



Joaquín Melgarejo Moreno  
(Editor)



JOAQUÍN MELGAREJO MORENO (EDITOR)

# Congreso Nacional del Agua Orihuela

*Innovación y Sostenibilidad*



Coordinado por:  
Patricia Fernández Aracil



CAMPUSHABITAT5U



© los autores, 2019  
© de esta edición: Universitat d'Alacant

ISBN: 978-84-1302-034-1

Reservados todos los derechos. No se permite reproducir, almacenar en sistemas de recuperación de la información, ni transmitir alguna parte de esta publicación, cualquiera que sea el medio empleado - electrónico, mecánico, fotocopia, grabación, etcétera-, sin el permiso previo de los titulares de la propiedad intelectual.

# REFLEXIONES SOBRE LA REPERCUSIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS ELEMENTOS DEL BALANCE HÍDRICO A ESCALA GLOBAL

**Antonio Jodar Abellan**

Instituto Universitario del Agua y las Ciencias Ambientales, Universidad de Alicante

**Víctor Ruiz Álvarez**

Departamento de Geografía, Universidad de Murcia

**Daniel Prats Rico**

Instituto Universitario del Agua y las Ciencias Ambientales, Universidad de Alicante

## RESUMEN

La modelización del cambio climático presenta una elevada complejidad científica que, desde un punto de vista divulgativo, puede centrarse en la incertidumbre aportada por los actuales escenarios de emisión de gases de efecto invernadero (*Representative Concentration Pathways*, RCP); los modelos climáticos globales (*Global Climate Models*, GCMs); y la adaptación (regionalización estadística) de estos últimos a cada región concreta del globo, proporcionando los denominados modelos climáticos regionales (*Regional Climate Models*, RCMs).

Actualmente, las demandas hídricas se encuentran en continuo crecimiento lo que aumenta la presión, en la cantidad y calidad necesaria, sobre los recursos hídricos disponibles a nivel global. Así mismo, la reducción, que proyectan determinados modelos en numerosas regiones, de las aportaciones en régimen natural, como consecuencia del cambio climático, supone un nuevo nivel de incertidumbre cuyo correcto análisis y cuantificación resulta esencial en áreas con elevado estrés hídrico (regiones áridas y semiáridas). En este trabajo se realizan algunas reflexiones sobre los efectos del cambio climático en los principales componentes del balance hídrico. El análisis se basa en una revisión bibliográfica de la literatura científica, y en informes técnicos, de marcada transcendia en el contexto global y europeo. Se realiza especial énfasis en relación a los impactos previsibles en zonas áridas y semiáridas.

La presente contribución puede ayudar a las Administraciones Públicas y organismos locales, responsables de la gestión del recurso agua, a valorar la gran relevancia que puede tener el cambio climático, esencialmente de origen antrópico, sobre los elementos del balance hídrico.

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, a nivel global, los cambios demográficos, el creciente desarrollo de numerosos países, el aumento en el nivel de vida, las políticas inadecuadas de ordenación del territorio y de uso y gestión del agua, constituyen los principales elementos que incrementan la presión sobre los suministros de agua locales, nacionales y regionales necesarios para el regadío, la producción energética, los usos industriales y domésticos, y el medio ambiente (Abbaspour *et al.* 2015). La cantidad y calidad de recursos hídricos, superficiales y subterráneos (agua azul), se encuentran considerablemente amenazadas en regiones con elevado estrés hídrico (Cynthia *et al.* 2004; Wada *et al.* 2012; Custodio *et al.* 2016). En consecuencia, las reservas de agua dulce han disminuido, lo que acarrea impactos ambientales negativos sobre los ecosistemas asociados (Klove *et al.* 2014). A su vez, el suministro del agua dulce se encuentra estrechamente ligado a decisiones políticas, caso por ejemplo de los trasvases y de la desalación de agua marina en España (Molina y Melgarejo, 2015), lo que provoca cierta inseguridad en dicho abastecimiento especialmente en situaciones de escasez. Al mismo tiempo, el cambio climático aporta un nuevo nivel de incertidumbre en los suministros de agua dulce y en los principales sectores de uso del agua como la agricultura y la energía. Toda esta problemática incrementará las incertidumbres sobre las futuras demandas del agua (Green *et al.* 2011), lo que, junto al continuo aumento en la frecuencia y duración de las sequías asociadas al cambio climático (Wanders y Van-Lanen, 2015), provocará que las sociedades amplíen su vulnerabilidad ante un extenso elenco de riesgos asociados con el suministro inadecuado del agua en cantidad y/o calidad (UN, 2012).

En esta contribución se analizan los efectos del cambio climático sobre los principales elementos del balance hídrico mediante una revisión bibliográfica de la literatura científica, e informes técnicos, de gran relevancia en la materia. Se realiza, así mismo, especial énfasis a los impactos de dicho cambio en zonas áridas y semiáridas.

## 2. CAMBIO GLOBAL Y BALANCE HÍDRICO

El cambio global abarca las modificaciones de las variables climáticas a nivel espacial y temporal, y los cambios derivados de los procesos terrestres, incluyendo las actividades humanas que afectan al medio ambiente, y como tales, el cambio global proyectado incluye los sistemas de recursos hídricos (Green *et al.* 2011). En los últimos años, el cambio global (cambio climático, cambios de usos del suelo, etc.) ha sido plenamente demostrado en numerosos estudios científicos. La influencia antrópica sobre el medio ha alterado el clima de los últimos 25 años, de tal forma que las modificaciones registradas a escala planetaria no podrían atribuirse exclusivamente a las propias anomalías y variabilidad natural del sistema climático (Allen *et al.* 2000; Bindoff *et al.* 2013). El quinto informe del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) establece cuatro escenarios de posible variación climática para los

próximos decenios: los RCP (*Representative Concentration Pathways*). Dichos escenarios se denominan RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5, diferenciándose en la magnitud del forzamiento radiativo que cada uno aporta al sistema climático natural. Este forzamiento expresa el cambio neto en el balance de energía del planeta en respuesta a perturbaciones externas. Por ello, un forzamiento positivo conlleva un calentamiento neto del planeta y un forzamiento negativo un enfriamiento. Actualmente el forzamiento radiativo que alcanza la atmósfera se sitúa en los  $340 \text{ W/m}^2$ , mientras que la irradianza procedente del sistema solar se estima en  $1.400 \text{ W/m}^2$ . De este modo, los resultados de los modelos climáticos globales (GCMs) y regionales (RCMs) varían en función del forzamiento introducido (IPCC, 2013).

En las siguientes líneas se analiza someramente la afección del cambio global sobre los diferentes elementos del balance hídrico y aspectos relacionados:

### **2.1. Temperatura**

La modificación e incremento generalizado de la temperatura media mundial es probablemente la afección antrópica, sobre el sistema climático, de mayor evidencia científica. Por ello, a menudo se emplean indistintamente los términos cambio climático, calentamiento global y efecto invernadero. Dicho incremento resulta relevante dado que la temperatura posee estrechas relaciones (retroalimentaciones positivas y negativas) con numerosas variables hidrológicas como la Evapotranspiración Potencial (ETP), la humedad del suelo, etc. A nivel global, los registros de temperatura en la superficie terrestre y oceánica indican un calentamiento neto de  $0.85^\circ\text{C}$  para el período 1880-2012. En la Figura 1 se muestran los cambios observados en la temperatura media en superficie a nivel global en el periodo 1901-2012.

Respecto a las proyecciones, en la serie 2081-2100, el escenario RCP8.5 (el más pesimista) señala un aumento de las temperaturas que supera los  $7^\circ\text{C}$  en amplias regiones del planeta y los  $10^\circ\text{C}$  en el ártico. En España, dicho escenario prevé un incremento de unos  $5^\circ\text{C}$ . No obstante, persiste la incertidumbre aportada por los diversos escenarios, GCMs y RCMs tanto para la temperatura como para el resto de las variables (IPCC, 2013; Fig.1).

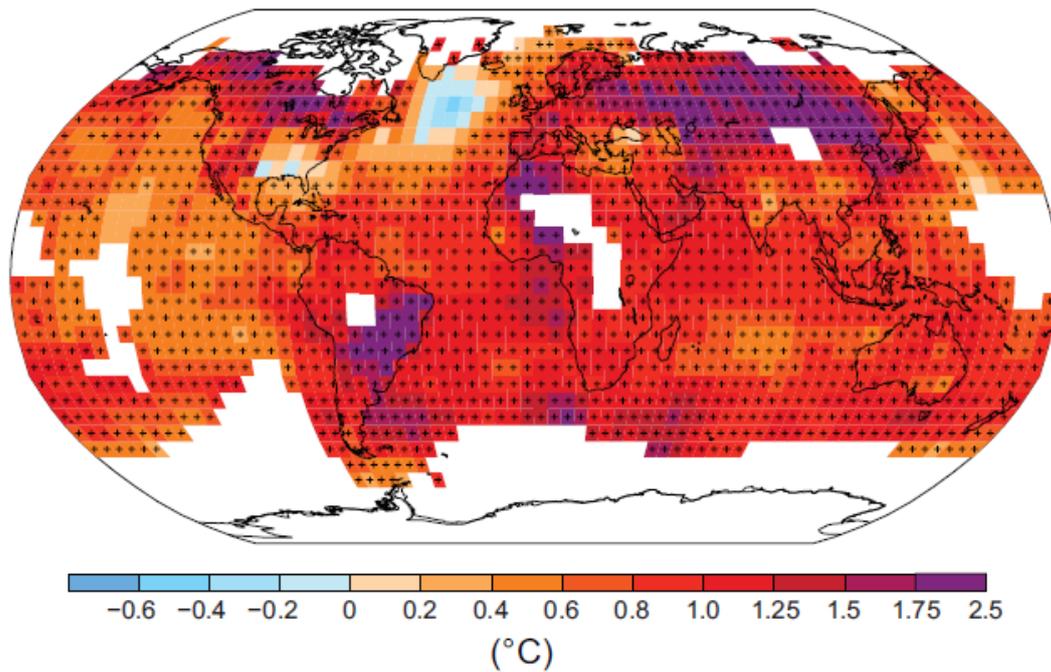


Figura 1. Cambios observados en la temperatura media en superficie a nivel global. Periodo 1901-2012. Las celdas con signo + indican que dichos cambios, generalmente incrementos en la temperatura, resultan significativos (nivel de significación de 0.1).

Fuente: IPCC (2013).

La Fig. 2 muestra los cambios estimados en la temperatura media, de la superficie del planeta, en el periodo 2081-2100 con respecto al periodo de referencia 1986-2005. Los cambios se muestran para el escenario de cambio climático RCP2.6 (más optimista) y para el RCP8.5 (más pesimista). En ambos escenarios, los resultados mostrados provienen del promedio obtenido en múltiples modelos de cambio climático (32 en el RCP2.6 y 39 en el RCP8.5). Las regiones con punteado indican que la media de los modelos utilizados es superior a la variabilidad interna del sistema climático, y que al menos el 90% de los modelos concuerdan en el signo del cambio estimado. Sin embargo, en las regiones sin punteado existe una elevada incertidumbre acerca de si el cambio estimado es atribuible a la influencia antrópica o simplemente a la propia variabilidad natural (ruido) del sistema climático. Como resulta evidente en el RCP2.6 dicha incertidumbre (áreas sin punteado) es mayor que en el RCP8.5 donde el gran incremento del forzamiento radiativo es debido a la influencia antrópica (Bindoff *et al.* 2013; IPCC, 2013).

Se puede concluir que la mayoría de las regiones de la Tierra, en todos los escenarios contemplados, sufrirán para finales del siglo XXI un incremento de temperatura. Este incremento puede, en algunas zonas, alcanzar los 2-3 °C para el escenario más favorable y los 9-11 °C para el escenario más desfavorable (Fig.2).

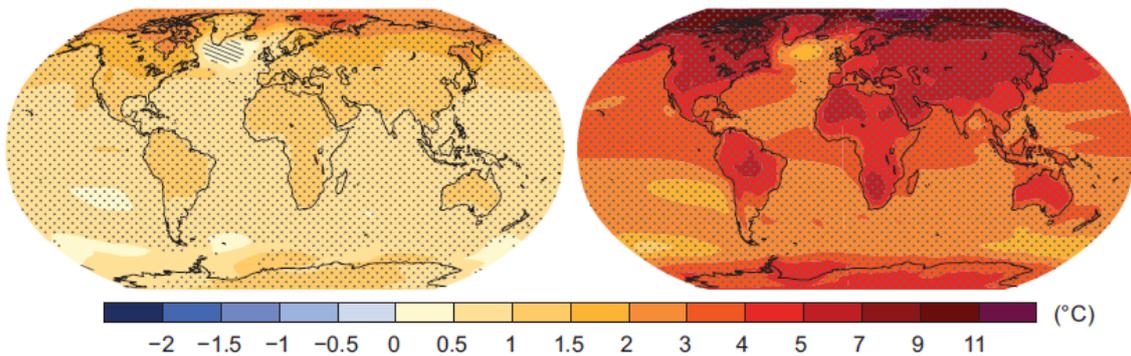


Figura 2. Cambios estimados en la temperatura media en superficie en el periodo 2081-2100 con respecto al periodo de referencia 1986-2005. Escenarios de cambio RCP2.6 (izquierda) y RCP8.5 (derecha). Fuente: modificado de IPCC (2013).

## 2.2. Precipitación

Tras la temperatura, la precipitación es la segunda variable hidrológica considerada en los escenarios, GCMs y RCMs para expresar el impacto del cambio climático (Green *et al.* 2011). A nivel global, los registros de precipitaciones anuales, para el periodo 1951-2010, presentan una elevada variabilidad espacial (incrementos y disminuciones notables según la región). En España, se ha observado una disminución generalizada de entre 2.5 y 5 mm/año por década (Fig. 3). En el orden predictivo, en la serie 2081-2100, el escenario RCP8.5 indica, junto con los GCMs acoplados, un incremento global de la precipitación en latitudes septentrionales, observado parcialmente en los trópicos. En cambio, en determinadas regiones subtropicales y en latitudes medias y bajas se estima una disminución de la misma (Fig. 4). En España, el RCP8.5 estima un descenso aproximadamente del 20% con un nivel de significancia elevado (IPCC, 2013). En cuanto a los patrones estacionales mundiales, aunque la precipitación presente, en determinadas áreas, valores agregados mensuales y anuales constantes, se prevé un incremento generalizado en la intensidad y concentración de ésta, especialmente relevante, desde una perspectiva socioeconómica, en regiones áridas y semiáridas (CEDEX, 2012; Cabezas, 2015; CEDEX, 2017).

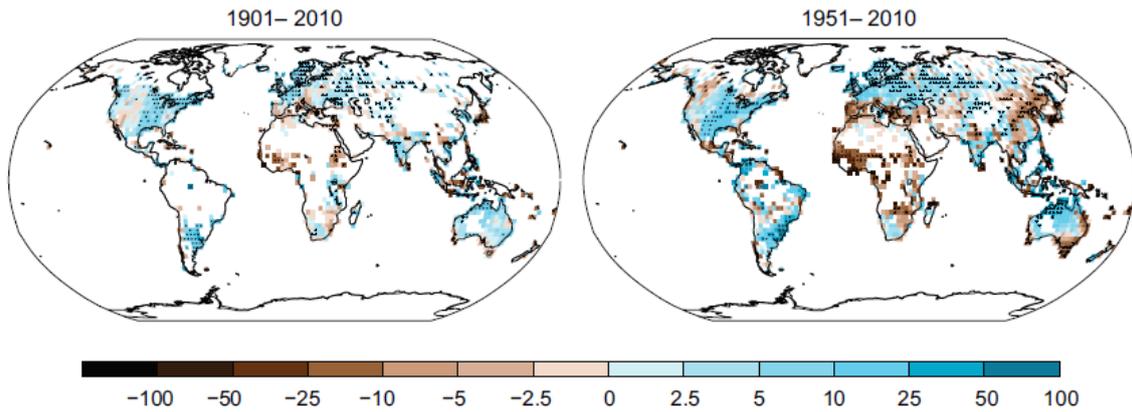


Figura 3. Cambios observados en la precipitación anual en superficie a nivel global (mm/año por década). Periodos 1901-2010 y 1951-2010. Las celdas en color negro indican que los cambios o tendencias resultan significativos (nivel de significación de 0.1). Las celdas en color blanco indican ausencia de registros. Fuente: IPCC (2013).

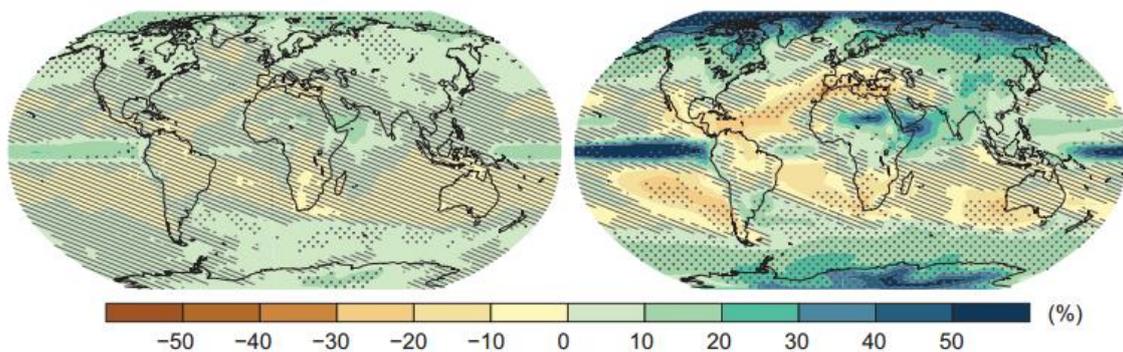


Figura 4. Cambios estimados en la precipitación media en el periodo 2081-2100 con respecto al periodo de referencia 1986-2005. Escenarios de cambio RCP2.6 (izquierda) y RCP8.5 (derecha). Fuente: modificado de IPCC (2013).

Se puede concluir que se han constatado incrementos y disminuciones de precipitaciones según la región del globo. En España se ha registrado una reducción de 2.5-5 mm por década a partir de 1950. Respecto a las predicciones futuras, para finales del presente siglo el escenario más desfavorable predice una disminución de precipitaciones en determinadas regiones subtropicales y en latitudes medias y bajas, estimándose para España un descenso cercano al 20% con un nivel de significancia elevado. Además, se prevé un incremento generalizado en la intensidad y concentración de las precipitaciones.

### 2.3. Evapotranspiración

La variable evapotranspiración muestra elevada incertidumbre debido a las dificultades que presenta su medición dado que habitualmente las estaciones meteorológicas no disponen de los equipos necesarios para obtener registros de todos los elementos que integran dicha variable (caso de la radiación solar, velocidad del viento, etc.). Incluso cuando la evapotranspiración es medida, a menudo su variabilidad espacial no es tomada en consideración (Gomariz-Castillo *et al.* 2017). Aun así, la comunidad científica

coincide en que los incrementos de temperatura a menudo provocan aumentos de la ETP, aunque la evapotranspiración real (ETR) se encuentra supeditada a la cantidad de agua disponible en el suelo y las plantas. Además, la transpiración del agua desde la cubierta vegetal se ve afectada por el comportamiento estomático, la concentración de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en la atmósfera, etc. Pese a que la tendencia de calentamiento global probablemente incrementará la ETP, el aumento del CO<sub>2</sub> atmosférico estimula la oclusión estomática de la vegetación reduciéndose su transpiración. En consecuencia, actualmente no existe un acuerdo científico sobre la dirección y magnitud de los patrones de evapotranspiración proyectados.

Se puede concluir que, en caso de producirse el posible aumento de la ETP, unido a la reducción de la pluviometría, pueden registrarse disminuciones en la escorrentía superficial y subterránea, el contenido de agua en el suelo, la recarga de acuíferos, etc. (Green *et al.* 2011; Gomariz-Castillo, 2015).

#### **2.4. Humedad del suelo y escorrentía superficial**

La temperatura, la ETR y en especial la precipitación afectan directamente a la humedad del suelo. Los cambios en ésta y en otras variables influyen en: el crecimiento de los cultivos, las necesidades hídricas del regadío, la variabilidad en la zona vadosa hidrológica, las aguas superficiales y subterráneas, los procesos atmosféricos (retorno de agua a la atmósfera), etc. (Yates, 1997; Green *et al.* 2011).

La escorrentía superficial por su parte se halla considerablemente afectada por las anteriores variables hidrológicas y, en particular, por la precipitación. Sin embargo, la escorrentía proyectada también estará supeditada a otros factores climáticos e influencias humanas, como las infraestructuras hidráulicas (trasvases, embalses, presas, etc.) y a la regulación y/o interacción con las aguas subterráneas. Dichos factores aportan incertidumbre a la predicción de la escorrentía futura. No obstante, numerosas experiencias de modelación hídrica realizadas (modelos hidrológicos macroescalares acoplados con GCMs) proyectan una reducción notable de la escorrentía superficial a nivel global en el siglo XXI. En España, se estima que las aportaciones fluviales disminuirán entre un 5 y un 15% en los próximos 20 años, cuyos efectos serán especialmente visibles en las estaciones de primavera y verano (CEDEX, 2012; Hanasaki *et al.* 2013; Greve *et al.* 2018).

#### **2.5. Escorrentía subterránea y recarga de acuíferos**

Los cambios en las anteriores variables, y en especial la alteración en los usos del suelo y en la magnitud y distribución estacional de la precipitación, modificarán los patrones estacionales de recarga de acuíferos, las reservas, flujo y calidad de las aguas subterráneas, etc. En teoría, el aumento proyectado en la intensidad y concentración de la precipitación incrementa la escorrentía superficial (inundaciones) y dificulta la percolación e infiltración del agua en el subsuelo, disminuyendo así la recarga de acuíferos. No obstante, las propiedades hidrogeológicas de tales formaciones (permeabilidad, porosidad, transmisividad, etc.), junto con la elevada variación en los

tiempos de tránsito y residencia del agua en los acuíferos (desde días a decenas de miles de años), conlleva que se retrasen y dispersen los efectos del cambio climático en las aguas subterráneas. Se trata sin duda de la variable con mayor incertidumbre en tales estimaciones. Del mismo modo, los impactos potenciales de las aguas subterráneas en el sistema climático global son desconocidos. Los citados condicionantes han provocado que tradicionalmente los efectos del cambio climático sobre las aguas subterráneas no hayan sido estudiados en detalle, con respecto por ejemplo a estudios equivalentes de aguas superficiales. Dicha tendencia se ha corregido en los últimos años. Por ello, actualmente numerosas investigaciones indican que la recarga de acuíferos disminuirá a nivel global como consecuencia del cambio climático, mientras que determinados estudios apuntan incluso incrementos en las tasas de recarga, según los GCM y RCM utilizados (Green *et al.* 2011; Pulido-Velázquez *et al.* 2015; Greve *et al.* 2018).

Especial atención requieren las regiones áridas y semiáridas caracterizadas habitualmente por una marcada variabilidad pluviométrica. Por ello, en tales regiones, pequeños cambios en la precipitación pueden provocar grandes variaciones en los niveles de recarga. Por ejemplo, Sandstrom (1995) demostró que una reducción del 15% en la lluvia, sin cambios en la temperatura, disminuyó un 40-50% la recarga de acuíferos. Así mismo, dado que en las citadas áreas son frecuentes los periodos de sequías (escasez de precipitaciones), las formaciones acuíferas suponen la única fuente de suministro hídrico “de origen estrictamente natural”, al tiempo que aportan el caudal base en los cursos fluviales (Senent-Alonso y García-Aróstegui, 2014; Jodar-Abellan *et al.* 2016). Se hace patente, por lo tanto, la relevancia de dichos embalses subterráneos en zonas áridas y semiáridas.

## **2.6. Inundaciones y sequías**

La mayoría de estudios realizados, y de los GCM y RCM aplicados, indican que la severidad, duración y frecuencia de situaciones climáticas extremas (inundaciones y sequías) aumentará en el siglo XXI a nivel global. Ello es debido principalmente a los incrementos previstos en la intensidad y variabilidad de la pluviometría. No obstante, los cambios proyectados en inundaciones y sequías dependen de numerosas variables: cambios en los usos del suelo, alteración del régimen de vientos y temperaturas, etc. Pese a la incertidumbre existente, con un nivel de confianza medio se prevé que la frecuencia e intensidad de las inundaciones aumentará en la mayoría de continentes de latitudes medias y en regiones tropicales húmedas. Las sequías aumentarán en regiones actualmente secas y en las que se prevé una reducción en la humedad del suelo como regiones continentales de interior durante verano especialmente en áreas subtropicales, en latitudes medias y bajas (suroeste de Estados Unidos, África austral, Mediterráneo, etc.). En general las regiones húmedas se humidificarán y las secas se resecarán (IPCC, 2013; Wanders y Van-Lanen, 2015).

## **2.7. Ecosistemas acuáticos asociados**

El cambio climático puede afectar considerablemente a los ecosistemas acuáticos asociados, ya que estos dependen de numerosos factores sensibles al clima: temperatura,

precipitación, calidad y disponibilidad del agua, manantiales y caudal base procedentes de acuíferos, etc. Dichos impactos pueden ser graves en lagos, humedales y embalses, donde cambios importantes en los cuerpos de agua pueden provocar alteraciones en el intercambio de nutrientes (ciclos del carbono, nitrógeno, fósforo, etc.) o invasiones de especies exóticas. Así mismo, estos ecosistemas influyen en el clima a escala global y local, puesto que las masas verdes del planeta constituyen los principales sumideros de CO<sub>2</sub> (IPCC, 2013; Klove *et al.* 2014).

## **2.8. Calidad del agua**

El cambio climático puede afectar a la calidad del agua superficial y subterránea debido a variaciones en los usos del suelo, la escorrentía, el transporte de contaminantes de origen agrícola, industrial y doméstico, la capacidad de asimilación y amortiguación de contaminantes por los cuerpos de agua como consecuencia de cambios en la temperatura, etc. Especial atención requieren las masas de agua superficiales (embalses, ríos, ramblas, etc.) localizadas en la vertiente meridional de España, dado que la reducción generalizada del propio volumen de agua transportado, de entre un 5% y un 15% en las próximas décadas (CEDEX, 2012), a menudo provocará un incremento en la concentración de agentes contaminantes de las aguas superficiales. Dicha circunstancia puede dificultar considerablemente el correcto cumplimiento de los estándares de calidad, para los mencionados cuerpos de agua, como los establecidos por la normativa europea en la Directiva Marco del Agua (DMA, 2000; Cabezas, 2012). Por otro lado, los estudios y propuestas desde las instituciones europeas (entre otras las Directivas 98/83/CE, 2000/60/CE o DMA, 2008/105/CE, 2013/39/UE, 2015/1787 de la Comisión, Propuesta de Directiva COM/2017/0753 final-2017/0332-COD, Decisión de Ejecución-UE 2018/840, etc.) pretenden: 1-Aumentar el elenco de contaminantes a eliminar en las aguas, incluyendo esencialmente los denominados contaminantes emergentes (contaminantes que son objeto de una preocupación creciente), y 2-Reducir los umbrales de los contaminantes presentes en las aguas. Por ello, las nuevas normativas y reglamentos presentarán un carácter aún más restrictivo que las actuales normas de ámbito europeo (DMA, 2000; Directiva 91/271/CEE, etc.) y nacional (RD Ley 1/2001; RD 907/2007; RD 1620/2007, etc.) de aplicación en la materia. Es lógico deducir que, en España, el correcto cumplimiento de los nuevos estándares, más restrictivos, se verá dificultado enormemente debido al contexto de cambio global, escasez de recursos hídricos e incremento de las concentraciones de los agentes contaminantes presentes en las aguas.

## **2.9. Subida del nivel del mar**

Entre 1901 y 2010 el nivel medio del mar subió 0.19 m a nivel global. Se estima, con alto nivel de confianza, que el incremento de la temperatura causará, en el siglo XXI, un aumento del nivel del mar superior debido a la expansión térmica del agua oceánica y al deshielo de glaciares y el hielo polar. Ello afectará a los recursos hídricos, favoreciendo la intrusión salina en acuíferos costeros, perjuicios en ecosistemas costeros y estuarios, etc. Así mismo, los retornos procedentes de aguas subterráneas continentales, que alcanzan la costa, intensificarán la subida del nivel del mar. Entre 1900 y 2008 el 6.7%

(12.6 mm) de la elevación total identificada se debió a dicha circunstancia (Bindoff *et al.* 2013; Gregory *et al.* 2013; IPCC, 2013).

### **3. CONCLUSIONES**

En la contribución presentada se hace patente la gran influencia del actual cambio global (esencialmente cambio climático y cambios en los usos del suelo) sobre los diferentes elementos del balance hídrico, cuya alteración conlleva impactos severos a los ecosistemas asociados y al medio socioeconómico (demandas agrarias, urbanas, industriales, etc.). Concretamente el cambio climático identificado en los últimos 25 años presenta una clara influencia de origen antrópico, sin la cual no sería posible explicar los registros obtenidos en la red de estaciones meteorológicas a nivel global.

De entre los datos que afectan a España, destaca especialmente la disminución que sufrirán las aportaciones fluviales, estimada entre un 5 y un 15%, en los próximos 20 años. Se prevé así mismo que sus efectos serán más severos en las estaciones de primavera y verano. Para finales de siglo se espera un descenso cercano al 20% con un nivel de significancia elevado. Además se prevé un incremento generalizado en la intensidad y concentración las precipitaciones.

Pese a la incertidumbre existente, parece razonable esperar que las aportaciones disminuyan en las próximas décadas. La desalación de aguas salobres y agua del mar, la reutilización de aguas residuales y los trasvases desde cuencas excedentarias, deberán poseer mayor relevancia en el suministro hídrico para las regiones deficitarias, siempre que se pretendan mantener sus actuales niveles de abastecimiento.

Los elementos del balance hídrico que presentan mayor incertidumbre en la cuantificación de sus futuras variaciones, como consecuencia del cambio climático, son: la evapotranspiración y las aguas subterráneas. En el caso de la evapotranspiración, dicha variable muestra elevada incertidumbre debido a las dificultades que presenta su estimación dado que habitualmente las estaciones meteorológicas no disponen de los equipos necesarios para obtener registros de todos los elementos que componen esta variable (caso de la radiación solar, velocidad del viento, etc.). Además, pese a que la comunidad científica coincide en que los aumentos de temperatura a menudo provocan incrementos de la evapotranspiración, por otro lado, el aumento del CO<sub>2</sub> atmosférico favorece la oclusión estomática de la vegetación reduciéndose así su transpiración. En cuanto a las aguas subterráneas, el aumento proyectado en la intensidad y concentración de la precipitación incrementa la escorrentía superficial (inundaciones) y dificulta la percolación e infiltración del agua en el subsuelo, reduciéndose así la recarga de acuíferos. Sin embargo, las propiedades hidrogeológicas de tales formaciones (permeabilidad, porosidad, transmisividad, etc.), junto con la elevada variación en los tiempos de tránsito y residencia del agua en los acuíferos (desde días a decenas de miles de años), conlleva que se retrasen y dispersen los efectos del cambio climático en las aguas subterráneas.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se incluye en las actividades de difusión científica realizadas desde la Cátedra del Agua de la Universidad de Alicante (<https://catedradelaguaua.org/>). Así mismo, esta contribución se enmarca parcialmente en los proyectos: GRE17-12 y *Life Empore* (Life15 ENV/ES/000598) dirigidos por la Universidad de Alicante. Adicionalmente, el primer autor agradece la financiación recibida del Programa Nacional de Formación de Profesorado Universitario (FPU) concedida por el Ministerio Español de Educación, Cultura y Deporte (MECD). Del mismo modo, los autores agradecen las sugerencias realizadas por los revisores anónimos, cuyos comentarios contribuyeron a mejorar el manuscrito.

## REFERENCIAS

- ABBASPOUR, K.C., ROUHOLAHNEJAD, E., VAGHEFI, S., SRINIVASAN, R., YANG, H. and KLOVE, B. (2015). A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*. 524: 733-752. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.03.027.
- ALLEN, M.R., STOTT, P.A., MITCHELL, J.F.B., SCHNUR, R. and DELWORTH, T.L. (2000). Quantifying the uncertainty in forecasts of anthropogenic climate change. *Nature*. 407: 617-620. DOI: 10.1038/35036559.
- BINDOFF, N.L., STOTT, P.A., ACHUTARAO, K.M., ALLEN, M.R., GILLETT, N., GUTZLER, D., HANSINGO, K., HEGERL, G., HU, Y., JAIN, S., MOKHOV, I.I., OVERLAND, J., PERLWITZ, J., SEBBARI, R. and ZHANG, X. (2013). *Detection and Attribution of Climate Change: from Global to Regional*. In: 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 y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 86 pp. Disponible en: [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5\\_Chapter10\\_FINAL.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_Chapter10_FINAL.pdf).
- CABEZAS, F. (2012). The European Water Framework Directive: A Framework?. *International Journal of Water Resources Development*. 28 (1), 19-26. <https://doi.org/10.1080/07900627.2012.640608>.
- CABEZAS, F. (2015). *Análisis Estructural de Modelos Hidrológicos y de Sistemas de Recursos Hídricos en Zonas Semiáridas*. Tesis Doctoral. Univ.Murcia. 290 pp. Disponible en: <https://digitum.um.es/xmlui/handle/10201/48218>.

CEDEX. (2012). *Estudio de los impactos del cambio climático en los recursos hídricos y las Masas de Agua. Efecto del cambio climático en los recursos hídricos disponibles en los sistemas de explotación*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). 296 pp. Clave CEDEX: 43-308-5-001. Disponible en: [http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/planificacion-hidrologica/ImpactoCCSistemasExplotacion\\_tcm7-310164.pdf](http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/planificacion-hidrologica/ImpactoCCSistemasExplotacion_tcm7-310164.pdf).

CEDEX. (2017). *Evaluación del Impacto del Cambio Climático en los Recursos Hídricos y Sequías en España. Informe Final*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). 346 pp. Clave CEDEX: 42-415-0-001. Disponible en: [http://www.cedex.es/CEDEX/LANG\\_CASTELLANO/ORGANISMO/CENTYLAB/CEH/Documentos\\_Descargas/EvaluacionimpactoCCsequiasEspana2017.htm](http://www.cedex.es/CEDEX/LANG_CASTELLANO/ORGANISMO/CENTYLAB/CEH/Documentos_Descargas/EvaluacionimpactoCCsequiasEspana2017.htm).

CUSTODIO, E., ANDREU-RODES, J.M., ARAGÓN, R., ESTRELA, T., FERRER, J., GARCÍA-ARÓSTEGUI, J.L., MANZANO, M., RODRÍGUEZ-HERNÁNDEZ, L., SAHUQUILLO, A. and DEL VILLAR, A. (2016). Groundwater intensive use and mining in south-eastern peninsular Spain: Hydrogeological, economic and social aspects. *Science of the Total Environment*. 559 (1): 302-316. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.02.107.

CYNTHIA, R., STRZEPEK, K.M., MAJOR, D.C., IGLESIAS, A., YATES, D.N., MCCLUSKEY, A., and HILLEL, D. (2004). Water resources for agriculture in a changing climate: international case studies. *Global Environmental Change*. 14: 345-360. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2004.09.003.

DMA. (2000). *Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de octubre de 2000 por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas*. 73 pp. Disponible en: <https://www.boe.es/doue/2000/327/L00001-00073.pdf>.

GOMARIZ-CASTILLO, F.J. (2015). *Estimación de Variables y Parámetros Hidrológicos y Análisis de su Influencia sobre la Modelización Hidrológica: Aplicación a los Modelos Témez y Swat*. Tesis Doctoral. Univ.Murcia. 861 pp. Disponible en: <https://digitum.um.es/xmlui/handle/10201/50539>.

GOMARIZ-CASTILLO, F., ALONSO-SARRÍA, F. and CABEZAS-CALVO-RUBIO, F. (2017). Calibration and spatial modelling of daily ET<sub>0</sub> in semiarid areas using Hargreaves equation. *Earth Science Informatics*. 11 (3): 325-340. <https://doi.org/10.1007/s12145-017-0327-1>.

GREEN, T.R., TANIGUCHI, M., KOOI, H., GURDAK, J.J., ALLEN, D.M., HISCOCK, K.M., TREIDEL, H. and AURELI, A. (2011). Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater. *Journal of Hydrology*, 405 (3), 532-560. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.05.002.

GREGORY, J.M., WHITE, N.J., CHURCH, J.A., BIERKENS, M.F.P., BOX, J.E., VAN DEN BROEKE, M.R., COGLEY, J.G., FETTWEIS, X., HANNA, E., HUYBRECHTS, P., KONIKOW, L.F., LECLERCQ, P.W., MARZEION, B., OERLEMANS, J., TAMISIEA, M.E., WADA, Y., WAKE, L.M. and VAN DE WAL, R.S.W. (2013). Twentieth-Century Global-Mean Sea Level Rise: Is the Whole Greater than the Sum of the Parts? *Journal of Climate*. 26 (13): 4476-4499. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00319.1

GREVE, P., KAHIL, T., MOCHIZUKI, J., SCHINKO, T., SATOH, Y., BUREK, P., FISCHER, G., TRAMBEREND, S., BURTSCHER, R., LANGAN, S. and WADA, Y. (2018). Global assessment of water challenges under uncertainty in water scarcity projections. *Nature Sustainability*. 1: 486-494. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0134-9>.

HANASAKI, N., FUJIMORI, S., YAMAMOTO, T., YOSHIKAWA, S., MASAKI, Y., HIJIOKA, Y., KAINUMA, M., KANAMORI, Y., MASUI, T., TAKAHASHI, K. and KANAE, S. (2013). A global water scarcity assessment under Shared Socio-economic Pathways—Part 2: Water availability and scarcity. *Hydrology and Earth System Sciences*. 17 (7): 2393-2413. DOI: 10.5194/hess-17-2375-2013.

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., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., y Midgley, P.M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom y New York, NY, USA, 1552 pp. Disponible en: [http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5\\_ALL\\_FINAL.pdf](http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf).

JÓDAR-ABELLÁN, A., JIMÉNEZ-GUERRERO, P., and GARCÍA-ARÓSTEGUI, J.L. (2016). Influencia del cambio climático en el excedente de escorrentía de la cuenca del Segura. Aproximación al caso de estudio mediante los modelos hidrológicos de Thornthwaite y Témez. *Capítulo XXIV (pp: 186-199). Libro: Desafíos del Derecho de Aguas [Variables jurídicas, económicas, ambientales y de Derecho comparado]. Teresa M. Navarro Caballero (Ed). 1ª ed., 2016.* Editorial Thomson Reuters Aranzadi, S.A. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/311909917\\_Influencia\\_del\\_cambio\\_climatico\\_en\\_el\\_excedente\\_de\\_escorrentia\\_de\\_la\\_cuenca\\_del\\_Segura\\_Aproximacion\\_al\\_caso\\_de\\_estudio\\_mediante\\_los\\_modelos\\_hidrologicos\\_de\\_Thornthwaite\\_y\\_Temez](https://www.researchgate.net/publication/311909917_Influencia_del_cambio_climatico_en_el_excedente_de_escorrentia_de_la_cuenca_del_Segura_Aproximacion_al_caso_de_estudio_mediante_los_modelos_hidrologicos_de_Thornthwaite_y_Temez).

KLOVE, B., ALA-AHO, P., BERTRAND, G., GURDAK, J.J., KUPFERSBERGER, H., KVAERNER, J., MUOTKA, T., MYKRÄ, H., PREDÄ, E., ROSSI, P., BERTACCHI-UVO, C., VELASCO, E. and PULIDO-VELÁZQUEZ, M. (2014). Climate change impacts on groundwater and dependent ecosystems. *Journal of Hydrology*. 518: 250-266. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.06.037.

- MOLINA, A. and MELGAREJO, J. (2015). Water policy in Spain: seeking a balance between transfers, desalination and wastewater reuse. *International Journal of Water Resources Development*. 32 (5): 781-798. DOI: 10.1080/07900627.2015.1077103.
- PULIDO-VELÁZQUEZ, D., GARCÍA-ARÓSTEGUI, J.L., MOLINA, J.L., and PULIDO-VELÁZQUEZ, M. (2015). Assessment of future groundwater recharge in semi-arid regions under climate change scenarios (Serral-Salinas aquifer, SE Spain). Could increased rainfall variability increase the recharge rate? *Hydrological Processes*, 29 (6), 828-844. DOI: 10.1002/hyp.10191.
- SANDSTROM, K. (1995). Modeling the effects of rainfall variability on groundwater recharge in semi-arid Tanzania. *Nordic Hydrology*, 26 (4-5), 313-330. Disponible en: <http://hr.iwaponline.com/content/26/4-5/313>.
- SENENT-ALONSO, M. and GARCÍA-ARÓSTEGUI, J.L. (2014). *Sobreexplotación de acuíferos en la cuenca del Segura. Evaluación y perspectivas*. Ed: Fundación Instituto Euromediterráneo del Agua. Murcia. 231 pp.
- UN. (2012). *Managing Water Under Uncertainty and Risk*. The United Nations World Water Development Report 4, vol. 1. UNESCO Publishing. Disponible en: <http://publishing.unesco.org/>.
- WADA, Y., VAN BEEK, L.P.H. and BIERKENS, M.F.P. (2012). Nonsustainable groundwater sustaining irrigation: A global assessment. *Water Resources Research*, 48 (6), 1-18. DOI: 10.1029/2011WR010562.
- WANDERS, N., and VAN-LANEN, H.A.J. (2015). Future discharge drought across climate regions around the world modelled with a synthetic hydrological modelling approach forced by three general circulation models. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15, 487-504. DOI: 10.5194/nhess-15-487-2015.
- YATES, D.N. (1997). Approaches to continental scale runoff for integrated assessment models. *Journal of Hydrology*, 201 (1-4), 289-310. DOI: 10.1016/S0022-1694(97)00044-9.