mediterránea se prevé un descenso de la precipitación del 10% y un aumento de la temperatura media, especialmente en el periodo estival, de 1°C (A1B storyline, IPCC, 2001). Las proyecciones indican un aumento de la probabilidad de sequías y de los episodios extremos (Kerr, 2005;

Narrant & Douguédroit, 2006). Estos cambios pueden derivar en impactos importantes en los recursos hídricos como se puede observar en el gran número de artículos publicados desde finales de los años 70 (Kundzewicz & Somlyódy, 1997; Grieneisen & Zhang, 2011; Febrillet et al., 2014), entre los que cabe citar los relacionados con el ciclo hidrológico (Burns et al., 2007; Candela et al., 2012b; Hagg et al., 2007; Ruth

<sup>1</sup> Dpto. de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geodésica. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España (lucila.candela@upc.edu)

<sup>2</sup> Instituto de Investigación FLUMEN. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España.

<sup>3</sup> Dpto. de Ingeniería Civil. Universidad de Alicante. Alicante, España.

& Coelho, 2007; Werritty, 2002); aguas subterráneas (Allen et al., 2004; Brouyère et al., 2004; Green et al., 2011; Hsu et al., 2007), recarga (Bouraoui et al., 1999), cambios en la cubierta vegetal (Candela et al., 2012a; Cuo et al., 2011; Falloon & Betts, 2010) y afección a ecosistemas (Candela et al., 2009).

En general, el enfoque presentado se basa en el análisis de impactos en los recursos hídricos superficiales o subterráneos evaluados independientemente, sin embargo no existen muchas aportaciones a nivel integrado (ACCUA, 2011; Scibek et al., 2007; Serrat-Capdevila et al., 2007). Pese a ello, los efectos del cambio climático sobre los recursos hídricos superficiales y subterráneos a nivel de cuenca deben analizarse de manera conjunta. La elaboración de un modelo hidrológico conjunto que analice los aspectos de hidrología superficial y recarga subterránea constituye una alternativa de gran interés para la evaluación de los impactos en los recursos hídricos futuros.

El objetivo principal de esta investigación se centró en estimar la aportación y variabilidad de los recursos hídricos superficiales y recarga subterránea en la cuenca del río Tordera (NE España) para el escenario climático A2 (severo) definido en el IPCC y periodo 2000-2050. La elección de la cuenca se realizó basada en la disponibilidad de información meteorológica, usos del suelo y datos de caudales superficiales; y en la previsión de futuros cambios de las demandas hídricas y la existencia de transferencias relevantes entre aguas superficiales y subterráneas en dicha cuenca.

### 1.1. La cuenca del río Tordera

La cuenca del río Tordera se extiende sobre una superficie de 876 km<sup>2</sup> desde el macizo del Montseny hasta su desembocadura en el mar Mediterráneo (figura 1). Con un clima típicamente mediterráneo, la precipitación media anual en la cuenca es de 707 mm, con valores de 767 mm en la cabecera y de 573 mm en la costa (periodo histórico 19842008). La precipitación presenta una marcada variación estacional donde los meses de Octubre y Abril concentran el 80% de la precipitación total anual; el verano es extremadamente seco y los episodios extremos suelen tener lugar en otoño. La temperatura media anual es 15.4°C y oscila entre máximas de 30°C en verano y mínimas de -6°C en invierno. La evapotranspiración potencial es 811 mm. Con un uso de suelo predominantemente forestal y agrícola, donde las zonas urbanas no superan el 6% de la superficie total, la cuenca presenta una elevada demanda hídrica y una marcada estacionalidad tanto de los recursos como de las demandas.

Desde el punto de vista geológico, la cuenca se enmarca en la unidad estructural de los Catalánides, constituida en este sector por un zócalo paleozoico (granitos, materiales pizarrosos, grauvacas y

cuarcitas) fuertemente plegado y con presencia magmática. Como consecuencia de la orogenia alpina, que deformó y fracturó los materiales del zócalo, se generó un graben relleno de materiales de origen detrítico continental (arcillas, conglomerados, arenas) por el que fluye el curso medio y bajo del río Tordera.

En los materiales cuaternarios se definen dos unidades: depósitos de piedemonte formados por fragmentos muy heterométricos, de textura gruesa y muy meteorizados, y terrazas fluviales. Se distinguen dos terrazas, una superior constituida por una formación roja de cantos con matriz arcillosa y que constituye un conjunto poco permeable de 1 a 5 m de grosor; y otra inferior, formada por los aluviones recientes del río Tordera, depositados en el cauce actual y el lecho de inundación; esta terraza inferior está compuesta por arenas y gravas que pueden alcanzar un espesor de 35m.

La red hidrográfica, caracterizada por el cauce principal del río Tordera y sus principales afluentes (Gualba, Arbúcies, Santa Coloma, Valmanya y Sant Pere) algunos de ellos efímeros. Presenta cotas superiores a 1700 m de altura y en su desembocadura en el mar se desarrolla un delta aluvial de 21 km<sup>2</sup> aproximadamente. La respuesta hidrológica de la cuenca está condicionada por una larga estación seca y una húmeda corta; la respuesta de la cuenca a importantes lluvias puede ser incluso inexistente o dar origen a escasa escorrentía. Para el periodo considerado la aportación media es de 170 hm<sup>3</sup>.

Desde el punto de vista hidrogeológico y de acuerdo a las directivas europeas Directivas europeas, se han caracterizado 5 masas de agua subterránea que afloran total o parcialmente en el ámbito del estudio (ACA, 2005), una de ellas constituye el delta del río. El delta del río Tordera es un acuífero bicapa formado por un acuífero libre que se extiende por toda la llanura deltaica, y otro semiconfinado separado del primero por niveles de arcillas y limos poco permeables. El acuitardo intermedio que separa ambos acuíferos desaparece en los márgenes, favoreciendo la conexión hidráulica entre los dos niveles acuíferos. La explotación del acuífero deltáico es para abastecimiento y regadío agrícola. Actualmente el cultivo mayoritario es de tipo hortícola, con importante dotación de riego en verano. Para una mayor información sobre la cuenca estudiada se remite al lector al informe de la Agència Catalana de l'Aigua (ACA, 2005).

## 2. METODOLOGÍA

La metodología aplicada para determinar los impactos producidos por el cambio climático sobre los recursos hídricos consiste en el uso de diversos métodos de forma escalonada. Los modelos numéricos calibrados y validados han sido las herramientas fundamentales para la generación de

escenarios futuros. El periodo base de comparación elegido fue 1984-2008. La múltiple combinación de: modelo climático, periodo temporal, escenarios climáticos, escenarios socio-económicos y métodos de estimación hidrológica tiene como resultado 6 escenarios futuros de recursos hídricos.

El proceso seguido ha sido:

- Estimación de la escorrentía, recarga subterránea y balance en el acuífero mediante modelación numérica para el periodo histórico (1984-2008). Los códigos utilizados fueron HEC-HMS 3.4 (Scharffenberg & Fleming, 2009), Visual BALAN 2.0 (Samper et al., 2005) y Visual MODFLOW 2009.1 Pro (McDonald & Harbaugh, 1988).
- Estimación de los recursos hídricos futuros (superficiales y subterráneos) para el escenario A2 y periodos 2000-2025 y 2025-2050 a partir de los modelos calibrados y validados anteriormente. Los datos climáticos se escalaron a partir del modelo ECHAM5 ([www.mpimet.mpg.de/en/wissenschaft/modelle/echam/echam5.html](http://www.mpimet.mpg.de/en/wissenschaft/modelle/echam/echam5.html), Max Planck).
- Estimación de los recursos hídricos futuros bajo escenarios sostenible y tendencial de cambios de usos del suelo y según los escenarios climáticos y periodo temporal definido.

## 2.1. Datos

Para el estudio del periodo histórico (1984–2008) se utilizaron los datos meteorológicos diarios de precipitación y temperatura de cinco estaciones climáticas existentes en la zona, que fueron proporcionados por la Agencia Española de Meteorología (AEMET). Una vez completadas las series se realizaron tests de homogeneidad (Nzewi, 2001) de los datos disponibles. La distribución espacial de la precipitación se calculó mediante polígonos de Thiessen.

En el estudio hidrológico, los datos correspondientes a seis estaciones de aforo (fig. 1) proporcionados por la Agència Catalana de l'Aigua fueron analizados. Los registros disponibles, se extienden a lo largo de todo el periodo de estudio, con alguna excepción debido a razones técnicas.

Los mapas de uso del suelo, para el periodo histórico y escenarios futuros, se han realizado con el modelo LCM (Land Change Modeller) mediante el programa IDRISI Taiga. Fueron proporcionados por el Institut de Recerca i Tecnologia Agraria-IRTA ([www.irta.cat/en-US/Pages/default.aspx](http://www.irta.cat/en-US/Pages/default.aspx)) y el European Topic Centre for Spatial Information and Analysis (ETC/LUSI, <http://terrestrial.eionet.europa.eu/Consortium/UAB>). Los parámetros físicos del suelo (contenido en arcilla y limo, grupo hidrológico) para realizar el balance, se obtuvieron a partir de la clasificación internacional

de los grupos hidrológicos de suelos definida en los mapas de suelos. Los cambios futuros de usos del suelo y cubierta vegetal se basaron en los datos procedentes del Pla Territorial General de Catalunya (GOV/157/2010), que define la planificación para el horizonte 2030 como adaptación al cambio global (escenario sostenible) y escenario tendencial (sin adaptación). Se estimó que la incertidumbre asociada a extrapolar estos datos a escenarios más lejanos era demasiado elevada, dada la ausencia de planes urbanísticos de usos del suelo más allá del año 2030.

Las unidades acuíferas existentes y sus propiedades hidrogeológicas están basadas en el mapa hidrogeológico de la zona (ICC, 1992) y la definición del ACA (2005). Se debe destacar dado que la superficie de afloramiento de los acuíferos en la zona estudiada no se corresponde exactamente con la extensión de la cuenca superficial para realizar un balance de aguas subterráneas, se optó por determinar la recarga subterránea en la cuenca.

Los datos para el cálculo del balance en el acuífero deltaico proceden del modelo numérico elaborado por el ACA y basado en el código MODFLOW (ACA, 2009).

La gestión de los datos espaciales se llevó a cabo mediante un SIG basado en ArcGIS 9.2 (ESRI®). La superficie topográfica de trabajo se basó en un MDT a escala 10 x 10 m proporcionado por ETC/LUSI.

## 2.2. Modelación numérica

### 2.2.1. Lluvia-Escorrentía

El análisis del régimen de escorrentía y su modelación numérica se efectuó en dos fases. En una primera se desarrolló un modelo de caja negra lluvia-escorrentía basado en el método del Numero de Curva para una subcuenca de 124.25 km<sup>2</sup> de extensión (ACCUA, 2011) situada en el extremo oeste de la cuenca (Sant Celoni). El modelo que considera precipitación diaria y caudal (no mostrado en este trabajo), se definió con el objetivo de seleccionar datos y parámetros para posteriormente introducirlas en un modelo hidrológico distribuido con base física. En una segunda fase para simular los procesos lluvia-escorrentía en lluvias de corta y larga duración se aplicó el modelo espacialmente distribuido HEC-HMS 3.4. El código se seleccionó en función de su fácil aplicación, la adaptabilidad a esta investigación y sus objetivos, y el uso en numerosas aplicaciones similares (Candela et al., 2012b; Chu & Steinman, 2009).

La cuenca del Tordera se subdividió en 9 subcuencas de similares características topográficas, usos del suelo y cobertura vegetal y tipo de suelo, entre otros rasgos fisiográficos. El modelo basado en un formato malla (celdas de 1000 x 1000 m para precipitación y de 30 x 30 m para los procesos lluvia/caudal) y

su gestión con SIG mediante la herramienta HEC-GeoHMS 5.0 (Fleming & Doan, 2010), permite a partir de un MDT la elaboración de datos de pendientes, cauces principales y sub-división de cuencas, entre otros datos hidrológicos. La condición de contorno (input) fue la precipitación observada y la condición inicial para la resolución de las ecuaciones de flujo se definió a partir del estado inicial de humedad de la cuenca. Las salidas principales del modelo (output) están constituidas por los caudales y todos los procesos hidrológicos originados en la cuenca

(ET, caudal base, transmisión entre capas del suelo, caudales laterales, etc.). En términos de cálculo el modelo comienza la simulación con los parámetros representativos del estado inicial del sistema (input) para la parametrización del modelo en 4 capas o niveles. La calibración se realizó para el periodo enero 1984-Julio 1987 y la validación para Julio 2005-Septiembre 2006 (datos correspondientes a la estación de aforos de Can Serra, fig. 1). Los parámetros utilizados para el modelo se muestran en la tabla 1.

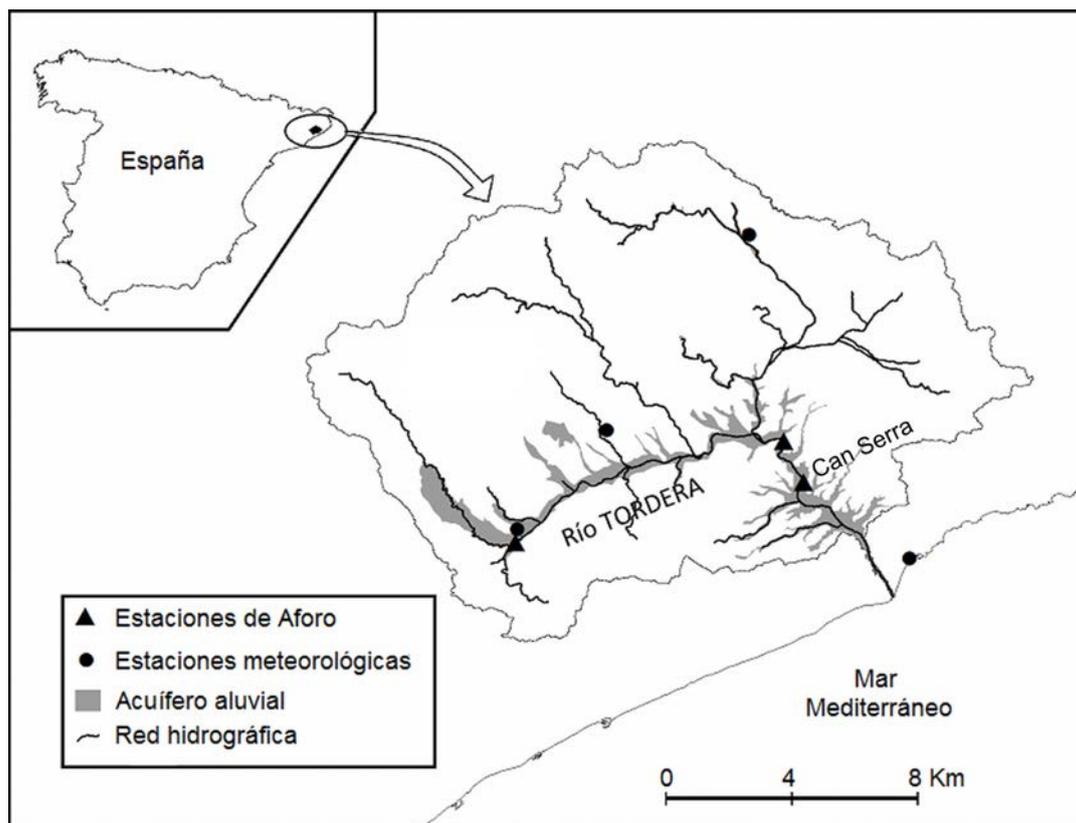


Figura 1. Situación de la zona de estudio

Tabla 1. Valores característicos de la cuenca empleados en la simulación del modelo hidrológico

Parámetro	
Cobertera vegetal (%)	1
Superficie (%)	1
Suelo (%)	1
Almacenamiento en cobertera vegetal (mm)	2
Almacenamiento en superficie (mm)	28
Infiltración máxima (mm/h)	25
Almacenamiento en suelo (mm)	200
Almacenamiento zona de tensión del suelo (mm)	193

La verificación de los datos simulados respecto a las observaciones se realizó mediante inspección visual y estadísticos (Legates & McCabe, 1999).

En la verificación se aplicó el Nash-Sutcliffe Model Efficiency Index (EF), y el coeficiente de determinación  $R^2$ .

Las predicciones futuras se obtuvieron mediante la ejecución del modelo calibrado y validado con datos meteorológicos procedentes del escalado de ECHAM5.

### 2.2.2. Aguas subterráneas. Recarga y modelación numérica

La obtención de la recarga natural se efectuó mediante el código Visual BALAN 2.0. Para la modelación del flujo del acuífero cuaternario se partió del modelo en régimen transitorio calibrado y validado del ACA (ACA, 2009), basado en el código Visual Modflow 3.0.

La recarga subterránea, basada en el método del balance del agua en el suelo, se obtuvo con Visual BALAN 2.0. El modelo distribuido calcula el balance diario de agua en el suelo y en la zona no saturada de acuerdo a: evaluación de la recarga natural por precipitación y retorno de riego para el periodo histórico (1984-2008); análisis de contraste de los resultados obtenidos en base a los datos de aforo de la estación Can Serra (fig. 1) calibrados y validados mediante HEC-HMS; y finalmente estimación de la recarga futura a partir del modelo calibrado y con nuevos vectores de cambio (temperatura y precipitación según escenarios simulados por el ECHAM5, evapotranspiración y usos del suelo). El código proporciona como resultado del cálculo los valores de la escorrentía superficial para el periodo modelado, dato utilizado para realizar un análisis de contraste con los datos de aforo medidos en la estación de Can Serra (1984-2008). Esta aproximación se aplicó debido a la inexistencia de observaciones piezométricas de calidad para calibrar y validar el modelo.

Las masas de agua subterráneas corresponden a las definidas por el ACA (ACA, 2005). La distribución de usos del suelo y parámetros aplicados en Visual BALAN se obtuvieron del mapa hidrogeológico a escala 1:250.000 (ICC, 1992) y del mapa de usos del suelo. La evapotranspiración real (ETR) se estimó mediante el método de Blaney-Criddle; los valores diarios de la evapotranspiración potencial (ETP) proceden del IRTA. La generación de escenarios futuros de usos del suelo se basó en información existente respecto a tendencias socioeconómicas esperables a nivel sostenible y tendencial. Para ambos casos el cambio de usos del suelo urbano es inferior al 1% respecto al histórico.

El área modelada del acuífero cuaternario se extiende desde la cabecera del río hasta su desembocadura en el mar (fig. 1) y con una superficie de 56 km<sup>2</sup> de extensión para el acuífero superficial y 18 km<sup>2</sup> para el profundo. El modelo está constituido por 4 capas: la capa 1 corresponde al acuífero superficial y se extiende sobre toda la zona modelada, la capa 2 es el acuitardo (cuña limosa), y las capas 3 y 4 el acuífero profundo, que al presentar diversas propiedades hidráulicas y extensión se han subdividido. Ambos

acuíferos (1 y 3) se encuentran en contacto hacia la zona media del valle donde reciben la recarga de origen superficial. El nivel acuífero 4 no aflora al encontrarse en la zona final del delta. La malla superpuesta está formada por 60 filas y 362 columnas de 100m x 100m. En el modelo, el cálculo de la recarga natural por la lluvia y retorno de riego para el periodo 1984-2008 (histórico) se ha realizado a partir de los datos de las estaciones meteorológicas de Blanes y Breda. Los datos correspondientes a extracciones por pozos (abastecimiento urbano, regadío, industrial), nivel piezométrico, así como los pozos de recarga artificial existentes proceden del informe del ACA. Para una información más detallada se remite al lector al informe ACA (2009).

Por lo que respecta al modelo conceptual, geometría de las capas y parámetros hidráulicos del acuífero cuaternario son los correspondientes al modelo original ACA (2009). Se han realizado dos simulaciones en la unidad acuífera con el modelo descrito: respuesta del sistema en las condiciones históricas (modelo base proporcionado por el ACA ejecutado para el periodo histórico 1984-2008) y respuesta producida en los diversos términos del balance bajo el escenario climático A2 (2000-2050). La simulación no considera una actualización de la demanda futura; para el escenario simulado se supone que el caudal de los pozos de extracción y de recarga se mantiene en el nivel histórico.

## 2.3. Cambio climático, proyecciones utilizadas

Las series diarias de precipitación y temperatura futuras se generaron a partir del Modelo de Circulación General-GCM ECHAM5 (Roeckner et al., 2003) que permite cuantificar variables y simular su comportamiento a partir de las emisiones futuras de gases de efecto invernadero (escenarios) a una escala de 50x50 km. El ECHAM5 proporciona resultados para el A2 en los horizontes temporales 2013-2037; 2038-2062 y 2068-2092. Se seleccionó el A2 (cambio severo) definido por el IPCC (2001) para el periodo 2000-2050.

### 2.3.1. Series climáticas y generación de escenarios. Escalado

Los resultados derivados de las proyecciones de los modelos globales no son adecuados para evaluar los efectos del cambio climático a nivel regional o local. Por ello, y para que las simulaciones sean representativas a la escala de trabajo es necesario el escalado (downscaling) de los datos procedentes de los modelos globales (Bourouai et al., 1999; Hewitson & Crane, 1996).

Las series generadas constituyen los datos previos de entrada para los modelos de simulación aplicados en esta metodología. Las series futuras de precipitación se generaron mediante cadenas de Markov y la distribución de Weibull; para la temperatura se aplicaron modelos ARMA (Bourouai et al., 1999).

La metodología utilizada genera 200 series de 50 años de longitud para cada estación meteorológica y escenario climático seleccionado. Dada la dificultad de realizar tal número de simulaciones, se seleccionó una única serie representativa del clima futuro en cada estación meteorológica de acuerdo a criterios estadísticos. Para una descripción detallada de la metodología aplicada se remite al lector a Candela et al., (2009).

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Periodo histórico

Los resultados de la calibración y validación del modelo superficial mediante HEC-HMS 3.4., se muestran en la figura 2. La mayoría de los picos han sido reproducidos correctamente por el modelo, y la diferencia entre simulado y observado (entre el 5 y el 1,5%, rango de error aceptable según Majidi y Shahedi, 2012) se puede atribuir a diferencias en la distribución espacial de la precipitación, dado el limitado número de estaciones disponibles.

La aportación media en la cuenca es de 152 hm<sup>3</sup>, con un mínimo de 27 hm<sup>3</sup> y un máximo de 212 hm<sup>3</sup> para el periodo considerado.

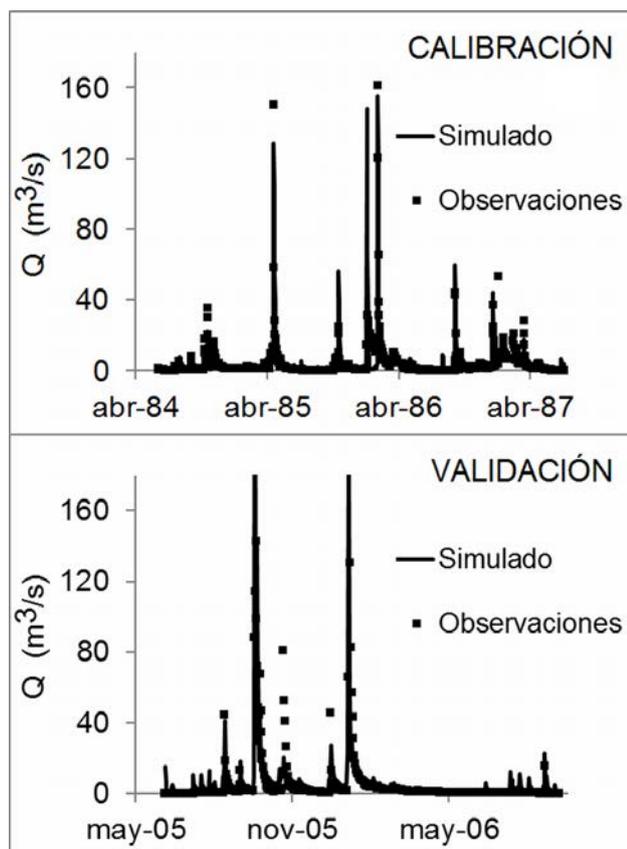


Figura 2. Resultados de la calibración y validación del modelo hidrológico. Periodo histórico

Por lo que respecta a la recarga subterránea a nivel de cuenca (fig. 3), el valor medio anual es

de 37.8 hm<sup>3</sup>, como consecuencia de que gran parte de la cuenca está compuesta por materiales impermeables (fundamentalmente rocas graníticas) que impiden una mayor recarga profunda. La recarga es mayoritariamente de tipo hipodérmico; se observan valores inferiores a la media histórica a partir del año 2006. La importancia de la recarga subterránea es más destacable en la zona norte de la cuenca, posiblemente por la contribución forestal y la mayor presencia de cultivos (26%).

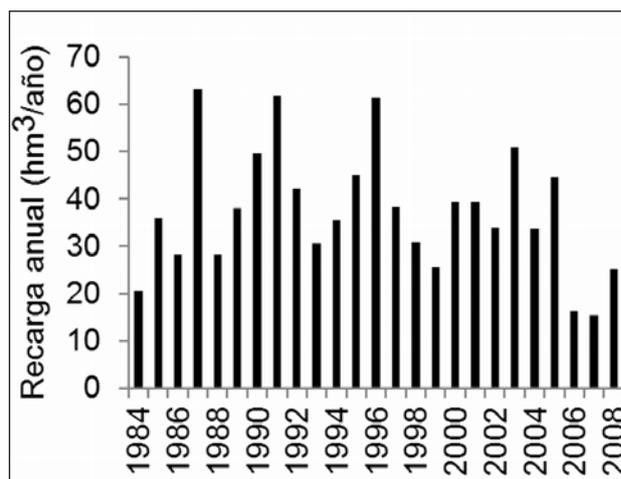
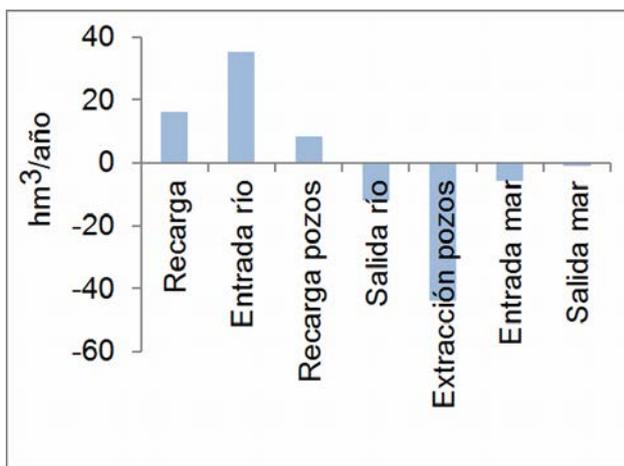


Figura 3. Valores de la recarga anual para el periodo histórico (1984-2008)

Los resultados obtenidos con Visual BALAN solo presentan una desviación del 10% aproximadamente entre medidas de los aforos superficiales y los valores obtenidos del estudio de la recarga distribuida a las masas subterráneas. Dadas las características de este análisis de contraste, la diferencia obtenida se considera aceptable para este estudio. La calibración con los datos de aforo (a partir de HEC-HMS) permitió ajustar los coeficientes correspondientes al flujo preferencial, escorrentía, evapotranspiración real y de recarga en tránsito, así como parámetros de la zona no saturada.

Según los resultados de la simulación del modelo flujo para el acuífero cuaternario el mayor porcentaje de la recarga corresponde a la infiltración por el río. Por lo que respecta al resto de los parámetros del balance se debe destacar una pequeña disminución del almacenamiento, de valor muy próximo al nivel de incertidumbre; muy posiblemente el acuífero presente equilibrio entre las entradas (recarga natural por la precipitación y río, entrada de agua del mar y recarga por pozos) y las salidas (salidas por río, bombes y mar). Los resultados del balance para el periodo histórico obtenidos se muestran en la figura 4.



**Figura 4.** Resultados del balance en el modelo de flujo del acuífero cuaternario. Periodo histórico

### 3.2. Escenarios A2 (2025, 2050). Impactos hidrológicos

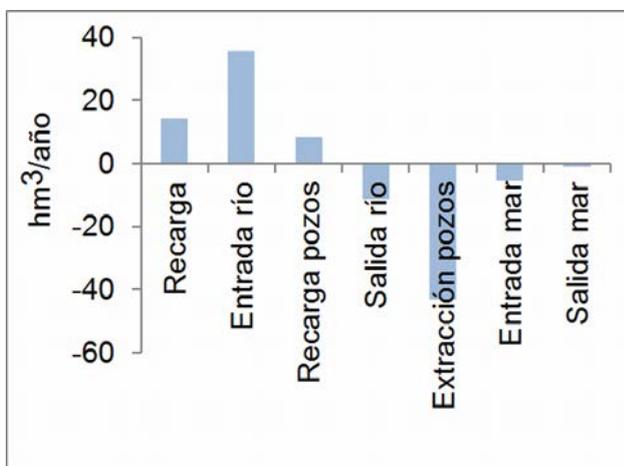
La simulación de escenarios futuros generados (A2) indican una disminución generalizada de la

precipitación respecto a los datos históricos (707 mm y 15.4°C), siendo 644 mm para los primeros 25 años (2000-2024) y de 611 mm para el final del periodo (2025-2050). La temperatura presenta una tendencia creciente, con un aumento de 1.6°C para el periodo 2000-2050. Los resultados de los diversos escenarios se muestran en la tabla 2.

El efecto de la variación de lluvia y temperatura en el caudal del Tordera derivado del escenario climático A2 se muestra en la Figura 5. En el gráfico se aprecia que una disminución de lluvia del 8.9% y 13.6% para los escenarios 2000-2024 y 2025-2050 respectivamente se traduce en una disminución de la aportación superficial del 29.4% y 34.1% para ambos escenarios. Las aportaciones medias previstas para el escenario A2 fueron de 107.7 hm<sup>3</sup> (2000-2024) y 100.5 hm<sup>3</sup> (2025-2050). La reducción presenta dos componentes: una primera debida a la propia disminución de la precipitación, consecuencia de los modelos de clima considerados; y una segunda de mayor importancia asociada a las características hidrológicas de la cuenca (variaciones de humedad del suelo, entre otros parámetros).

**Tabla 2.** Cuadro resumen de aportaciones anuales medias en la cuenca en estudio y escenario propuesto

	Aportaciones (hm <sup>3</sup> )		Recarga (hm <sup>3</sup> )		Precipitación (mm)		Temperatura (°C)	
	2000-2024	2025-2050	2000-2024	2025-2050	2000-2024	2025-2050	2000-2024	2025-2050
Histórico (1984-2008)	152.6		37.8		707		15.4	
A2	107.7 (-29.4%)	100.5 (-34.1%)	34.3 (-9.3%)	32.4 (-14.3%)	644 (-8.9%)	611 (-13.6%)	15.9 (+0.5°)	17 (+1.6°)
A2_sostenible	106.8 (-30%)	99.7 (-37.4%)	33.6 (-11.1%)	31.8 (-15.9%)				
A2_tendencial	107.5 (-29.6%)	100.3 (-34.4%)	33.3 (-11.9%)	31.5 (-16.7%)				

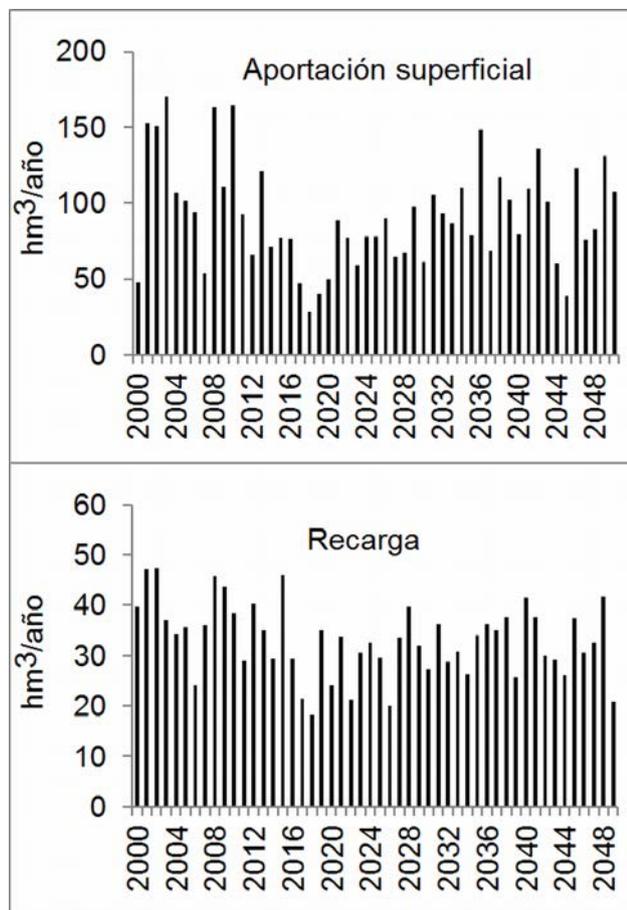


**Figura 5.** Resultados del balance en el modelo del acuífero cuaternario en el escenario A2 y horizonte 2050

La recarga en el primer periodo temporal (2000-2024) se reduce respecto a la histórica en un 9.3% (34.3 hm<sup>3</sup>), y alcanza el 14.3% (32.4 hm<sup>3</sup>) para el periodo 2025-2050. Sus efectos sobre la cuenca muestran un mayor retardo que los producidos en la escorrentía y de menor magnitud (fig. 5).

Por lo que respecta a la variación de los parámetros del modelo de flujo subterráneo en el acuífero, los cambios en el sistema para el escenario A2 se muestran en la figura 6. Los resultados para el escenario A2 y el periodo 2000-2050 muestran que el factor más importante que condiciona el almacenamiento es la recarga natural al acuífero, que disminuye en un 12% respecto el periodo histórico. Se observa que aumenta ligeramente el valor de recarga por el río y de la intrusión salina. La disminución de los bombeos por los pozos se

produce tal vez debido a un descenso en el nivel piezométrico del acuífero y en consecuencia, una disminución de las extracciones. Sin embargo, se debe destacar que los valores obtenidos se sitúan próximos al error o la incertidumbre asociada al cálculo, por lo que el resultado debe considerarse solo indicativo del posible cambio esperado.



**Figura 6.** Recursos hídricos superficiales y subterráneos anuales para el escenario A2 y horizonte 2050

### 3.3. Recursos hídricos y escenarios socioeconómicos prospectivos

Los resultados de combinar el escenario A2 de cambio climático con las proyecciones previstas sobre los usos del suelo y sus cambios (sostenible y tendencial), y su impacto sobre los recursos hídricos se muestran en la tabla 2. La comparación se ha realizado con los datos disponibles históricos de usos del suelo correspondientes al año 2005, considerado como nivel base para esta comparación. Los resultados futuros, proporcionados por el modelo LCM (escenarios tendencial y sostenible), prevén mínimos cambios de usos del suelo en la cuenca.

Los impactos en los recursos hídricos como resultado de acoplar el cambio climático y los dos escenarios socioeconómicos definidos indican la poca incidencia de los cambios previstos de usos del suelo sobre la variación de los recursos hídricos (Tabla 2). Dado su

escaso impacto sobre los recursos hídricos, puede concluirse que la variación prevista de precipitación y temperatura en la cuenca son los parámetros condicionantes de la disminución de los recursos futuros.

### 4. CONCLUSIONES

En este estudio se presenta una metodología integrada para la evaluación cuantitativa de los impactos derivados del cambio climático en los recursos hídricos superficiales y subterráneos. La metodología aplicada a la cuenca del Tordera y basada en las previsiones del modelo ECHAM5, indica que son esperables una máxima disminución de la precipitación del 13.6% y un aumento de 1.6 °C de la temperatura para el escenario climático A2 y periodo 2000-2050. Las predicciones para el año 2050 indican una disminución del 31.8% de los recursos hídricos superficiales y subterráneos en la cuenca. No se ha observado un incremento de la torrencialidad debido a fenómenos extremos. La disminución de la recarga subterránea respecto al descenso de la precipitación observada presenta un cierto retardo en el tiempo, resultado de la no linealidad de los procesos de recarga subterránea, de la distribución del proceso a lo largo del año y de las características del suelo y vegetación. De acuerdo a las simulaciones realizadas para los escenarios socioeconómicos definidos en la cuenca (establecidos para 2030), las variables climáticas son las mayores condicionantes de la disponibilidad futura de los recursos hídricos. El cambio de usos del suelo no constituye un factor condicionante debido a la pequeña variación del porcentaje de cambios previstos.

Respecto a la metodología aplicada, debe destacarse la dificultad derivada de la cantidad y calidad de las series meteorológicas y de aforo disponibles, hecho de especial relevancia para la simulación de escenarios climáticos futuros. Para definir el comportamiento del sistema hidrológico, su calibración y ajustes solo se dispuso de series continuas no superiores a 5 años, los datos de aforo disponibles presentaron escasa continuidad en el tiempo. Adicionalmente, para la estimación de los estadísticos y obtención de series futuras de los escenarios de cambio climático el generador climático requiere una calibración inicial basada en datos observados; ello implica la necesidad de trabajar con series de suficiente longitud y cantidad de datos. Uno de los aspectos a destacar ha sido la aplicación del análisis de contraste con Visual BALAN, que ha mostrado ser una herramienta de gran utilidad para evaluar la bondad de los resultados obtenidos.

Sobre los resultados obtenidos y como conclusión final, es importante destacar que la incertidumbre derivada de los datos históricos disponibles y la propia incertidumbre de los modelos climáticos (Swart et al., 2009) tienen un efecto directo sobre

las estimaciones realizadas. Así, la incertidumbre asociada a los modelos GCM en algunos casos puede ser superior a las predicciones a largo plazo (Chen et al., 2011). Por ello, los resultados obtenidos en este estudio deben considerarse como indicativos de la tendencia esperable en los recursos hídricos de la cuenca estudiada como consecuencia del cambio global.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se enmarca en un amplio proyecto de investigación, ACCUA, financiado por la Fundació Caixa de Catalunya y coordinado por el CREAM. Asimismo, se agradece la colaboración en la investigación de la Agència Catalana de l'Aigua (ACA), CREAM, IRTA y ETC/LUSI.

## REFERENCIAS

ACA. 2005. Caracterització de masses d'aigua i anàlisi del risc d'incompliment dels objectius de la Directiva Marc de l'Aigua (2000/60/CE) a Catalunya. Conques intra i intercomunitàries. Departament de Medi Ambient i Habitatge. Generalitat de Catalunya. Agència Catalana del Agua. Barcelona (Spain). 860 p.

ACA. 2009. Document de síntesi del sistema fluviodeltaic del curs mitjà i baix del riu Tordera. Juliol 2009. Departament de Medi Ambient i Habitatge. Generalitat de Catalunya. Agència Catalana de l'Aigua. Barcelona (Spain). 151 p.

ACCUA. 2011. Adaptacions al Canvi Climàtic en l'Ús de l'Aigua. Catalunya Caixa. Obra Social. Barcelona, Spain. 221 p.

Allen, D.M., Mackie, D.C., Wei, M. 2004. Groundwater and climate change: A sensitivity analysis for the Grand Forks aquifer, southern British Columbia, Canada. *Hydrogeology Journal* 12 (3): 270-290.

Bouraoui, F., Vachaud, G., Li, L.Z.X., Le Treut, H., Chen, T. 1999. Evaluation of the impact of climate changes on water storage and groundwater recharge at the watershed scale. *Climate Dynamics* 15 (2): 153-161.

Brouyère, S., Carabin, G., Dassargues, A. 2004. Climate change impacts on groundwater resources: Modelled deficits in a chalky aquifer, Geer basin, Belgium. *Hydrogeology Journal* 12 (2): 123-134.

Burns, D.A., Klaus, J., McHale, M.R. 2007. Recent climate trends and implications for water resources in the Catskill Mountain region, New York, USA. *Journal of Hydrology* 336(1-2): 155-170.

Candela, L., Elorza, F.J., Jiménez-Martínez, J., von Igel, W. 2012a. Global change and agricultural management options for groundwater sustainability. *Computers and Electronics in Agriculture* 86 120-130.

Candela, L., Tamoh, K., Olivares, G., Gomez, M. 2012b. Modelling impacts of climate change on water resources in ungauged and data-scarce watersheds. Application to the Siurana catchment (NE Spain). *Science of the Total Environment* 440 (253-260).

Candela, L., von Igel, W., Javier Elorza, F., 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.

Cuo, L. et al. 2011. Effects of mid-twenty-first century climate and land cover change on the hydrology of the Puget Sound basin, Washington. *Hydrological Processes* 25 (11): 1729-1753.

Chen, J., Brisette, F.P., Leconte, R. 2011. Uncertainty of downscaling method in quantifying the impact of climate change on hydrology. *Journal of Hydrology* 401 (3-4): 190-202.

Chu, X., Steinman, A. 2009. Event and continuous hydrologic modeling with HEC-HMS. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 135 (1): 119-124.

Falloon, P., Betts, R. 2010. Climate impacts on European agriculture and water management in the context of adaptation and mitigation-The importance of an integrated approach. *Science of the Total Environment* 408 (23): 5667-5687.

Febrillet Huertas, J.F., José Clases, S., Bello, L., Chalas, J. 2014. Simulación de los efectos del cambio climático en los recursos hídricos y estrategias de adaptación, usando el modelo Water Evaluation And Planning (WEAP), en la cuenca de la región Yaque del norte de la República Dominicana. *Aqua-Lac* 6 (2): 21-36.

Fleming, M.J., Doan, J.H. 2010. HEC-GeoHMS, Geospatial Hydrologic Modeling Extension, V 5.0. U.S. Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center, HEC Davis (CA, USA). 197 p.

Green, T.R. et al. 2011. Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater. *Journal of Hydrology* 405 (3-4): 532-560.

Grieneisen, M.L., Zhang, M. 2011. The current status of climate change research. *Nature Climate Change* 1 (2): 72-73.

Hagg, W., Braun, L.N., Kuhn, M., Nesgaard, T.I. 2007. Modelling of hydrological response to climate change in glacierized Central Asian catchments. *Journal of Hydrology* 332 (1-2): 40-53.

Hewitson, B.C., Crane, R.G. 1996. Climate downscaling: techniques and application. *Climate Research* 7 (2): 85-95.

Hsu, K.C., Wang, C.H., Chen, K.C., Chen, C.T., Ma, K.W. 2007. Climate-induced hydrological impacts on the groundwater system of the Pingtung Plain, Taiwan. *Hydrogeology Journal* 15 (5): 903-913.

- ICC. 1992. Mapa d'àrees hidrogeològiques de Catalunya, 1:250.000. Institut Cartogràfic de Catalunya. Generalitat de Catalunya. Barcelona (ESPAÑA).
- IPCC. 2001. Climate change 2001: The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Reports of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge University Press. Cambridge (UK) and New York (N.Y. USA). 881 p.
- Kerr, R.A. 2005. Confronting the Bogeyman of the climate system. *Science* 310 (5747): 432-433.
- Kundzewicz, Z.W., Somlyódy, L. 1997. Climatic Change Impact on Water Resources in a Systems Perspective. *Water Resources Management* 11(6): 407-435.
- Legates, D.R., McCabe Jr, G.J. 1999. Evaluating the use of 'goodness-of-fit' measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research* 35 (1): 233-241.
- Majidi, A., Shahedi, K. 2012. Simulation of Rainfall-Runoff Process Using Green - Ampt Method and HEC-HMS Model (Case Study: Abnama Watershed, Iran). *International Journal of Hydraulic Engineering* 1 (1): 5-9.
- McDonald, M.G., Harbaugh, A.W. 1988. MODFLOW, A Modular three dimensional finite- difference groundwater flow model. U. S. Geological Survey. 586 p.
- Narrant, C., Douguédroit, A. 2006. Monthly and daily precipitation trends in the Mediterranean (1950-2000). *Theoretical and Applied Climatology* 83 (1-4): 89-106.
- Nzewi, E.U. 2001. The McGraw-Hill civil engineering PE exam depth guide: water resources. McGraw-Hill. Michigan (USA). 350 p.
- Roeckner, E. et al. 2003. The atmospheric general circulation model ECHAM 5. Part I: Model description. Report No. 349. Max Planck Institute for Meteorology. Hamburg, Germany.
- Ruth, M., Coelho, D. 2007. Understanding and managing the complexity of urban systems under climate change. *Climate Policy* 7 (4): 317-336.
- Samper, J., Huget, L., Ares, J., Garcia-Vera, M.A. 2005. User's guide VisualBALAN v.2.0: Código interactivo para la realización de balances hidrológicos y la estimación de la recarga. Civil Engineering School of A Coruña, A Coruña (España). 150 p.
- Scibek, J., Allen, D.M., Cannon, A.J., Whitfield, P.H. 2007. Groundwater-surface water interaction under scenarios of climate change using a high-resolution transient groundwater model. *Journal of Hydrology* 333 (2-4): 165-181.
- Scharffenberg, W.A., Fleming, M.J. 2009. Hydrologic Modeling System HEC-HMS v3.4. User's Manual. U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center, HEC Davis (CA, USA). 310 p.
- Serrat-Capdevila, A. et al. 2007. Modeling climate change impacts - and uncertainty - on the hydrology of a riparian system: The San Pedro Basin (Arizona/Sonora). *Journal of Hydrology* 347 (1-2): 48-66.
- Swart, R., Bernstein, L., Ha-Duong, M., Petersen, A. 2009. Agreeing to disagree: Uncertainty management in assessing climate change, impacts and responses by the IPCC. *Climatic Change* 92 (1-2): 1-29.
- Werritty, A. 2002. Living with uncertainty: Climate change, river flows and water resource management in Scotland. *Science of the Total Environment* 294 (1-3): 29-40.