

## EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LOS RECURSOS DISPONIBLE EN SISTEMAS CARBONÁTICOS DEL SUR DE ESPAÑA. IMPORTANCIA DE SU CONOCIMIENTO EN LA CUENCA DEL RÍO ZAZA (CUBA)

Pablo Jiménez Gavilán <sup>(1)</sup>, Pedro Jiménez Fernández <sup>(1)</sup> y Osmany Ceballo Melendres <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Departamento de Geología y Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (CEHIUMA). Campus de Teatinos, s/n. 29071, Málaga, España. [pgavilan@uma.es](mailto:pgavilan@uma.es) y [pejifer@uma.es](mailto:pejifer@uma.es)

<sup>(2)</sup> Università Politecnica della Marche-Italia, Cuba, [o.ceballo@univpm.it](mailto:o.ceballo@univpm.it)

### Resumen

Disponer de modelos que reflejen la realidad de funcionamiento de un sistema hídrico se torna fundamental para la gestión eficaz de los recursos hídricos de una cuenca, máxime teniendo en cuenta los diferentes escenarios de cambio climático pronosticados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) en el informe AR5, que estima un aumento de las temperaturas medias, así como un descenso del régimen pluviométrico entre un 10 y 30% para la región mediterránea. El presente trabajo intenta determinar, de manera preliminar, los posibles impactos que estos escenarios pueden tener sobre los recursos hídricos de dos sistemas acuíferos que presentan diferentes comportamientos hidrogeológicos. Los resultados obtenidos en el Sur de España, así como la necesidad de abordar la gestión integrada de los recursos hídricos de la Cuenca Hidrográfica del río Zaza, ponen de manifiesto la obligación de modelizar las respuestas de los acuíferos carbonáticos que forman parte de esta cuenca hidrográfica, valorando tanto el grado de afección al recurso hídrico frente a eventuales episodios de sequía como las potenciales implicaciones socio-ambientales que conllevarían.

**Palabras clave:** Modelo Sacramento, Sistemas carbonáticos, Cambio climático, Recurso hídrico.

## MODELLING OF LAST HYPOTHESIS OF CLIMATE CHANGE IMPACTS ON AVAILABLE WATER RESOURCES IN CARBONATIC SYSTEMS OF SOUTHERN SPAIN. IMPORTANCE OF YOUR KNOWLEDGE ON THE RIVER BASIN ZAZA (CUBA)

### Abstract

Having models that reflect the reality of a system operation becomes critical to the effective management of water resources in a watershed, especially considering the different scenes of climate change predicted for the Mediterranean regions by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). The fifth Assessment Report of IPCC (AR5) estimates an increase in average temperatures and a precipitation decrease between 10 and 30% for Mediterranean region. The present research tries to determinate the potential impacts that climate change may have on water resources of two aquifer systems that present different hydrogeological behaviours. The results obtained in Southern Spain, as well as the need to address the integrated management of water resources basin of Zaza River demonstrate the obligation to model the responses of carbonatic aquifers which are part of this basin and taking into account the degree assessing of affection to the water resources opposite to eventual episodes of drought, and the social and environmental implications that will result have been also determined.

**Keywords:** Sacramento model, Carbonatic systems, Climate Change, Water resources

# 1. INTRODUCCIÓN

Poder determinar los posibles impactos que el cambio climático puede tener sobre los recursos hídricos es una tarea complicada, debido a la escasez de datos disponibles para la calibración de los modelos, así como al elevado índice de explotación (relación entre el recurso disponible y el grado de aprovechamiento artificial) que presentan las masas de agua de la región de estudio, lo que hace casi imposible la modelización bajo condiciones de funcionamiento del sistema en régimen natural.

Los sistemas carbonáticos Sierra de Líbar y Sierra de las Cabras se encuentran situados al sur de España (Figura 1A).

La Sierra de Líbar está constituida por una importante alineación montañosa de dirección NE-SW, forma parte de la Zona Externa de la Cordillera Bética, concretamente del denominado Penibético o Subbético Interno occidental (Martín-Algarra, 1987). La serie estratigráfica general de este dominio geológico está formado, de muro a techo, por tres conjuntos litológicos: dolomías negras del Trías Medio y arcillas con evaporitas del Trías Superior, dolomías y calizas del Jurásico y margas y margocalizas del Cretácico. Debido a la coexistencia de litologías solubles, la disposición de los estratos, la importante fracturación y la elevada precipitación de la zona (1500 mm/año de valor medio), la Sierra de Líbar presenta un desarrollo espectacular del modelado kárstico (Delannoy, 1998; Gracia et al., 2000; Jiménez, 2011). Las calizas y dolomías que afloran en la Sierra de Líbar son permeables por fracturación y karstificación, por lo que constituyen un importante acuífero (Jiménez, 2011), con un espesor de más de 400 m (Figura 1B).

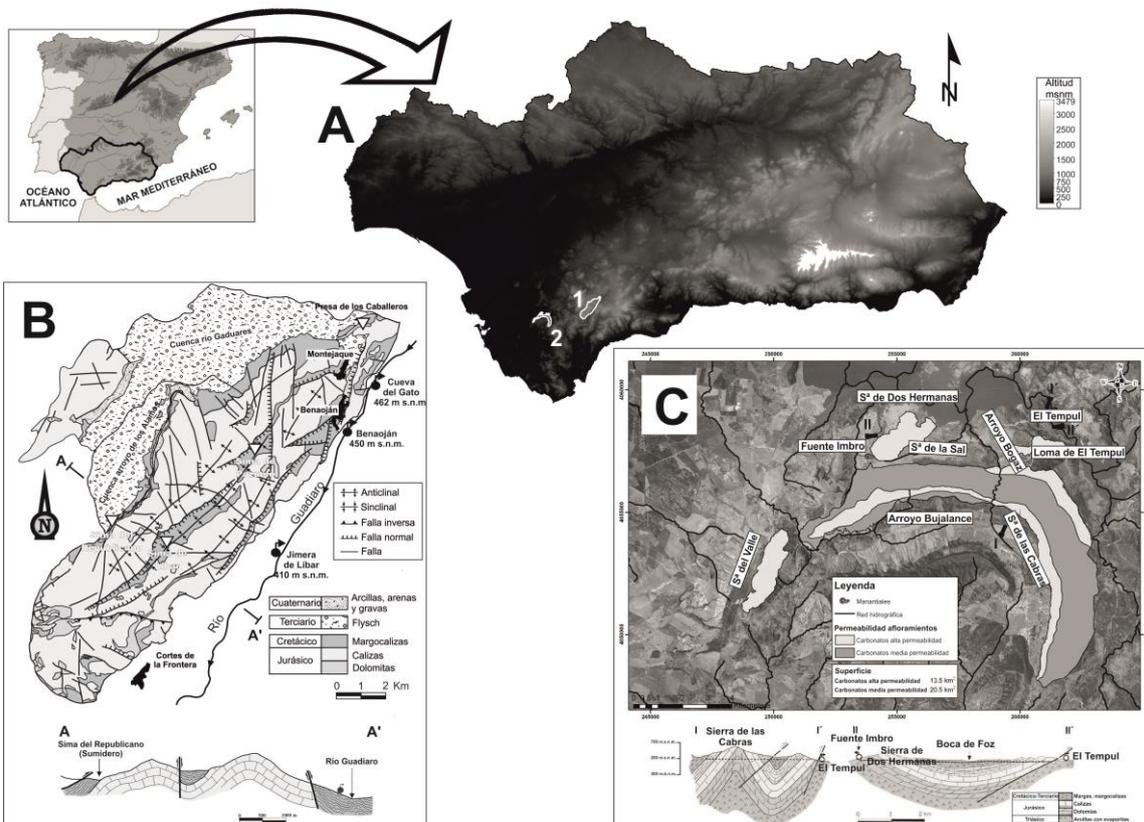


Figura 1. (A) Situación, (B) Sierra de Líbar y (C) Sierra de las Cabras (modificado de Andreo et al., 2006 y de Martín-Algarra, 1987).

Los diferentes materiales que afloran en la zona de estudio se han agrupado en tres categorías según sus comportamientos hidrológicos: impermeables, carbonatos de media permeabilidad y carbonatos de alta permeabilidad.

Por otro parte, el acuífero de la Sierra de las Cabras incluye, de oeste a este, las sierras del Valle, Dos Hermanas, de la Sal, de las Cabras y Loma del Tempul. Todos estos relieves constituyen una cordillera de 42 km<sup>2</sup>, cuya forma en planta es una media luna con la concavidad abierta hacia el suroeste. La Sierra de las Cabras es atravesada por dos arroyos: Bogaz y Bujalance (Figura 1C).

Los materiales de la Sierra de las Cabras pertenecen a la unidad del mismo nombre, dentro del dominio Subbético Medio de la Zona Externa de la Cordillera Bética (Martín-Algarra, 1987; ITGE, 1990). La serie estratigráfica se compone de tres unidades litológicas principales (de muro a techo): triásica de facies germano-andaluza (Keuper), jurásica de naturaleza calcáreo-dolomítica con 300 metros de espesor y cretácico-terciaria de carácter margoso (Jiménez, 2011).

El estudio hidrodinámico del manantial de El Tempul muestra que este acuífero tiene un comportamiento hidrogeológico predominantemente inercial, indicativo de un bajo grado de karstificación funcional y, en este caso, de reservas de agua subterránea significativas (Jiménez, 2011).

Los diferentes materiales que afloran en la zona de estudio se han agrupado en dos categorías según sus comportamientos hidrológicos: carbonatos de media permeabilidad y carbonatos de alta permeabilidad.

La evaluación del recurso hídrico es un aspecto fundamental a tener en cuenta para una correcta planificación y gestión del mismo. Básicamente, existen dos metodologías para evaluar el recurso hídrico: la restitución a régimen natural y la modelación precipitación-escorrentía. El primer objetivo de la presente investigación es el modelado de los recursos hídricos a nivel mensual de la Sierra de Líbar y de la Sierra de las Cabras utilizando el modelo Sacramento (Burnash et al., 1973), mediante el software *EvalHid* (Paredes-Arquiola et al., 2012), desarrollado por el Área de Ingeniería de Recursos Hídricos del Instituto Universitario de Investigación de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA-UPV). El segundo objetivo es simular las proyecciones del IPCC del cambio climático para esta área de estudio (región mediterránea), recogidas en el AR5, donde se definen cuatro nuevos escenarios de emisiones (IPCC, 2013) y comparar los resultados obtenidos para los dos sistemas, que presentan comportamientos hidrogeológicos diferentes, la Sierra de Líbar es un sistema muy poco inercial, mientras que por el contrario la Sierra de las Cabras es un sistema muy inercial, ambos de naturaleza carbonática (Jiménez, 2011). Por último, se evalúa de manera preliminar, la necesidad de conocer los efectos de las dichas proyecciones en los acuíferos kársticos que forman parte de la cuenca hidrográfica del río Zaza (Cuba).

## 2. METODOLOGÍA

Para poder alcanzar los objetivos expuestos en el apartado anterior se ha seguido la siguiente metodología.

### 2.1 Recopilación bibliográfica

Se ha llevado a cabo un análisis detallado de toda la información referente a la aplicación de metodologías para la caracterización del funcionamiento hidrodinámico

de los acuíferos, pero en particular en relación con los acuíferos de la cordillera Bética (Delannoy, 1998; Jiménez, 2011).

El IPCC ha publicado en Octubre del 2014 el Quinto Informe de Evaluación (AR5), en el que se definen los nuevos escenarios de cambio climático estimados por dicho organismo. Los escenarios utilizados en el Grupo de trabajo I del IPCC se han centrado en las emisiones antropogénicas y no incluyen cambios en impulsores naturales, como el forzamiento solar o volcánico o las emisiones naturales, por ejemplo, de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O (IPCC, 2013).

Para el AR5, la comunidad científica ha definido un conjunto de cuatro nuevos escenarios, denominados trayectorias de concentración representativas (RCP), que se caracterizan por el cálculo aproximado que hacen del forzamiento radiativo total en el año 2100 en relación con 1750, esto es, 2,6 W m<sup>-2</sup>, en el caso del escenario RCP2,6; 4,5 W m<sup>-2</sup>, en el caso del escenario RCP4,5; 6,0 W m<sup>-2</sup>, en el caso del escenario RCP6,0, y 8,5 W m<sup>-2</sup>, en el caso del escenario RCP8,5 (IPCC, 2013). Los cuatro escenarios de RCP comprenden un escenario de mitigación conducente a un nivel de forzamiento muy bajo (RCP2,6); dos escenarios de estabilización (RCP4,5 y RCP6,0), y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero (RCP8,5). Por consiguiente, los escenarios de RCP pueden representar una variedad de políticas climáticas del siglo XXI, frente a los Escenarios del Informe especial sobre escenarios de emisiones (SRES), que no contemplaban políticas climáticas, utilizados en el tercer y cuarto Informe de Evaluación (IPCC, 2013).

En el presente estudio se han considerado las previsiones llevadas a cabo por los modelos de circulación global (percentil 75) para esta zona de estudio (región mediterránea) y para los escenarios menos favorables, RCP4,5 y RCP8,5 (Tabla 1).

Fecha	Temperatura °C					
	2016-2035	2016-2035	2046-2065	2046-2065	2081-2100	2081-2100
	RCP4,5	RCP4,5	RCP4,5	RCP8,5	RCP8,5	RCP8,5
Dic-Feb	1	2	2	1	3	4
Mar-May	1.5	2	3	1.5	3	5
Jun-Ago	1.5	3	3	2	4	7
Sep-Nov	1.5	2	3	1.5	3	5
Fecha	Precipitación %					
	2016-2035	2016-2035	2046-2065	2046-2065	2081-2100	2081-2100
	RCP4,5	RCP4,5	RCP4,5	RCP8,5	RCP8,5	RCP8,5
Oct-Mar	0	-10	-10	0	-10	-20
Abr-Sep	-10	-10	-10	0	-20	-30

Tabla. 1. Previsiones de cambio climático para los escenarios RCP4,5 y RCP8,5. Percentil 75 de los diferentes modelos utilizados (IPCC, 2013).

## 2.2 Recopilación de datos hidrometeorológicos

El modelo SIMPA (Cabezas et al., 1999; Ruiz, 1999; Estrela y Quintas, 1996) proporciona información de los principales componentes del ciclo hidrológico en régimen natural. Esta información está contenida en capas ráster que cubren todo el territorio de España sobre una base mensual entre 1940 y 2012. Se ha desarrollado una herramienta SIG para extraer información sobre la precipitación, la temperatura y la evapotranspiración potencial (ETP).

## 2.3 Modelización y calibración del modelo

Se han utilizado los datos comprendidos entre 1986-1995 para calibrar el modelo, ya que éste es el período que tiene datos de caudal diario drenados por el manantial

de El Tempul. Los parámetros utilizados por el modelo Sacramento para la calibración se han determinado (Tabla 2).

Parámetro	Materiales				
	Sierra de Líbar			Sierra de las Cabras	
	Impermeables	Carbonatos media permeabilidad	Carbonatos alta permeabilidad	Carbonatos media permeabilidad	Carbonatos alta permeabilidad
Uztwm	105.00	80.00	50.00	120.00	80.00
Uzfw	30.25	150.00	500.00	210.00	230.00
Uzk	0.58	0.20	0.05	0.06	0.08
Pctim	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Adimp	0.16	0.10	0.00	0.00	0.00
Riva	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Zperc	60.69	20.77	6.77	6.00	10.00
Rexp	0.87	0.28	0.65	0.50	0.80
Lztwm	104.32	188.48	107.08	75.00	65.00
Lzfs	84.24	300.00	400.00	245.00	300.00
Lzfp	126.30	350.00	500.00	300.00	300.00
Lzk	0.14	0.64	0.75	0.15	0.28
Lzk	0.01	0.09	0.51	0.00	0.01
Pfree	0.44	0.44	0.74	0.20	0.30
Side	0.00	0.00	0.00	0.15	0.15
Rserv	0.00	0.50	0.90	0.80	0.90
Dt	1.00	1.00	1.00	1.80	1.80

Tabla 2. Valor de los parámetros utilizados en el modelo Sacramento.

## 2.4 Cambio climático

Se han simulado para la zona de estudio, las previsiones de cambio climático que se recogen en el Quinto Informe de Evaluación del IPCC para los escenarios RCP4,5 y RCP8,5 y los periodos 2016-2035, 2046-2065 y 2081-2100. Las series de datos se han construido tomando como referencia los datos procedentes del modelo SIMPA para el periodo 1986-2005. Estas series se han construido introduciendo los cambios temporales previstos (temperatura y precipitación) recogidos en el AR5 para la zona mediterránea, discriminando los resultados específicos para el área de estudio (Figura 2).

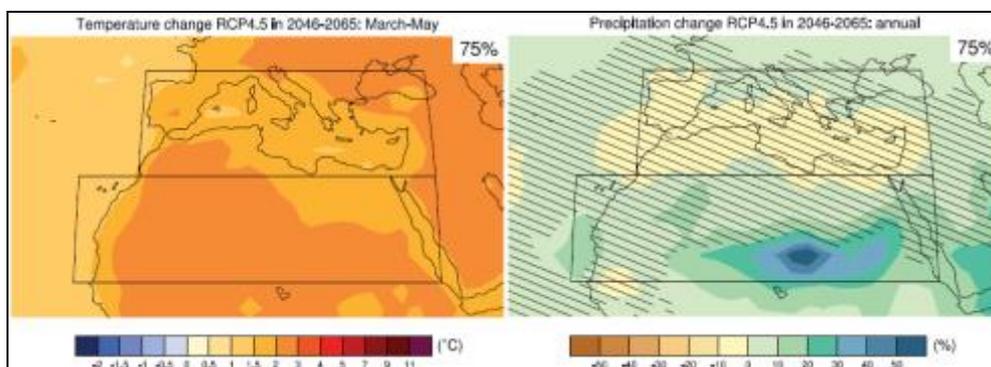


Figura 2. Mapa de los cambios en la temperatura y precipitación para el escenario RCP4.5 (IPCC, 2013).

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los recursos hídricos de los dos sistemas, simulados por el modelo Sacramento, muestran un descenso mayor de lo esperado teniendo sólo en cuenta la variación de la precipitación en los diferentes escenarios (Tabla 1) y con respecto al periodo de referencia comprendido entre 1986 y 2005 (Tabla 3). Esto se debe al aumento de los valores de evapotranspiración potencial, asociado al aumento de temperatura y que provoca una evapotranspiración real más alta. Esto provoca un cambio en las condiciones de humedad del suelo, por lo que parte de la precipitación que formaría

parte de esta componente se detrae de la misma, para suplir el déficit de humedad del suelo.

Mes		Disminución de porcentaje en el recurso hídrico respecto al periodo de referencia %											
		S. Líbar		S. Cabras		S. Líbar		S. Cabras		S. Líbar		S. Cabras	
		2016-2035	2016-2035	2046-2065	2046-2065	2081-2100	2081-2100	2016-2035	2016-2035	2046-2065	2046-2065	2081-2100	2081-2100
		RCP 4,5 (1)	RCP 4,5 (1)	RCP 4,5 (2)	RCP 4,5 (2)	RCP 4,5 (3)	RCP 4,5 (3)	RCP 8,5 (1)	RCP 8,5 (1)	RCP 8,5 (2)	RCP 8,5 (2)	RCP 8,5 (3)	RCP 8,5 (3)
Oct	10	8.91	7.11	23.77	22.99	24.69	24.57	5.08	4.24	28.22	26.56	44.44	43.01
Nov	11	7.5	6.13	24.41	26.92	26.39	29.30	5.78	4.16	27.61	29.88	45.78	49.44
Dic	12	3.89	4.47	19.63	27.91	20.11	29.40	3.2	3.35	21.46	30.61	37.09	52.44
Ene	1	3.75	2.91	17.9	24.71	17.59	24.85	3.29	1.94	19.15	27.10	31.97	45.28
Feb	2	3.3	2.42	16.38	20.27	15.62	19.63	2.72	1.45	18.01	23.03	29.44	38.53
Mar	3	3.93	3.71	17.99	22.57	18.95	22.87	3.24	2.55	19.94	26.24	33.57	43.14
Abr	4	13	6.10	21.92	24.46	24.28	25.93	5.11	3.93	30.52	29.00	45.93	46.91
May	5	15.83	9.82	21.73	26.46	24.56	28.42	5.71	5.36	32.76	32.16	48.55	49.35
Jun	6	15.11	11.47	21.12	27.22	22.91	29.15	6.53	6.06	30.85	32.78	45.49	49.20
Jul	7	12.68	10.95	18.36	25.98	19.7	27.85	5.16	6.04	26.65	31.20	39.8	47.07
Ago	8	10.49	10.14	15.87	24.42	16.98	26.20	4.05	5.70	23.17	29.25	35.66	44.48
Sep	9	13.31	9.32	17.38	22.68	18.27	24.36	3.94	5.27	27.16	27.25	40.58	41.69
Total		6.46	5.54	18.53	24.42	20.24	25.32	3.93	3.39	23.07	28.08	37.44	45.61

Tabla 3. Disminución de porcentaje en el recurso hídrico respecto al periodo de referencia %.

Esta disminución de los recursos hídricos producirá eventos de sequía que comprometerán a largo plazo el cumplimiento de los objetivos ambientales cualitativos y cuantitativos de las masas de agua superficiales y subterráneas asociadas a estos sistemas y que fija la Directiva Marco Europea del Agua (EU, 2000) y la Directiva de Aguas Subterráneas (EU, 2006). A su vez, en el caso de la Sierra de Líbar, afectará a la disponibilidad de recursos para la cuenca baja del río Guadiaro, una zona con una elevada demanda de recursos para regadío y abastecimiento y en la que se prevé un aumento de la demanda para ambos tipos de uso (BOJA, 2013).

La Sierra de Líbar es un medio muy poco inercial debido al elevado desarrollo kárstico que presenta, frente a la Sierra de las Cabras que es un medio muy inercial con un menor desarrollo kárstico.

El mayor descenso porcentual en los recursos hídricos de la Sierra de las Cabras frente a los de la Sierra de Líbar para los periodos simulados comprendidos entre 2046-2065 y 2081-2100, se debe a la mayor inercialidad de este sistema, lo que provoca un mayor tiempo de residencia de los recursos en el medio y, por tanto, mayor tiempo disponible para ser evapotranspirados.

La cuenca hidrográfica del río Zaza, ubicada la zona central de Cuba, constituye la segunda cuenca hidrográfica más extensa del país (2.413 km<sup>2</sup>), lo cual representa el 2,2% del territorio nacional (Figura 3). En esta cuenca se ubica el mayor embalse del país (Zaza), con capacidad máxima de 1020 hm<sup>3</sup> de agua embalsada, y podría pensarse que no existen problemas de suministro de recursos hídricos para satisfacer las demandas de agua; sin embargo, la irregular distribución espacial de esas precipitaciones, un alto consumo para la agricultura e industria y, en menor medida para abastecimiento, así como una gestión y planificación hidrológica no integrada de los recursos hídricos (Ceballo et al., 2015), se traduce en escasez de agua (sequía) y en importantes afecciones ambientales, fundamentalmente, en la llanura pantanosa palustre marina (manglar), en la desembocadura del río Zaza. Por todos estos motivos, junto con los probables impactos futuros del cambio climático global, en los que se esperan mayores dificultades para satisfacer las demandas en estos sistemas al reducirse la recarga de agua dulce, ligera subida del nivel del mar e incremento de las necesidades de riego (Paz, 2010), resulta necesario determinar

los posibles impactos que el cambio climático puede tener sobre los recursos hídricos de esta cuenca.

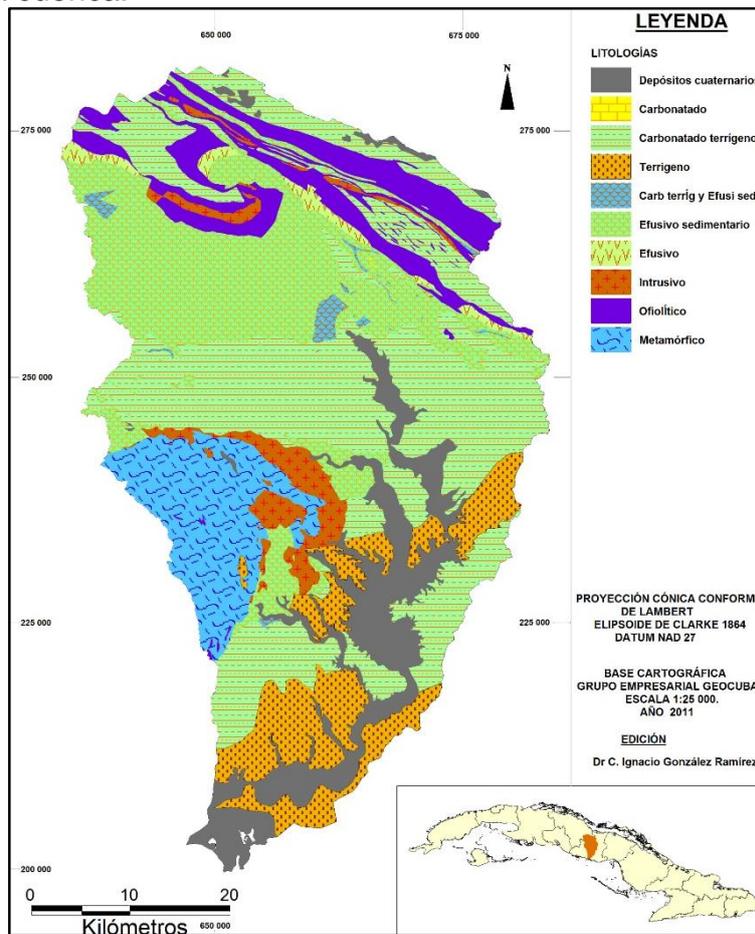


Figura 3. Mapa Litológico de la Cuenca Hidrográfica del Río Zaza

Aunque los diferentes escenarios de cambio climático pronosticados por el Grupo I de Trabajo del Equipo Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en el informe AR5 para la cuenca del Zaza (Tabla 4), no son tan severos en cuanto al descenso del régimen pluviométrico como los de la región mediterránea (Tabla 1), el aumento de las temperaturas medias previstos para la Cuenca del Zaza sí son del mismo rango (máximo de 3°C) que para la región mediterránea. Por todo ello y, teniendo en cuenta por un lado que los acuíferos carbonáticos (cuencas hidrogeológicas karstificables en el lenguaje de política de gestión hídrica cubana) son bastante importantes en la cuenca hidrográfica del río Zaza (SS Meneses, Potrerillo, Iguará-Taguasco, Sancti Spíritus, Banao y Guasimal) y, por otro, el descenso de los recursos hídricos calculados en acuíferos carbonáticos mediterráneos como consecuencia del aumento de los valores de evapotranspiración potencial (asociado al aumento de temperatura que proyecta el IPCC, 2013), parece razonable abordar estos potenciales impactos, a la mayor brevedad posible, en el contexto de la Cuenca Hidrográfica del río Zaza.

Fecha	Temperatura °C					
	RCP4,5			RCP8,5		
	2016-2035	2046-2065	2081-2100	2016-2035	2046-2065	2081-2100
Dic-Feb	1	1,5	2	1	1,5	3
Mar-May	1	1,5	2	1	2	3
Jun-Ago	1	2	3	1	2	3
Sep-Nov	1	2	3	1	2	3
Fecha	Precipitación %					
	RCP4,5			RCP8,5		
	2016-2035	2046-2065	2081-2100	2016-2035	2046-2065	2081-2100
Oct-Mar	20	20	20	20	20	20
Abr-Sep	10	-10	-10	10	-10	-20

Tabla 4. Previsiones de cambio climático en la Cuenca Hidrográfica del Río Zaza para los escenarios RCP4,5 y RCP8,5. Percentil 75 de los diferentes modelos utilizados (IPCC, 2013)

#### 4. CONCLUSIONES

El presente estudio concluye que el modelo Sacramento es representativo de la realidad de funcionamiento de este tipo de sistemas carbonáticos. Este resultado es debido en gran medida al elevado número de parámetros utilizados por el modelo, lo que permite definir con mayor precisión los diferentes componentes que forman parte del sistema y los procesos que en ellos ocurren.

Los valores estimados en el presente estudio para los diferentes parámetros que utiliza el modelo Sacramento pueden considerarse, a priori, útiles para aquellos sistemas que presenten un funcionamiento hidrogeológico similar, y de los que no se dispongan de series de datos de hidrometría para poder llevar a cabo una calibración de los mismos.

La capacidad de regulación que presentan los sistemas acuíferos mediterráneos analizados, menor en la Sierra de Líbar que en la Sierra de las Cabras, no permite amortiguar los efectos del cambio climático, provocando en éstos un gran impacto. Sin embargo, la afección es mayor en medios más inerciales, puestos de manifiesto anteriormente por métodos de caracterización hidrodinámica e hidroquímica (Jiménez, 2011), ya que permiten un mayor tiempo de residencia de los recursos en el medio y, por tanto, mayor afección por parte de la evapotranspiración.

La respuesta hidrológica de un sistema bajo las condiciones de cambio climático están condicionadas por fuentes de incertidumbres, derivadas de los modelos seleccionados y la aplicación de los mismos, así como por los futuros cambios en el uso del suelo que se puedan dar en el medio.

Los resultados obtenidos para los diferentes escenarios de cambio climático tratados en el presente estudio han de considerarse como preliminares. No obstante, los resultados obtenidos están en sintonía con las predicciones que para la región mediterránea se recogen en el AR5.

Los resultados obtenidos en los acuíferos carbonáticos del Sur de España (región mediterránea) y la necesidad de abordar la gestión integrada de los recursos hídricos de la Cuenca Hidrográfica del río Zaza, ponen de manifiesto la obligación de modelizar las respuestas de los acuíferos carbonáticos que forman parte de esta cuenca hidrográfica. Por ello, y aunque pueda resultar una tarea complicada debido a la escasez de datos disponibles para la calibración de los modelos, alumnos de máster y grado de la Universidad de Málaga, a través del Proyecto de Voluntariado Internacional Universitario “EStudio y mejora de la planificación y GEstión de los

REcursos Hídricos en la cuenca del río Zaza (Cuba). Definición de políticas y estrategias de adaptación a los futuros impactos del cambio climático global (ESGEREHIZA)", colaborarán con la Universidad de Sancti Spíritus y el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA) de Cuba para mejorar el conocimiento y gestión hídrica de la Cuenca del Río Zaza, de manera que los resultados puedan ser integrados a través de políticas y estrategias de adaptación debido a las potenciales implicaciones socio-ambientales que produciría.

Finalmente, para una correcta planificación y gestión integrada de los recursos hídricos, se recomienda el uso del modelo Sacramento para la simulación del funcionamiento de las cuencas hidrogeológicas, siempre que se tenga un cierto conocimiento previo de la zona de estudio, así como no perder de vista las incertidumbres y el valor del nivel de confianza que se puedan alcanzar en la regionalización de los datos de las diferentes proyecciones de los escenarios de cambio climático, aunque sí deben ser considerados para las futuras políticas ambientales a seguir a nivel global y regional con el fin de mitigar los posibles efectos previsibles del cambio climático.

#### Agradecimientos

Este trabajo es una contribución al proyecto Water Accounting in a Multi-Catchment District (WAMCD-8.06.UE/44.7066) de la Comisión Europea y al Grupo de Investigación RNM-308 de la Junta de Andalucía (España).

#### REFERENCIAS

- Andreo, B., Carrasco, F., Bakalowicz, M., Mudry, J. y Vadillo, I., 2002. Use of hydrodynamic and hydrochemistry to characterise carbonate aquifers. Case study of the Blanca-Mijas unit (Málaga, southern Spain). *Environmental Geology*, 43 (1-2): 108-119.
- Andreo, B., Goldscheider, N., Vadillo I., Vías, J.M., Neukum, C., Sinreich, M., Jiménez, P., Brechenmacher, J., Carrasco, F., Hötzl, H., Perles, M. J. and Zwahlen, F., 2006. Karst groundwater protection: First application of a Pan-European Approach to vulnerability, hazard and risk mapping in the Sierra de Líbar (Southern Spain). *Science of the Total Environment*, 357(1-3): 54-73.
- BOJA, 2013. Orden de 2 de julio de 2013, por la que se dispone la publicación de las determinaciones de contenido normativo del Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas, aprobado por el Real Decreto 1331/2012, de 14 de septiembre. *Boletín Oficial de la Junta de Andalucía*, 138, pp. 67-289. <http://www.juntadeandalucia.es/boja/2013/138/16>
- Burnash, R.J., Ferral, R.L. and McGuire, R.A., 1973. A Generalized Streamflow Simulation System-Conceptual Modeling for Digital Computers. Joint Federal-State River Forecast Center, Sacramento, CA. 204 p.
- Cabezas, F., Estrada, F. y Estrela, T., 1999. Algunas contribuciones técnicas del Libro Blanco del Agua en España. *Ingeniería Civil*, 115, 79-96.
- Delannoy, J.J., 1998. Contribución al conocimiento de los macizos kársticos de las Serranías de Grazalema y de Ronda. En: J.J Durán y J.L. Martínez (Eds.) *El Karst en Andalucía*, Instituto Tecnológico Geominero de España; Madrid (España), 93-129.
- Durán, J.J., 1996. Los sistemas kársticos de la provincia de Málaga y su evolución: contribución al conocimiento paleoclimático del Cuaternario en el Mediterráneo

- Occidental. Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid (España). 409 páginas.
- Estrela, T. y Quintas, L., 1996. El sistema integrado de modelización precipitación-aportación SIMPA. *Ingeniería Civil*, 104, 43-52.
- EU, 2000. Water framework directive, 2000, Directive 2000/60/EC of the European parliament and the council of 23 October 2000. Establishing a framework for community action in the field of water policy. In: E. Commission (Ed.), *Official Journal of the European Communities*, pp. L 327/1.
- EU, 2006. Groundwater directive, 2006, directive 2006/118/EC of the European parliament and the council of 12 December 2006. On the protection of groundwater against pollution and deterioration. In: E. Commission (Ed.), *Official Journal of the European Union*, pp. L 372/19.
- Gracia, F.J., Benavente, J. y Anfuso, G., 2000. Implicaciones endokársticas de la evolución geomorfológica de los poljes de Zurraque y Burfo (Sierra de Líbar, Málaga). En A. Santiago, A. Martínez y J. Mayoral (Eds.) *Actas del Primer Congreso Andaluz de Espeleología*. Ronda, Excmo. Ayuntamiento de Ronda, 341-351.
- IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- ITGE, 1990. Mapa geológico de España 1:50.000. Hoja 1063 Algar. Madrid (España).
- Jiménez, P., 2011. Los acuíferos carbonáticos del Sur de España. Caracterización y clasificación a partir de sus respuestas naturales. Académica Española – Lap Lambert Academic Publishing GmbH & Co. 384 p.
- Martín Algarra, A., 1987. Evolución geológica Alpina del contacto entre las Zonas Internas y las Zonas Externas de la Cordillera Bética (Sector Occidental). Tesis Doctoral, Universidad de Granada (España). 1171 páginas.
- Ceballo, O., Galli, A., González, I., Romeu, O. y Domínguez, A. 2015. Modelo de gestión integrada de los recursos hídricos en cuencas hidrográficas y de adaptación al cambio climático. VII Congreso de Gestión Ambiental. X Convención Internacional sobre Medio Ambiente. La Habana (Cuba)
- Paredes-Arquiola, J., Solera Solera, A., Andreu Álvarez, J. y Lerma Elvira, N., 2012. Manual técnico de la herramienta EVALHID para la evaluación de recursos hídricos. Grupo de Ingeniería de Recursos Hídricos. Universitat Politècnica de València.
- Paz Castro, C.L. (2010). El cambio climático y sus consecuencias para Cuba. *Revista Bimestre Cubana*, Vol 107, No 32
- Ruiz, J. M., 1999. Modelo distribuido para la evaluación de recursos hídricos. Monografías CEDEX M67.