

## FUTURO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN LA CUENCA DEL RÍO GUADALFEO BAJO SUPUESTO DE CAMBIO CLIMÁTICO

Moreno, I.<sup>1</sup>, Millares, A.<sup>1</sup>, Herrero, J.<sup>1</sup>, Polo, M.J.<sup>2</sup>, Losada, M.A.<sup>1</sup> (2010)

1. Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales. Centro Andaluz de Medio Ambiente. isabelmm@ugr.es, mivalag@ugr.es, herrero@ugr.es, mlosada@ugr.es
2. Grupo de Hidrología e Hidráulica Agrícola. Universidad de Córdoba. mjpolo@uco.es

### Abstract

Water management in semiarid basins flowing into the Mediterranean Sea is rather complex because: 1) rainfall is scarce in these regions and it is irregularly distributed in space and time and 2) the socio-economic development of these regions is based on activities demanding high amounts of water (tourism, intensive agriculture, etc.) that would not be available during the summer time without management. This situation could be critical if the present predictions of climate change become true.

In this work we use the mathematical model WiM-Med to simulate the different changes taking place in the water flows and reservoirs of the Guadalfeo river basin assuming that the temperature increases 2-3 °C and rainfall decreases 15%. Results show that the snow decreases considerably, which causes a notable modification of the river flow during spring. Therefore, in the future, new management techniques should be applied or it would be necessary to adapt the land uses, reaching an agreement between the water demand and the resources.

**Keywords:** water resources, climate change, hydrologic modelling, WiMMed, Guadalfeo

### Resumen

La gestión integral del agua en las cuencas mediterráneas resulta muy compleja por dos motivos fundamentales: 1) las precipitaciones son bastante escasas y su distribución espacial y temporal es muy irregular. Se alternan periodos prolongados de sequía con años de precipitaciones moderadas siendo frecuentes los episodios puntuales torrenciales; 2) el desarrollo socioeconómico está dominado por actividades que requieren importantes cantidades de agua en las épocas del año donde no se producen precipitaciones. Esta situación está previsto que se agrave con el paso de los años, cuando el cambio climático que se pronostica para estas regiones se haga efectivo.

En este artículo se utiliza el modelo matemático WiM-Med para evaluar los cambios que se producirían en los distintos almacenamientos y flujos de agua de la cuenca del río Guadalfeo suponiendo que la temperatura suba 2°C y la precipitación se reduzca en un 15% tal y como propone la Agencia Europea del Medio Ambiente. La precipitación de nieve disminuye considerablemente modificando el régimen de caudales durante la primavera. Esto supondrá tener que buscar nuevas medidas de gestión o nuevos usos del

territorio que impliquen menores consumos de agua, de tal forma que se encuentre un consenso entre demandas y recursos.

**Palabras clave:** Recursos hídricos, cambio climático, modelo hidrológico, WiMMed, Guadalfeo

## 1. INTRODUCCIÓN

Las cuencas hidrográficas vertientes al Mar Mediterráneo, no sólo en España sino en el resto de países de su ribera, presentan unas particularidades muy especiales, tanto físicas como humanas. Son, en general, de pequeña extensión y en ellas concurren numerosos gradientes tanto espaciales como temporales ocasionados tanto por las características de la cuenca en sí (geomorfología, geología, suelos, acuíferos, vegetación, distribución de la red hidrográfica) como por los agentes que sobre ella actúan. La variabilidad meteorológica estacional, anual e hiperanual del clima mediterráneo da lugar a un amplio intervalo de condiciones meteorológicas, en muchos casos de carácter extremo (lluvias torrenciales, sequías coyunturales, etc.), que dificulta la gestión de los recursos hídricos. El desarrollo socio-económico de estas regiones, asociado generalmente al turismo estacional de verano demanda volúmenes elevados de agua durante la estación más seca mientras que la agricultura de regadío requiere una distribución estacionaria de la misma, lo que resulta muy difícil de conseguir en cuencas semiáridas. La regulación mediante embalses, la extracción subterránea de agua y la interacción del hombre con la red de drenaje mediante extracción directa o sistemas de acequias y conducciones son algunas de las medidas más ampliamente

utilizadas en estas cuencas para conseguir satisfacer las demandas de agua.

Estas medidas acarrearán también algunos problemas ambientales como pueden ser el retroceso de deltas y erosión de playas por retención de sedimentos por los pantanos, la sobreexplotación y salinización de acuíferos o el uso ineficiente del agua por utilizar técnicas de regadío como, por ejemplo, el riego a manta. Además, una mala gestión en la ordenación del territorio ha permitido la construcción de viviendas en zonas de ramblas y llanuras aluviales inundables para determinados periodos de retorno, lo que da una dimensión no sólo económica sino también social a la gestión de los recursos hídricos.

La cuenca del río Guadalfeo, situada en la provincia de Granada, en el sudeste de la Península Ibérica, presenta todas las peculiaridades de las cuencas mediterráneas (figura 1). Tiene una superficie aproximada de 1295 km<sup>2</sup> y se asienta básicamente en la región de la Alpujarra (el sector nordeste), pero también ocupa un amplio sector del valle de Lecrín (la zona noroccidental), y en menor cuantía de la Costa Tropical (franja sur). La región está marcada por los fuertes contrastes en el medio físico, determinados en gran medida por los acusados gradientes de altitud existentes en el área, con cambios de 3400 m en los escasos 20 km que separan Sierra Nevada de la costa.

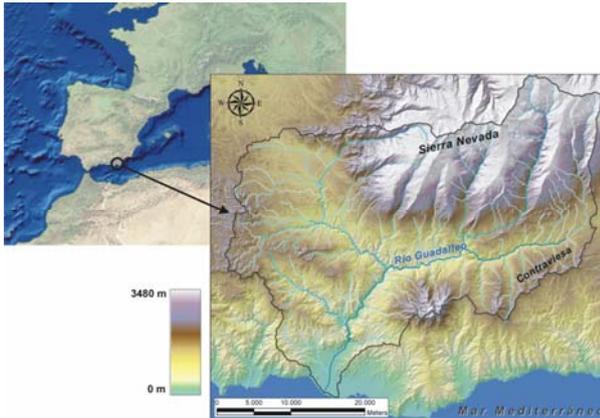


Figura 1. Localización de la cuenca del río Guadalfeo

La temperatura media anual de la zona costera es de aproximadamente 18 °C, significativamente superior a la temperatura media de las zonas más altas (por encima de 2000 m) inferior a 10 °C. La precipitación media anual de la cuenca es de aproximadamente 550 mm, si bien ésta varía localmente desde 350 mm/año en las cotas más bajas hasta 800 mm/año, fundamentalmente en forma de nieve, que se registran en las zonas más altas de Sierra Nevada (Herrero et al., 2009a, Millares et al., 2008).

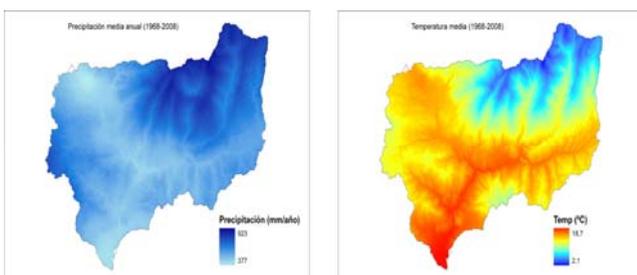


Figura 2. Variabilidad de la precipitación y la temperatura dentro de la cuenca del río Guadalfeo

La variabilidad tanto espacial como temporal de las variables meteorológicas (figura 2), unida a la topografía del terreno da lugar a una cubierta vegetal muy variada y heterogénea

en especies (figura 3). En las zonas naturales la evolución de la vegetación está muy condicionada por los incendios forestales que han tenido lugar durante todo el siglo XX. El piñal es muy frecuente en las faldas de las montañas, mientras que retamas, jaras, romeros y tomillos son más frecuentes en la zona Este de la cuenca.

El factor antrópico en esta cuenca resulta ser de gran importancia ya que buena parte del territorio se encuentra cultivado. La agricultura de las zonas altas de la cuenca (Alpujarras y Valle de Lecrín) se caracteriza por su marginalidad, con escasos rendimientos unitarios, estructuras productivas muy fragmentadas y técnicas de producción y comercialización tradicionales. Por el contrario, la agricultura en la costa es de una alta rentabilidad económica, basada en el cultivo de frutos subtropicales al aire libre y hortalizas en invernadero, y con altas demandas de agua. La demanda total de agua existente en la cuenca del Guadalfeo se cifra en 140 hm<sup>3</sup>/año, siendo la agricultura de regadío la actividad que ejerce la mayor parte de dicha demanda (Millares et al., 2008).

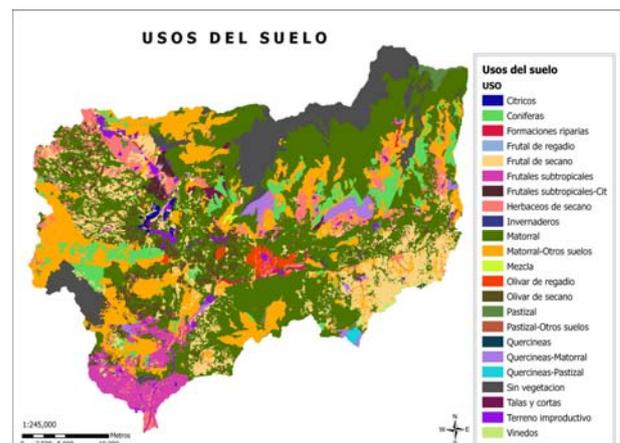


Figura 3. Usos del suelo en la cuenca del río Guadalfeo

El consumo humano es la segunda actividad que más agua demanda. Debido a la

orografía del terreno y a lo benigno del clima, la población se concentra principalmente en la costa y en los alrededores de las infraestructuras viarias que conectan a ésta con la capital de provincia. La costa tropical es un destino turístico nacional durante los meses de verano, en los que la población puede duplicarse, ejerciendo una gran presión sobre los recursos hídricos, escasos en esta época.

Actualmente, dos son los embalses que regulan la distribución temporal de los recursos hídricos en la cuenca: el embalse de Béznar y el embalse de Rules. Esta última presa se construye con los siguientes objetivos: (1) defensa frente a avenidas del valle inferior del río Guadalfeo (2) abastecimiento a los núcleos de población del litoral, con una población estimada equivalente de 250000 habitantes y (3) regadío de 5000 ha de cultivos subtropicales y hortícolas de alto rendimiento en la franja litoral (<http://www.chse/inventario/rules.htm>). La construcción de esta presa durante los años 90 plantea una serie de cuestiones relacionadas con la gestión de los recursos hídricos y las consecuencias que para el medio natural tendría la puesta en servicio del embalse.

Para responder a las mismas y poder realizar una gestión integrada de los recursos se plantea crear una herramienta que permita reproducir y simular el comportamiento y evolución de los recursos hídricos en cuencas mediterráneas semiáridas bajo distintas condiciones climático-atmosféricas, de tal forma que facilite al organismo competente la toma de decisiones y se garantice una adecuada gestión ambiental y social. Para ello, el Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales de la Universidad de Granada junto al Grupo de Hidrología e Hidráulica Agrícola, financiados por la Agencia Andaluza del Agua, desarrollan el modelo WiM-

Med, un modelo matemático distribuido con base física que simula el almacenamiento de agua entre los posibles depósitos existentes en una cuenca y los flujos que se producen entre ellos.

La planificación a largo plazo de los recursos naturales requiere conocer cuál será la evolución de los agentes forzadores durante dicho periodo. Las predicciones existentes en la actualidad sobre los cambios que se producirán en el clima no permiten presuponer que éste es estacionario. Además, el ciclo hidrológico resulta ser muy sensible a variaciones del clima, especialmente en las regiones áridas y semiáridas (Shen and Chen, 2010; Peng and Xu, 2010); los recursos hídricos serán más inestables y los ecosistemas sufrirán de estrés hídrico severo (Shen and Chen, 2010). Se prevé que en las regiones mediterráneas las precipitaciones sean más torrenciales y por tanto, que aumente el riesgo de inundación de poblaciones y cultivos asentados a orillas de ríos y arroyos.

Hoy en día se piensa que los impactos del cambio climático serán de gran magnitud, lo que hace que tanto científicos como políticos estén dedicando grandes esfuerzos a su caracterización (Wilby et al., 2008), de tal forma que se puedan preparar estrategias para la adaptación o mitigación. El estudio de los efectos del cambio climático en el ciclo hidrológico se aborda generalmente mediante la utilización de modelos matemáticos e incluye dos fuentes de incertidumbre relacionadas con: 1) la caracterización del clima futuro 2) la respuesta hidrológica que dicho cambio causaría. Dada la poca resolución espacial de los modelos de circulación general empleados para la predicción del cambio climático, es necesario usar modelos hidrológicos para simular los impactos que variaciones futuras de precipitación y temperatura podrían producir en los recursos hídricos (Jiang et

al., 2007). Modelos paramétricos distribuidos basados en procesos son necesarios para evaluar las respuestas espaciales dentro de una cuenca (Beven, 1989; Thomsen, 1990; Running and Nemani, 1991; Bathurst y O'Connell, 1992). En los últimos años la utilización de este tipo de modelos se está generalizando, dando lugar a la aparición de diferentes modelos hidrológicos adaptados a las particularidades de los distintos tipos de climas y sus procesos asociados. Ejemplos de la utilización de diferentes modelos hidrológicos en cuencas semiáridas se pueden encontrar en Serrat-Capdevila et al. (2007), Jiang et al. (2007) o Peng y Xu (2010).

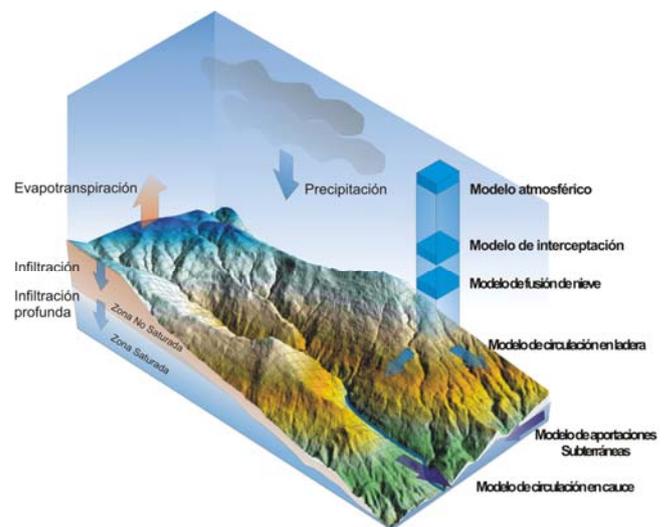
El objetivo de este artículo es evaluar la variación que se produciría en el caudal en un punto de aforo de la cuenca del río Guadalfeo para distintos años suponiendo que en el futuro se observe un aumento de la temperatura y una disminución de la precipitación utilizando para ello un modelo matemático que contempla todas las particularidades específicas de las cuencas mediterráneas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Descripción del modelo WiM-Med

El programa denominado Gestión Integrada de Cuencas (WiM-Med, Watershed Integrated Management, Herrero et al., 2009b) es un modelo hidrológico completo, distribuido y de base física. El sufijo Med que acompaña al nombre refleja que el modelo ha sido desarrollado y aplicado, hasta el momento, en cuencas mediterráneas. El modelo WiM-Med se ha desarrollado con el objetivo de ser capaz de resolver adecuadamente aquellos procesos particulares del clima mediterráneo, como son la torrencialidad en las lluvias, la semiaridez y el elevado riesgo de sequía en periodos

hiperanales. Para ello simula el almacenamiento de agua entre los posibles depósitos de agua existentes en una cuenca (nieve, vegetación, suelo, acuífero, embalse y río) y los flujos que se producen entre ellos (fusión, escorrentía, infiltración, interceptación, evaporación, etc.). Un esquema conceptual del modelo se puede observar en la figura 4. El modelo ofrece resultados tanto puntuales como distribuidos en el espacio de variables como puedan ser caudales líquidos, volúmenes de agua almacenados, superficies inundadas, etc. (Herrero et al., 2009b).



**Figura 4.** Esquema conceptual del modelo WiM-Med

La figura 4 muestra además la representación esquemática del ciclo hidrológico tal y como se reproduce dentro del modelo WiM-Med, en la que se aprecia de manera visual la conexión entre los distintos módulos que posee: simulación de variables meteorológicas, incluyendo distribución temporal e interpolación espacial, interceptación de la precipitación, fusión de nieve, infiltración-escorrentía, balance de agua en suelo, circulación superficial en ladera, acuíferos superficial y profundo y circulación en cauce y embalse. La complejidad del modelo

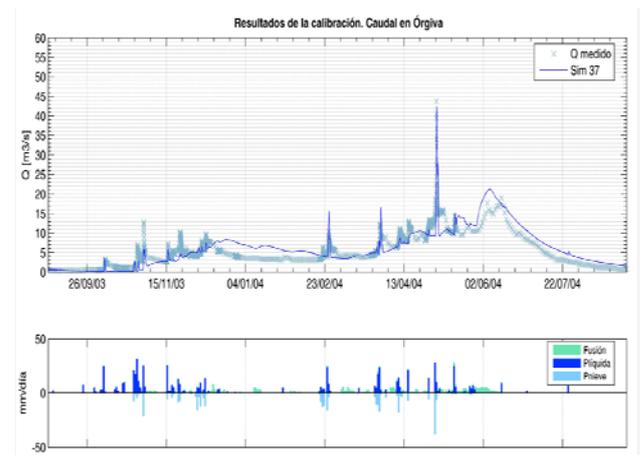
impide realizar una descripción detallada de la formulación utilizada, por lo que se remite al lector a Herrero et al. (2009b) para obtener esta información.

Entre las aplicaciones directas de este modelo para la gestión de recursos hídricos se encuentran 1) la caracterización del comportamiento integral de la cuenca en relación a los procesos que determinan la cantidad y calidad del agua, 2) la cuantificación de su variabilidad espacial y temporal, 3) la evaluación de la influencia en la desembocadura del río y en las playas adyacentes, 4) cálculo de caudales ecológicos, 5) reparto del recurso agua entre los distintos usos (agricultura, consumo, etc.). En cuanto a la planificación futura el modelo puede ayudar a la toma de decisiones relacionadas con la 4) predicción de avenidas, 5) evolución de recursos hídricos con cambios de uso de suelo, clima, desviaciones en el cauce, incendios, etc.

### Calibración

El modelo WiM-Med ha sido calibrado y verificado para la cuenca del río Guadalfeo. En la figura 5 se muestran los resultados obtenidos para el año hidrológico 2003-2004 en el puente de Órgiva (Millares, 2008; Aguilar, 2008). Como se puede observar en la figura, el modelo es capaz de representar adecuadamente el comportamiento del caudal tanto en las estaciones secas como en las estaciones lluviosas, interpretando correctamente los eventos de precipitación y las recesiones en los acuíferos. Es necesario hacer notar que el modelo ofrece información de los recursos hídricos potenciales del sistema, que dependiendo de la cuenca en sí o de la época del año puede no corresponderse exactamente con los caudales aforados en campo.

Esto se debe a acciones humanas como puedan ser las derivaciones de caudal, trasvases entre cuencas, captaciones para riego, extracciones en pozos, etc. En el río Guadalfeo en concreto y más concretamente en la región de la Alpujarra, el agua ha sido desviada tradicionalmente mediante sistemas de acequias, sirviendo este agua fundamentalmente para el riego. La figura anterior también permite identificar la procedencia última del agua, si los aumentos de caudal se deben a precipitaciones en forma líquida, a periodos de intensa fusión de la nieve o a aportes de caudal base por los acuíferos.



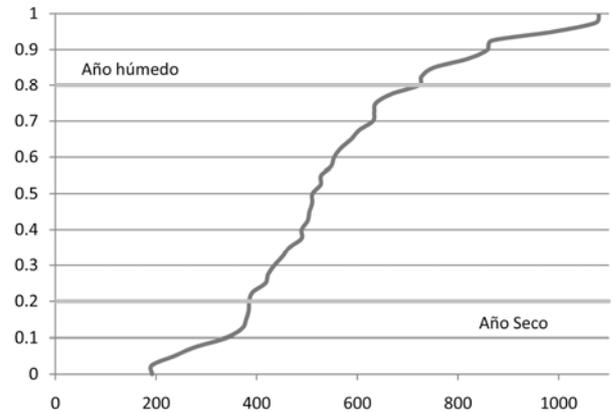
**Figura 5.** Calibración del modelo WiM-Med con datos del aforo del puente de Órgiva para el año 2003-2004 (Millares, 2008)

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los aportes fluviales en el río Guadalfeo y la recarga de acuíferos se encuentran laminados por procesos relacionados con la acumulación y fusión de nieve en las cumbres de Sierra Nevada. Esto permite una distribución más extendida en el tiempo de los recursos hídricos, disminuyendo la torrencialidad de la cuenca. Los escenarios de cambio climático que se prevén para un futuro cercano predicen para las cuencas mediterráneas

una mayor aridez. Las proyecciones de futuro incluidas en el informe *Impacts of Europe's Changing Climate - 2008*, elaborado por la Agencia Europea del Medioambiente (2008) ofrece escenarios en los que es previsible que la temperatura sufra un incremento de +2 °C y la precipitación una disminución de -15%, para el año 2050. Para evaluar la influencia de estos cambios en la acumulación y fusión de nieve en particular, y en el comportamiento de los flujos entre depósitos en general, se simulan estos escenarios en el puente de Órgiva para los años hidrológicos medios 2002-2003, 2003-2004 y para un caso más extremo, el año seco 2004-2005. La evolución de la precipitación anual de los diferentes años se presenta en la figura 6 y su función de distribución aparece en la figura 7. En la cuenca del río Guadalfeo se considera que un año es seco cuando su precipitación anual es menor de 385 mm (20 % en la función de distribución) mientras que un año es húmedo si supera los 722 mm (80% en la función de distribución).

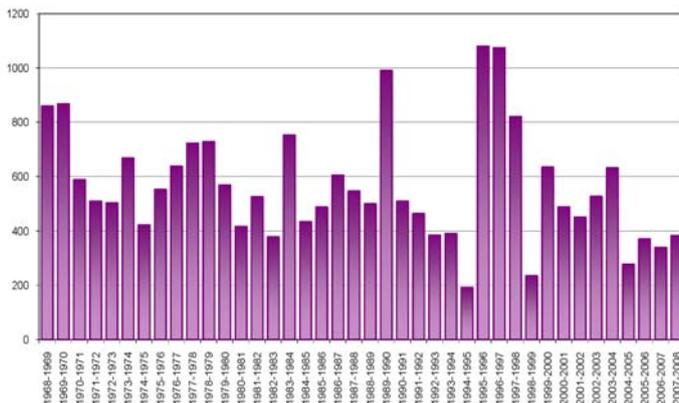
**Función de probabilidad de la precipitación anual en la Cuenca del río Guadalfeo**  
Unidades: mm/año



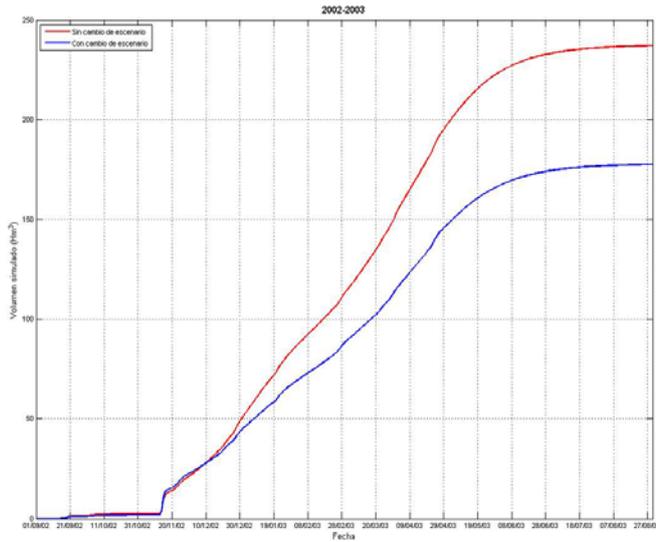
**Figura 7.** Función de distribución para la precipitación anual

En las figuras 8 y 9 se muestran los resultados para el primero de los casos propuestos, el año hidrológico 2002-2003, en el que la precipitación en la parte alta de la cuenca se estima en 752 mm y en el total de la cuenca en 528 mm. La disminución de la precipitación y el aumento de la temperatura ocasionan una merma en el volumen de agua total de 60 Hm<sup>3</sup>, lo que supone casi un 25% menos que en la simulación de referencia (de 237 Hm<sup>3</sup> a 177 Hm<sup>3</sup>).

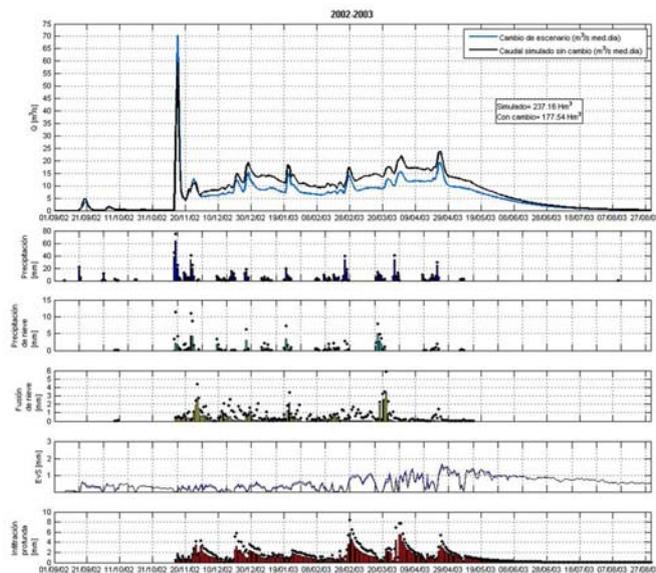
**Precipitación anual Cuenca del río Guadalfeo**  
Fuente: Proyecto Guadalfeo. Unidad: mm/año



**Figura 6.** Precipitación en el año hidrológico



**Figura 8.** Volumen de agua acumulado simulado en el año hidrológico en el año 2002-2003 y para el escenario de cambio climático propuesto



**Figura 9.** Simulación bajo supuesto de disminución del 15% de la precipitación y aumento del 2°C de la temperatura en el periodo 2002-2003. (Resultados en negro = simulación sin cambios)

La reducción de la precipitación y subida de la temperatura suponen un cambio drástico en el volumen de nieve acumulado (Tabla 1). Además se observan retrasos en la precipitación

de nieve mientras que la fusión se acelera. De hecho, los cambios en el patrón de caudal empiezan a observarse tras las primeras nevadas. Durante el otoño de este año no demasiado lluvioso, las diferencias entre caudal de referencia y caudal en el futuro escenario es prácticamente similar, si bien sí se observan variaciones importantes en el caso de episodios de borrasca con precipitaciones elevadas. La subida de las temperaturas hace que la precipitación de nieve sea menor. Se produce por tanto una mayor precipitación líquida, lo que origina mayores caudales y mayor riesgo de inundación en el escenario simulado con cambio climático que en el simulado bajo las actuales condiciones para el evento que tiene lugar en noviembre de 2002. A medida que comienza el invierno, el caudal de referencia y el caudal esperado en situación de cambio climático comienzan a separarse, observándose el máximo en la primavera, debido a las variaciones en la fusión de nieve de Sierra Nevada.

	Año 2002-2003		
	Sin cambio	Con cambio	% Dif
Volumen en Órgiva (Hm <sup>3</sup> )	237	177	-25%
Precipitación (mm)	752	639	-15%
Precipitación de nieve (mm)	113	43	-62%
Evaporación desde el suelo (mm)	178	187	+5%
Percolación	381	277	-27%

**Tabla 1.** Comparación entre variables indicadas para el año hidrológico 2002-2003 entre la simulación sin cambio y con cambio de escenario

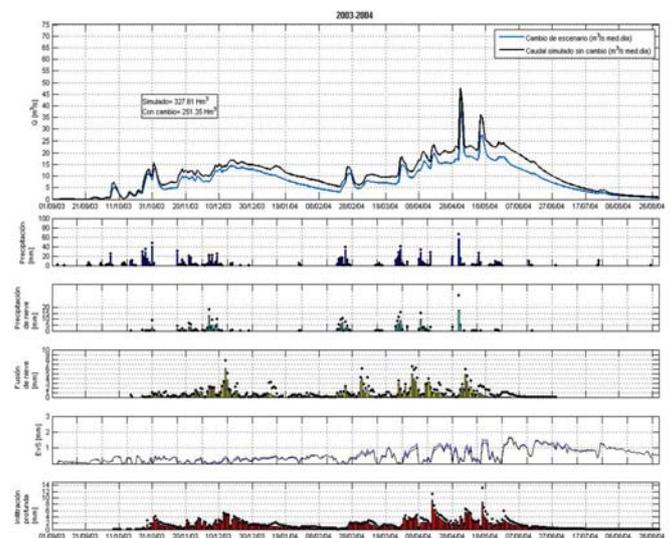
El aumento de la temperatura ocasiona también un incremento de la evaporación de agua desde el suelo (un 5% respecto al periodo de referencia). Todos estos factores, de forma conjunta, hacen que el volumen de agua disponible para recargar los acuíferos sea menor. Se producirá por tanto no sólo una merma estacional del caudal del río sino también de las reservas subterráneas de agua.

Las consecuencias de las variaciones del clima son todavía más notorias en los años más húmedos. El segundo caso de estudio se corresponde con el año hidrológico 2003-2004. Dos simulaciones se han desarrollado para este año, la primera similar al escenario propuesto por la EEA y la segunda con la misma disminución en la precipitación pero un aumento de la temperatura de 3°C. En el primero de los escenarios de cambio climático planteados para este año el volumen de agua aforado respecto al año de referencia sería de -76 Hm<sup>3</sup> (figura 10). Durante este año, en el que las precipitaciones son más continuas y se reparten más homogéneamente a lo largo de la estación lluviosa, las variaciones en el caudal empiezan a notarse antes que en el año 2002-2003, si bien las diferencias más importantes se siguen observando durante la época de deshielo. Durante los meses de Abril y Mayo en el escenario simulado con cambio climático ya no queda nieve para fundir, lo que ocasionará que en determinadas fechas se observen variaciones negativas en el caudal de hasta 5 m<sup>3</sup>/s. En lo relativo a la evaporación desde el suelo, como hay más agua disponible que en el caso anterior, la diferencia con la evaporación de referencia es también mayor. La recarga de acuíferos se ve también muy disminuida e incluso se observa cómo al final del año hidrológico el caudal base que llevaría el río Guadalfeo por aportes subterráneos sería ligeramente menor

que durante el año de referencia. Con estas simulaciones queda clara la importancia que la nieve adquiere en las cuencas mediterráneas como regulador de caudales, evitando avenidas y favoreciendo una distribución temporal de los recursos hídricos más prolongada en el tiempo.

	Año 2003-2004		
	Sin cambio	Con cambio	% Dif
Volumen en Órgiva (Hm <sup>3</sup> )	327	251	-24%
Precipitación (mm)	955	812	-15%
Precipitación de nieve (mm)	240	131	-46%
Evaporación desde el suelo (mm)	176	188	+7%
Percolación (mm)	528	396	-25%

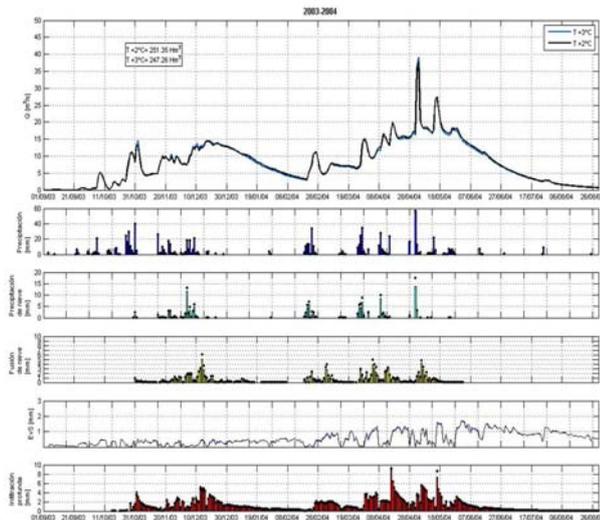
**Tabla 2.** Comparación entre variables indicadas para el año hidrológico 2003-2004 entre la simulación sin cambio y con cambio de escenario



**Figura 10.** Simulación bajo supuesto de disminución del 15% de la precipitación y

aumento de 2°C de la temperatura en el periodo 2003-2004. (Resultados en negro = simulación sin cambios)

En el segundo escenario propuesto para el año 2003-2004, el aumento de 3°C en la temperatura manteniendo el descenso del 15% en la precipitación, no presenta grandes diferencias con los patrones que aparecen en el primer escenario. La disminución del volumen de agua que se aforaría es de tan sólo 4 Hm<sup>3</sup>, debido fundamentalmente a las precipitaciones en forma de nieve, que disminuyen desde los 131 mm hasta los 101 mm (figura 11).



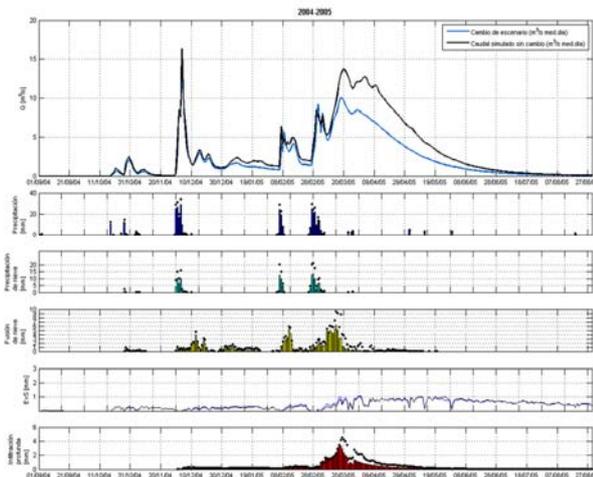
**Figura 11.** Simulación bajo supuesto de disminución del 15% de la precipitación y aumento de 3°C de la temperatura en el periodo 2003-2004. (Resultados en negro = simulación sin cambios)

El último caso de estudio se corresponde con el año hidrológico seco 2004-2005. Este año es peculiar ya que el 50% de la precipitación caída lo hizo en forma de nieve (Tabla 3). Esto hace que aunque la diferencia de volumen de agua que se esperaría aforar entre el año simulado sin y con cambio de escenario sea del 30%, muy similar a la de los años anteriores, las divergencias se

concentren sobre todo durante la época de fusión de nieve, entre los meses de abril y mayo (figura 12). Las diferencias de caudal en ningún momento superan los 5 m/s. La percolación muestra también un comportamiento muy similar al del caudal. Es en la evaporación desde el suelo donde apenas si se observa diferencia. Esto indica que se evapora prácticamente toda el agua posible que hay en el suelo.

	Año 2004-2005		
	Sin cambio	Con cambio	% Dif
Volumen en Órgiva (Hm <sup>3</sup> )	89.7	62.81	-30%
Precipitación (mm)	376	320	-15%
Precipitación de nieve (mm)	191	117	-39%
Evaporación desde el suelo (mm)	142	145	+2%
Percolación (mm)	119	79	-33%

**Tabla 3.** Comparación entre variables indicadas para el año hidrológico 2004-2005 entre la simulación sin cambio y con cambio de escenario



**Figura 12.** Simulación bajo supuesto de disminución del 15% de la precipitación y aumento de 2°C de la temperatura en el periodo 2004-2005. (Resultados en negro = simulación sin cambios)

La utilización de escenarios de cambio climático adaptados a su localización geográfica junto a las peculiaridades de funcionamiento de cada cuenca no permite la comparación directa de resultados entre estudios realizados en cuencas semiáridas. En la cuenca de San Pedro (EEUU), los resultados de Serrat-Capdevila et al. (2007) muestran como se producirá una menor recarga de los acuíferos, lo que también afectaría a los sistemas riparios en el largo plazo. En el caso de la cuenca del río Yulongkash, en China, Peng y Xu (2010) predicen un aumento de los caudales entre los meses de Octubre a Marzo y una disminución de los mismos el resto de meses para el año 2020. Estos resultados hay que tomarlos con precaución, ya que el modelo hidrológico empleado en esta cuenca no posee ningún módulo para reproducir la fusión de la nieve, que tan importante resulta ser en la cuenca del río Guadalfeo. Sin embargo, en Jordania, más concretamente en la cuenca del río Zarga, los escenarios de cambio climático estudiados dan lugar a una disminución de la escorrentía

superficial mensual para todos los meses del año (Abdulla y Al-Omari, 2008).

## CONCLUSIONES

El estudio aquí realizado muestra cómo sería el efecto sobre la distribución espacial y temporal de los recursos hídricos de la cuenca del río Guadalfeo en el supuesto de cambio climático con disminución de la precipitación y aumento de la temperatura. La menor presencia de nieve, (que puede alcanzar un 50%) y una mayor proporción de precipitación líquida en los eventos torrenciales incrementa los caudales fluviales de forma que aumenta el riesgo de inundaciones durante estos episodios, a pesar de la disminución de la precipitación total estimada. Esto favorecería una mayor erosión de los suelos y sedimentos. Este cambio en la dinámica de los sedimentos afectaría al embalse de Rules, que podría ver incrementados sus problemas de aterramiento. Las mayores diferencias en los flujos de agua se observan en primavera, cuando se produce la recarga de los acuíferos y el caudal que circula por el río se debe prácticamente a la fusión de la nieve. Dado que la tendencia esperable de la demanda de agua es de crecimiento mientras que la de los recursos es de disminución, la presión sobre los recursos hídricos se vería incrementada, fomentando la aparición de problemas sociales o agravando los ya existentes en el reparto de agua. Poder pronosticar no sólo que se producirán cambios en los caudales y en el agua contenida en los acuíferos sino poder cuantificarlo y ofrecer magnitudes sobre la evolución que sufrirán los distintos flujos y reservorios de agua en función de los distintos escenarios de cambio climático planteada por los científicos es fundamental a la hora de realizar una planificación y gestión de los recursos a largo plazo.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se enmarca dentro del proyecto "Estudio piloto para la gestión integrada de la cuenca del río Guadalfeo" financiado por la Agencia Andaluza del Agua y participante en el proyecto "Bassins Versants Méditerranéens" del programa Interreg III B – MEDOCC de la Unión Europea.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdulla, F. A., Al-Omari, A. S. (2008) *Impact of climate change on the monthly runoff of a semi-arid catchment: Case study Zarqa River Basin*. Journal of Applied Biological Sciences 2 (1): 43-50
- Bathurst, J.C., O'Connell, P.E. (1992). *Future of distributed parameter modeling: The Systeme Hydrologique Europeen*. Hydrological Processes 6, 265–277.
- Beven, K. (1989). *Change ideas in hydrology – The case of physically based models*. Journal of Hydrology 105, 157–172
- European Environment Agency, (2008). *Impacts of Europe's changing climate-2008*. Indicator based assessment. EEA Report 4.
- Herrero J., Polo, M.J., Moñino, A., Losada, M.A., (2009a). *An energy balance snowmelt model in a Mediterranean site*. Journal of Hydrology 371, pp. 98-107
- Herrero, J., Millares, A., Aguilar, C., Díaz, A., Polo, M.J., Losada, M.A., (2009b). *WiM-Med 1.0. Base Teórica. Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales (Universidad de Granada) and Grupo de Hidrología e Hidráulica Agrícola (Universidad de Córdoba)*.
- Jiang, T., Chen, Y. D., Xu, C., Chen, X., Chen, X., Singh, V. P. (2007) *Comparison of hydrological impacts of climate change simulated by six hydrological models in the Dongjiang Basin, South China*. Journal of Hydrology 336, 316– 333
- Millares, A., (2008). *Integración del caudal base en un modelo distribuido de cuenca*. Estudio de las aportaciones subterráneas en días de montaña. Tesis doctoral. Universidad de Granada
- Millares, A., Aguilar, C., Herrero, J., Ávila, A., Moñino, A., Nieto, S., Vega, C., Polo, M.J., Losada, M.A., (2008). *Proyecto Guadalfeo; Modelo de gestión integral de cuencas mediterráneas*. INTERREG-IV, MEDOCC, Agencia Andaluza del Agua.  
<http://www.cuencaguadalfeo.com/archivos/Resumen Interreg.pdf>
- Peng, D. Z., Xu, Z. X. (2010) *Simulating the Impact of climate change on streamflow in the Tarim River basin by using a modified semi-distributed monthly water balance model*. Hydrological processes 24, 209-216
- Running, S.W., Nemani, R.R. (1991). *Regional hydrologic carbon balance responses of forests resulting from potential climate change*. Climatic Change 19, 349–368.
- Serrat-Capdevilla, A., Valdés, J. B., González Pérez, J., Baird, D., Mata, L. J., Maddock, T. (2007) *Modeling climate change impacts – and uncertainty - on the hydrology of a riparian system: The San Pedro Basin (Arizona/Sonora)* Journal of Hydrology 347, 48-66

Shen, Y., Chen, Y. (2010) *Global perspective on hydrology, water balance, and water resources management in arid basins*. Hydrological processes 24, 129-135

Thomsen, R. (1990). *Effect of climate variability and change ingroundwater in Europe*. Nordic Hydrology 21, 185–194.

Wilby, R. L., Beven, K. J., Reynard, N. S. (2008) *Climate change and fluvial flood risk in the UK: more of the same?* Hydrological processes 22, 2511–2523