Análisis integral del impacto del Cambio Climático en los regímenes de agua, crecidas y sedimentos de una rambla mediterránea

Montalvo, C.[a1] y Francés, F.[a2]

[a]Grupo de Investigación de Modelación Hidrológica y Ambiental (GIMHA), Instituto de Ingeniería del Agua y el Medio Ambiente (IIAMA), Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia. [a1]carlosimm77@gmail.com, [a2]ffrances@upv.es.

Línea temática B | Hidrología, usos y gestión del agua.

RESUMEN

El cambio climático y sus efectos en el Ciclo Hidrológico es un tema muy importante en todo el planeta, en la medida que estimar sus efectos tiene un papel preventivo. Esto además es crítico en las cuencas del arco mediterráneo español, dado que actualmente ya presentan un alto estrés hídrico y fuertes alteraciones antrópicas de su régimen. El caso de estudio es el de la Rambla de la Viuda. Dentro de la misma se encuentran los embalses de Mª. Cristina y Alcora, el primero de ellos con problemas de aterramiento y probable infra-dimensionamiento de su aliviadero, por lo que es prioritario el conocimiento de lo que pueda ocurrir con este embalse en el futuro. Los posibles efectos del Cambio Climático en la cuenca de la Rambla de la Viuda se han estimado utilizando el modelo hidrológico distribuido TETIS y su sub-modelo de sedimentos incorporado. La información meteorológica empleada proviene de escenarios climáticos regionalizados acordes con el quinto informe AR5 del IPCC, información que tuvo que ser corregida debido a errores relacionados con su resolución y/o hipótesis de regionalización. Los resultados de la modelización indican que en lo que respecta al clima, no hay una señal clara de cambios en la precipitación, tanto en cantidad como en torrencialidad, aunque si es evidente el futuro aumento de temperaturas que se traducirá en un incremento de la evapotranspiración de referencia. Tras la modelización, dicho incremento da lugar a una reducción de los recursos disponibles, tanto superficiales como subterráneos, pero al mismo tiempo a una disminución en los cuantiles de crecida, por lo que consecuentemente cabe esperar también en el futuro una disminución de los aportes de sedimentos al embalse de Mª Cristina.

INTRODUCCIÓN

Se conoce como Cambio Climático al resultado del desequilibrio en el balance energético de la Tierra causado por procesos y agentes naturales y/o antropogénicos. Con cierta incertidumbre, se asume que la influencia humana es la causa dominante de más de la mitad del cambio observado en la temperatura media global en el periodo 1950-2010. Con efectos como: la fusión de hielo y nieve, el calentamiento de los océanos, la elevación del nivel del mar, alteraciones en la magnitud y frecuencia de extremos climáticos, que ya han sido observado en la segunda mitad del siglo XX (Rodríguez et al., 2014).

El Cambio Climático y sus efectos en el Ciclo Hidrológico es un tema muy importante en todo el planeta, en la medida que estimar sus efectos tiene un papel preventivo. Esto además es crítico en las cuencas del arco mediterráneo español, dado que actualmente ya presentan un alto estrés hídrico y fuertes alteraciones antrópicas de su régimen. La utilización de modelos hidrológicos cobra un papel importante, tanto para identificar los efectos actuales del Cambio Climático, como para plantear posibles escenarios futuros bajo condiciones específicas, que permitan tomar medidas preventivas adecuadas.

E objetivo de este trabajo es estimar los posibles efectos del Cambio Climático en la cuenca de la Rambla de la Viuda utilizando el modelo hidrológico distribuido TETIS (GIMHA, 2017) y las proyecciones climáticas para la geografía española puestas a disposición pública por la Agencia Estatal de Meteorología de España (AEMET) para los diferentes escenarios planteados por el Panel Intergubernamental de Expertos Sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) en su quinto informe AR5 (AEMET, 2017).

MATERIAL Y MÉTODOS

Caso de estudio

El caso de estudio es el de la Rambla de la Viuda. Su cuenca es de 1513 Km^2, se encuentra ubicada al este de España, casi en su totalidad dentro de la Comunidad Autónoma de Valencia (Figura 1.a) es afluente por margen izquierda del Río Mijares en las proximidades de su desembocadura en el Mar Mediterráneo. Dentro de la misma se encuentran los embalses de Mª. Cristina y Alcora (Figura 1.b), el primero de ellos con problemas de aterramiento y probable infra-dimensionamiento de su aliviadero, por lo que es prioritario el conocimiento de lo que pueda ocurrir con este embalse en el futuro. Esta cuenca presenta un clima mediterráneo, caracterizado por ser una transición entre las zonas templadas y cálidas, con un régimen estacional de temperaturas parecido a los climas templados, mientras por su aridez y escazas lluvias se asemeja a los climas tropicales secos. Tiene una litología común en la zona, marcada por un dominio calcáreo que en particular favorece la infiltración de agua en una buena parte de su red de cauces. El resultado es una de las características principales de las ramblas, que por lo general presentan caudal únicamente durante los eventos importantes de precipitación que se dan en otoño, asociados a fenómenos meteorológicos extremos conocidos como "gota fría".

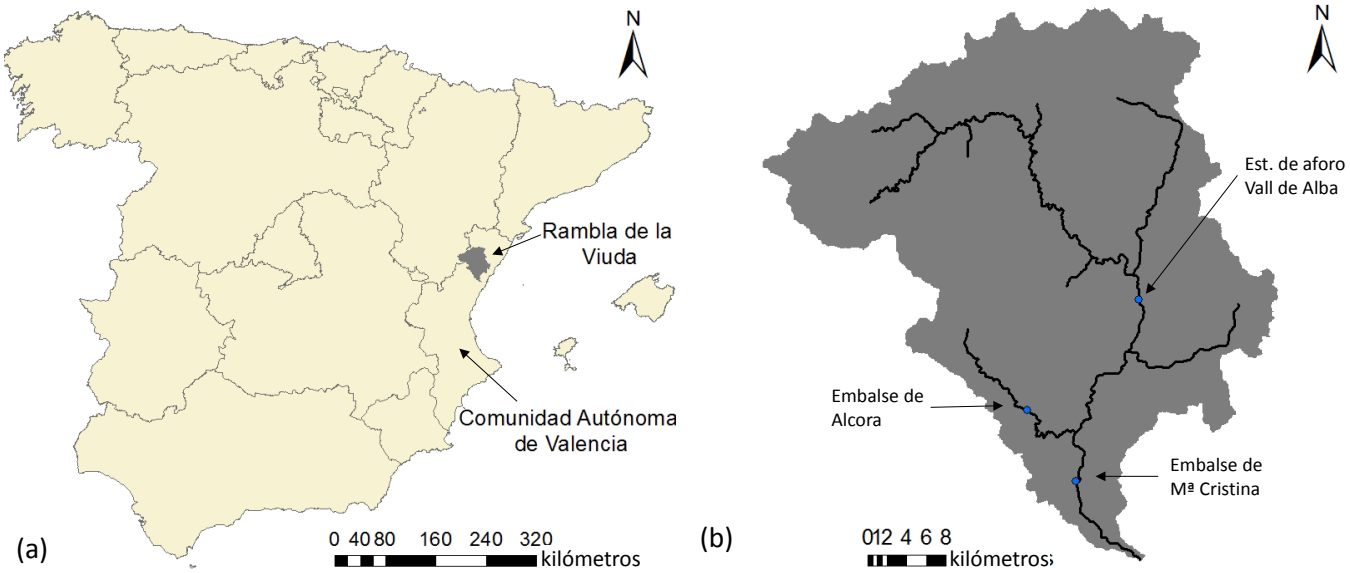

Figura 1 | Ubicación en España de la cuenca de la Rambla de la Viuda (a). Cuenca de la Rambla de la Viuda (b).

Modelo TETIS

TETIS es un modelo conceptual distribuido, de parámetros físicamente basados y que ha sido desarrollado para realizar simulación hidrológica y de ciclo de sedimentos en cuencas naturales con el objetivo de obtener de la mejor forma posible la respuesta ocasionada por la precipitación de lluvia o nieve, teniendo en cuenta los diferentes procesos físicos involucrados. Discretiza la cuenca a través de una malla de celdas asociadas a una serie de parámetros necesarios para la representación conceptual de los procesos hidrológicos, incorporando la variabilidad espacial del ciclo hidrológico y de sedimentos con el menor número de parámetros posibles, cumpliendo por tanto con el principio de Parsimonia. Las entradas del modelo son series temporales de: precipitación, temperatura y evapotranspiración de referencia o potencial (GIMHA, 2017).

La representación de los procesos físicos de ladera y acuífero en cada celda del sub-modelo hidrológico está basada en una estructura de tanques interconectados vertical y horizontalmente, como se representa en las Figuras 2 y 3. El acuífero es representado a través del tanque (T4). Los procesos en ladera están representados por cinco tanques que corresponden a: manto de nieve (T0); intercepción (T6), superficie (T2); agua capilar del suelo (T1); y agua gravitacional del suelo (T3). Por otra parte, mientras la escorrentía directa, el interflujo y el flujo base se conectan con la red fluvial representada por otro tanque (T5).

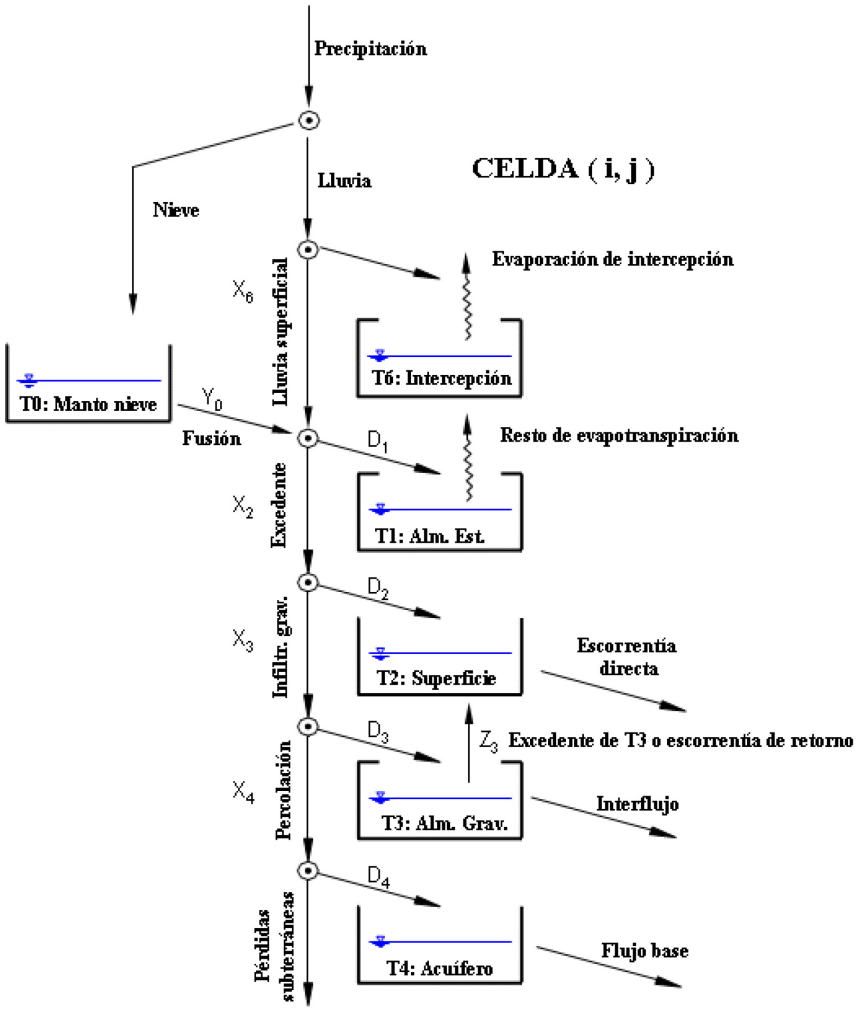

Figura 2 | Esquema conceptual de tanques a nivel de celda del modelo TETIS.

TETIS puede interpretarse como una malla interconectada en tres dimensiones, donde los tres tanques inferiores drenan hacia el correspondiente tanque aguas abajo, en función de las direcciones propuestas por la topografía, representada a través del MED, hasta alcanzar la red de drenaje formada por cárcavas (flujo intermitente) y cauces (flujo permanente). Por tanto existen tres sistemas diferenciados, definidos por las áreas umbrales para que las diferentes componentes de la escorrentía salgan de la ladera, coincidiendo con la presencia de una incisión permanente en el terreno donde se concentran los flujos, ya sea en cárcavas o en cauces, como se puede observar en la Figura 3. La propagación hidráulica del flujo a lo largo de la red se basa en una aproximación de la onda cinemática, estimando las características hidráulicas en cada celda mediante relaciones morfométricas de tipo potencial obtenidas a partir de la información geomorfológica de la cuenca, en lo que se denomina Onda Cinemática Geomorfológica (OCG).

TETIS cuenta además con un sub-modelo de sedimentos incorporado, basado en la formulación desarrollada en el modelo CASC2D-SED, que simula los procesos de sedimentos en ladera en dos dimensiones y con una aproximación unidimensional en canales (Rojas, 2002). Para el transporte en ladera, el sub-modelo utiliza la ecuación de Kilinc y Richardson modificada para estimar la capacidad de transporte (Julien, 2010). Esta ecuación está en función del caudal, la pendiente del terreno, el tipo de suelo y los usos de la tierra. El cálculo en cárcavas y cauce se lleva a cabo usando la ecuación de Engelund y Hansen (1967) utilizando parámetros hidráulicos (radio hidráulico, velocidad de flujo y ángulo de fricción) y características de las partículas (gravedad específica y diámetro), aplicando el concepto de potencia de corriente de Bagnold y el principio de similitud, obteniendo la concentración de sedimentos por peso con la cual se puede estimar el volumen de la fracción transportada por el caudal en un intervalo de tiempo.

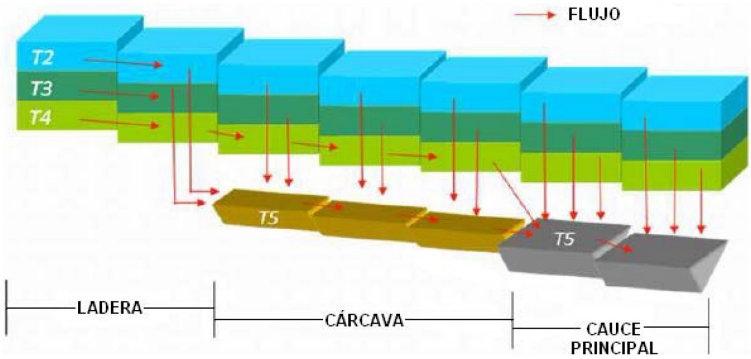

Figura 3 | Movimiento horizontal propuesto por el modelo TETIS (simplificación 2D).

Implementación del modelo

La implementación del sub-modelo hidrológico se llevó a cabo utilizando la información meteorológica observada de SPAIN02 v.04 y los caudales de entrada al embalse de Mª Cristina, obtenidos de la base de datos del CEDEX. La calibración y validación del modelo se realizó de manera cualitativa mediante la comparación de los hidrogramas y cuantitativamente utilizando el coeficiente de eficiencia de Nash y Sutcliffe (EF_2). En este proceso fue necesario la introducción de pérdidas de flujo a lo largo de la red fluvial. Para ello se correlacionaron las pérdidas con el área de cauce sobre las zonas kársticas y de tramos de cauce donde se identifica que existe conexión indirecta con el acuífero, conocida como "efecto ducha". Con ello el EF_2 en calibración mejora de 0.905 a 0.928, y en validación de 0.739 a 0.924, con respecto a una simulación previa que no considera dichas pérdidas. Lo que también se refleja en los hidrogramas simulados (Figura 4), que dejan de presentar flujo en periodos observados sin salidas, aumentando su similitud. La validación en el aforo de Vall de Alba fue también satisfactoria.

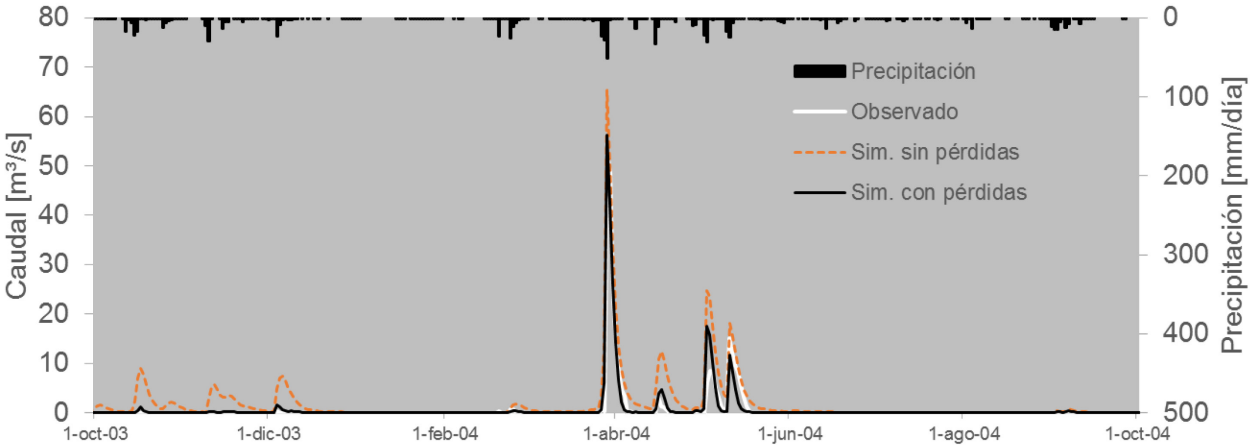

Figura 4 | Hidrogramas observado y simulados en el periodo de calibración (2003-2004) en el embalse de Mª. Cristina de la cuenca de la Rambla de la Viuda.

La modelización del ciclo de sedimentos dentro de la cuenca se vio dificultada debido a la falta de registros de la carga en suspensión y de lecho que circulan en ella. Sin embargo, se aprovechó información batimétrica en distintos periodos para el embalse de Mª. Cristina, permitiendo estimar la variación en su capacidad que es producto del sedimento acumulado. Para mejorar esta aproximación se utiliza la fórmula de Miller (1953), para considerar los efectos de consolidación producidos por la presión ejercida sobre el sedimento por el peso del sedimento acumulado más reciente. Considerando además que el volumen de sedimento acumulado en el embalse no representa el total del volumen de sedimentos producidos y transportados por la cuenca hasta dicho punto, se utilizó el índice de eficiencia de atrapamiento (*Trap efficiency*) mediante la ecuación propuesta por Dendy (1974) para calcular la proporción de material que queda atrapada con respecto a la transportada hasta el embalse. Esta información sirvió de referencia para modelizar y calibrar el sub-modelo sedimentológico de TETIS, obteniendo como resultado

una aproximación a la variación temporal de los procesos de producción, transporte y depósito de sedimentos dentro de la cuenca, principalmente en puntos de interés, como el mismo embalse de Mª. Cristina.

La Figura 5 muestra la variación en el tiempo de la capacidad del embalse obtenida tras la modelización. Esta variación de la capacidad guarda una relación directa con los eventos de precipitación, observándose saltos de reducción en la capacidad cuando se producen eventos de magnitud considerable. A lo largo del periodo se puede apreciar un descenso con una pendiente constante de 0.026 Hm3/año, hasta inicios de noviembre de 2000, fecha donde se produce un evento de magnitud extraordinaria, perdiendo 1.204 Hm3 de capacidad. Es decir, se confirma la influencia de eventos de esta magnitud en el ciclo sedimentológico de este tipo de cuencas con un comportamiento no lineal.

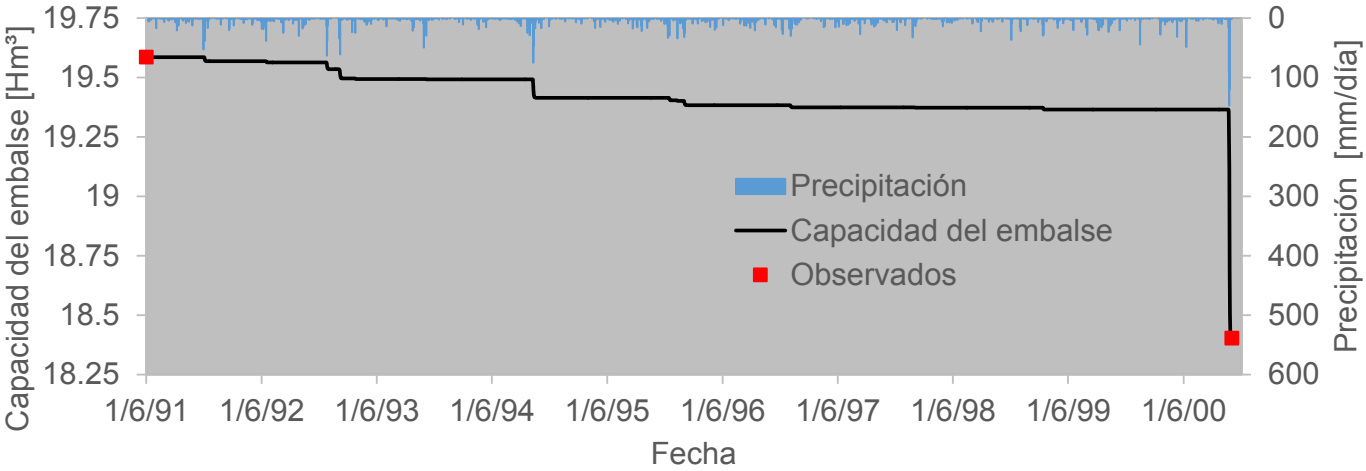

Figura 5 | Curva simulada de disminución de capacidad del embalse de Mª. Cristina, dentro de la cuenca de la Rambla de la Viuda.

Análisis integral del impacto del Cambio Climático

La información meteorológica empleada para la estimación de los posibles efectos en la cuenca se obtuvo de la AEMET, que a través de su sitio web pone a disposición pública escenarios climáticos regionalizados (AEMET, 2017). Estos escenarios se han obtenido a partir de los resultados de diferentes Modelos Climáticos de Circulación General (MCG), que representan los cambios a gran escala acordes con la información del IPCC en su quinto informe AR5. Las series temporales utilizadas son datos diarios de precipitación y temperaturas máxima y mínima, correspondientes a dos periodos: un primero, llamado de Control (1961-2000) que debe presentar características similares a los datos observados en el pasado; y un segundo periodo que denominaremos Futuro (2006-2100) que trata de representar el efecto que se producirá en la meteorología con diferentes escenarios fundamentalmente de emisiones de gases de efecto invernadero (en este caso se ha seleccionado el escenario RCP 8.5).

Sin embargo, al comparar en la cuenca de estudio diferentes estadísticos del periodo de Control con los obtenidos a partir de la información observada interpolada proveniente del proyecto SPAIN02 v.04 en el periodo común 1971-2000, se encontraron diferencias notables para todos los modelos regionales (Figura 6). Esto puede ser debido a la resolución de los MCG y/o a las hipótesis de las técnicas de regionalización. Es por ello que fue necesario descartar los peores y corregir el sesgo de las series de precipitación y temperatura del resto mediante regresiones lineales para cada estación del año. Estas regresiones se estimaron durante el período común y fueron diferentes para cada modelo regional.

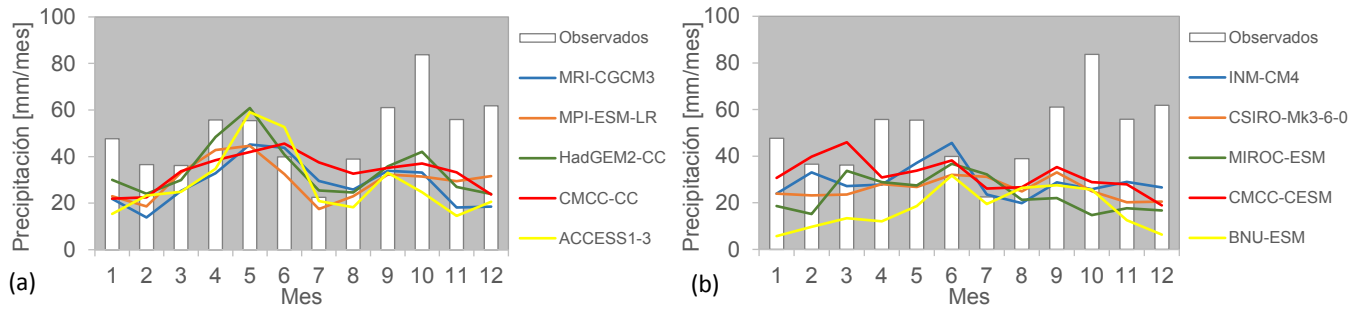

Figura 6 | Comparación entre la precipitación media mensual observada de Spain02 V.04 y de la AEMET en el Periodo de Control (1971-2000) para los MCG regionalizados estadísticamente: seleccionados (a) y parte de los descartados (b).

Los métodos de corrección del sesgo en la información proveniente de los MCG y sus regionalizaciones generalmente están basados en transformaciones estadísticas, donde para una variable modelizada (U_m) correspondiente a una variable observada (U_o) se busca una función (h) tal que se consiga una relación como la representada en la Ecuación 1, corrigiendo a la primera variable. Si se conoce la función de distribución de probabilidades tanto para la variable observada (F_o) como para la simulada (F_m) se puede llegar a una transformación estadística a través de su probabilidad integral como la representada en la Ecuación 2 (Gudmundsson et al., 2012). Un ejemplo de la diferencia entre la información corregida y sin corregir se puede observar en la Figura 7. Es de destacar la mala representación de la bimodalidad de la precipitación mensual, característica del clima Mediterráneo. Esta misma corrección se aplicó a todas las series temporales tanto en el período de Control como en el Futuro, estas fueron empleadas para realizar simulaciones utilizando el modelo previamente calibrado.

$$U_o = h(U_m) \quad (1)$$

$$U_o = F_o^{-1}\left(F_m(U_m)\right) \quad (2)$$

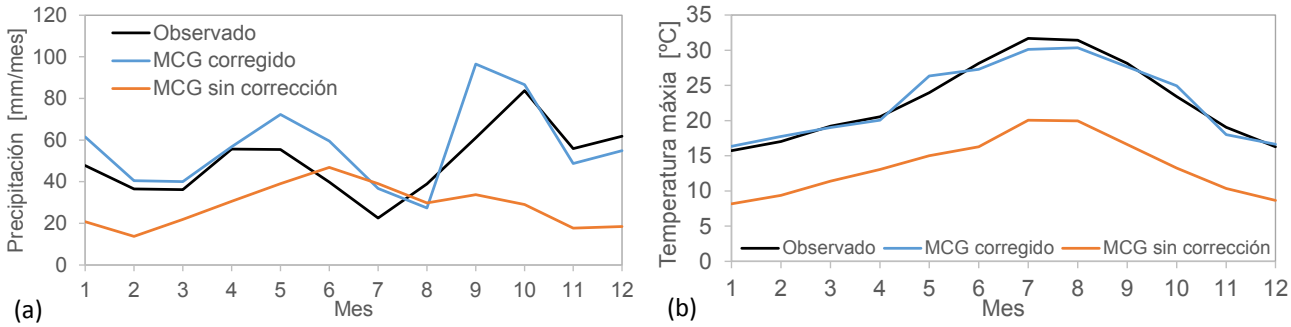

Figura 7 | Precipitación (a) y temperatura máxima (b) medias mensuales: Observada en el punto P10 de Spain02 V04 y; simulada en el punto 8477 de la AEMET del MCG regionalizado MRI-CGCM3 corregida y sin corregir.

RESULTADOS

Tras observar la información corregida de los diferentes MCG se aprecia que en lo que respecta al clima, realmente no hay una señal clara de cambios en la precipitación, tanto en cantidad (Figura 8.a) como en torrencialidad (Figura 9.a), aunque si es evidente el futuro aumento de temperaturas (Figura 8.b) que se traducirá en un incremento de la evapotranspiración de referencia (Figura 8.c). Es precisamente este incremento de la evapotranspiración la que da lugar a una reducción de los recursos disponibles, tanto superficiales (en las crecidas, por ser un río efímero) como subterráneos (en forma de recarga ya que el acuífero no está conectado de manera directa con el río).

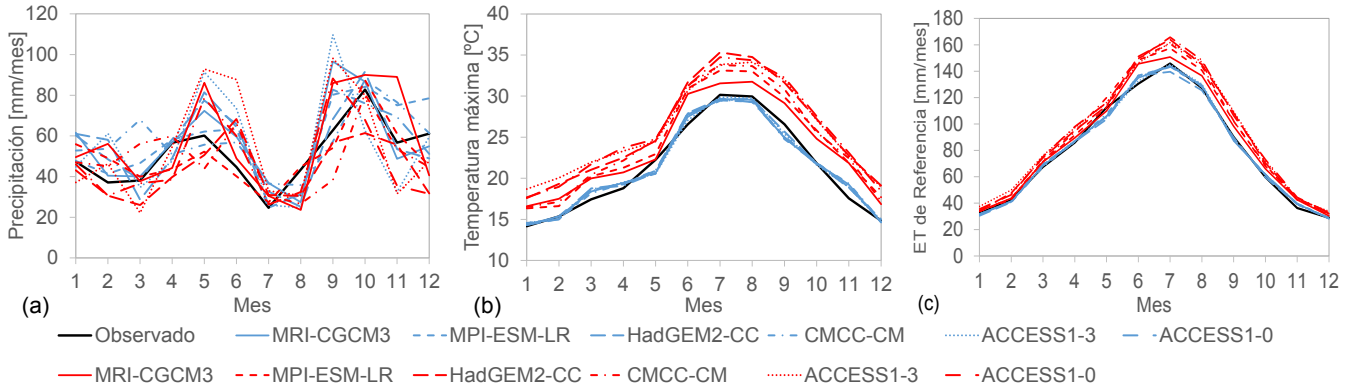

Figura 8 | Caudal (a), precipitación (b) y evapotranspiración de referencia (c) mensual media para los datos de SPAIN02 v.04 (línea negra) y de escenarios climáticos corregidos en el periodo de Control (líneas azules) y Futuro (líneas rojas).

En lo que respecta a las crecidas, la Figura 9.b nos muestra que existe una clara disminución de los cuantiles ajustados cuando se comparan los resultados de período de Control 1971-2000 (líneas azules) con el Futuro 2071-2100 (líneas rojas), treinta años en ambos casos. A pesar de que la torrencialidad será similar (Figura 9.a), la disminución en los cuantiles de crecida se debe de nuevo a la mayor evapotranspiración que da lugar a una menor humedad del suelo al inicio de las tormentas: si la humedad inicial es menor, la capacidad de infiltración será mayor dando lugar a una disminución de la producción de escorrentía superficial en los eventos de crecida. Esta afectación disminuye con la magnitud de la tormenta, pero sí que se refleja en los estadísticos de hasta 100 años de período de retorno.

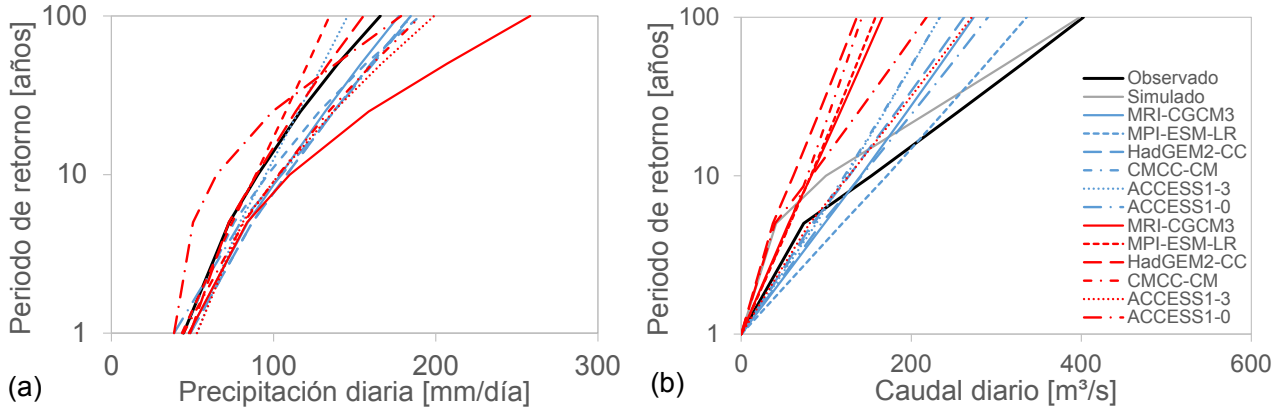

Figura 9 | Cuantiles de máximos diarios anuales de precipitación (a) y caudal (b) para los datos de SPAIN02 v.04 (línea negra) y de escenarios climáticos corregidos en el periodo de Control (líneas azules) y Futuro (líneas rojas).

Dada la conexión directa de los procesos erosivos con los eventos de fuertes precipitaciones, el resultado es que cabrá esperará en el futuro una disminución de los aportes de sedimentos al embalse de Mª Cristina, alargando su vida útil respecto de lo esperado con el clima actual (Figura 10).

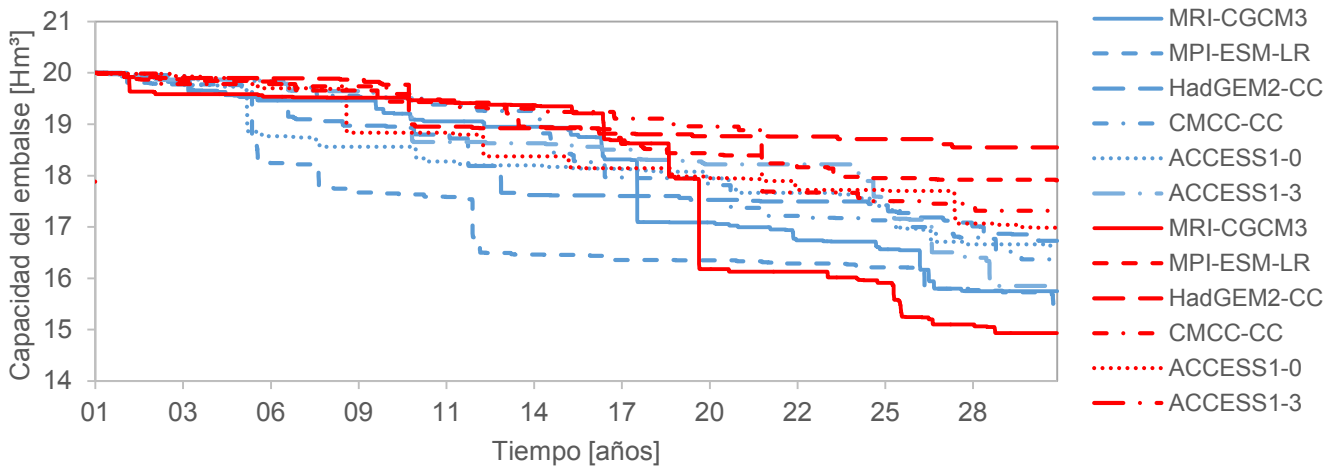

Figura 10 | Curva simulada de disminución de capacidad del embalse de Mª. Cristina, dentro de la cuenca de la Rambla de la Viuda para los escenarios climáticos corregidos en el periodo de Control (líneas azules) y Futuro (líneas rojas).

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha utilizado el modelo hidrológico distribuido TETIS para evaluar los efectos que pudiera tener el cambio climático en la cuenca de la Rambla de la Viuda. Esta cuenca mediterránea está caracterizada por tener un cauce efímero asociado a: su clima único, que presenta un régimen estacional de temperaturas similar al de los climas templados, y la aridez y escasas precipitaciones características de los climas secos; y a su litología marcada por un dominio calcáreo que dificulta la conexión entre río y acuífero y favorece la infiltración de agua durante su propagación en la red de cauces.

Para la implementación del sub-modelo hidrológico se tuvieron en consideración las pérdidas de flujo a lo largo de la red fluvial. Para ello se correlacionaron dichas pérdidas con el área de cauce sobre las zonas kársticas y de tramos de cauce donde se identifica que existe conexión indirecta con el acuífero. La introducción de dichas pérdidas mejoró considerablemente el desempeño del modelo hidrológico, lo que se vio reflejado en una mejor representación del hidrograma y en un mejor valor del coeficiente de eficiencia de Nash y Sutcliffe.

La implementación del sub-modelo sedimentológico se realizó utilizando información indirecta sobre el volumen de sedimentos acumulados en el embalse de Mª Cristina. Se calculó el volumen de sedimento acumulado considerando el efecto de consolidación del sedimento utilizando la fórmula de Miller (1953) y considerando la relación del volumen de sedimento transportado y acumulado mediante el uso del índice de eficiencia de atrapamiento mediante la ecuación propuesta por Dendy (1974). Los resultados de la modelización muestran que la acumulación de material transportado hasta el embalse depende de los eventos torrenciales de precipitación suficiente para generar la escorrentía necesaria para arrastrar el material.

Para la evaluación de los posibles efectos del Cambio Climático, se utilizó información meteorológica obtenida a partir de los resultados de diferentes Modelos Climáticos de Circulación General (MCG), que representan los cambios a gran escala acordes con la información del IPCC en su quinto informe AR5 para el escenario RCP 8.5. Puesta a disposición pública por la AEMET para la geografía española. Debido a errores en esta información, relacionados a la resolución de los MCG y/o a las hipótesis de las técnicas de regionalización. Fue necesario descartar los peores y corregir las series de precipitación y temperatura del resto mediante regresiones lineales, para obtener una mejor representación de la realidad de la cuenca, tanto en el periodo de Control como en el Futuro.

Los posibles efectos del cambio climático en lo que respecta al clima indican que realmente no hay una señal clara de cambios en la precipitación, aunque si es evidente el futuro aumento de temperaturas que se traducirá en un incremento de la evapotranspiración de referencia que da lugar a una reducción de los recursos disponibles. En lo que respecta a las crecidas, se una clara disminución de los cuantiles ajustados cuando se comparan los resultados de Período de Control (1971-2000) que representa el clima actual con respecto con el Futuro 2071-2100. Esta disminución en los cuantiles de crecida se debe de nuevo a la mayor evapotranspiración que da lugar a una menor humedad del suelo al inicio de las tormentas. Esta reducción en las

crecidas relacionada a los procesos erosivos significa también una disminución de los aportes de sedimentos al embalse de Mª Cristina, alargando su vida útil respecto de lo esperado con el clima actual.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha estado financiada por el proyecto del Plan Nacional de I+D+i TETISMED (ref.: CGL2014-58127-C3-3-R)

REFERENCIAS

AEMET, Agencia Estatal de Meteorología de España 2017. *Proyecciones climáticas para el siglo XXI*. Consultado el 30/01/2017. http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat

Dendy, F.E. 1974. Sediment trap efficiency of small reservoirs. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* (17), 899–901.

Engelund, F., Hansen, E. 1967. *A monograph on sediment transport in alluvial streams*. Monograph, Denmark Technical University, Hydraulics Laboratory, 62 p.

GIMHA 2017. *Descripción del modelo conceptual distribuido de simulación hidrológica TETIS*. Universitat Politècnica de València.

Gudmundsson, L., Bremnes, J.B., Haugen, J.E., & Engen-Skaugen, T. 2012. Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations–a comparison of methods. *Hydrology and Earth System Sciences* (16), 3383–3390.

Julien, P. 2010. *Erosion and sedimentation*, *second edition.* Cambridge University Press. 280 pp.

Miller, C.R. 1953. *Determination of the unit weight of sediment for use in sediment volume computations*. Bureau of Reclamation Project Planning Division. US Department of the Interior. United States of America.

Rodríguez, E., Picatoste, J.R., & Heras, F.H. (2014). Quinto informe de evaluación del IPCC: Bases físicas. *Tiempo y Clima* 5 (43), 36-41.

Rojas, R. 2002. *GIS-based upland erosion modeling, geovisualization and grid size effects on erosion simulations with CASC2D-SED*. PhD Thesis, Colorado State University, Fort Collins, United States of America.