

Agua subterránea y cambio climático

Josep Mas-Pla

Grup de Geologia Aplicada i Ambiental (GAiA), Centre de Recerca en Geologia i Cartografia Ambiental (Geocamb), Departament de Ciències Ambientals, Universitat de Girona; y Institut Català de Recerca de l'Aigua, Girona, España.

Mail de contacto: josep.mas@udg.edu

RESUMEN

El efecto del cambio climático en los recursos de agua subterránea es complejo y modifica cada uno de los componentes del ciclo hidrológico. Por esta razón, la variabilidad del balance hídrico debida al cambio climático debe incluirse en la planificación futura de los recursos hídricos. Sin embargo, esta tarea no es simple dado que se debe considerar 1) las fuentes de incertidumbre de las proyecciones climáticas, 2) determinados problemas de escala para adaptar los resultados de estas proyecciones a las necesidades precisas de los estudios hidrogeológicos, y 3) los requerimientos metodológicos para representar las variaciones de los componentes del ciclo hidrológico en los modelos de flujo subterráneo. En esta ponencia se abordan estos tres aspectos concretos con el objetivo de ilustrar la complejidad de las simulaciones de disponibilidad futura de recursos hidrogeológicos.

Palabras clave: agua subterránea, cambio climático, modelos de flujo.

ABSTRACT

Climate change effects on water resources are complex as they modify each of the hydrological cycle components. Given its occurrence, the variability of the water balance due to climate change must be included in all future efforts of water resources planning. However, this task must consider: 1) the sources of uncertainty of climate projections, 2) specific scale problems to adapt climate projections to the needs of the hydrogeological studies, and 3) some methodological requirements for groundwater flow models to deal with climate change effects. This contribution explores all this three aspects with the aim to point out the complexity of future groundwater availability assessment.

Keywords: groundwater, climate change, flow models.

Introducción

Actualmente, no hay duda que el cambio climático opera diversas modificaciones en el ciclo hidrológico las cuales, a distintas escalas, se manifiestan en todo el planeta: desde la transformación de la dinámica atmosférica, que determina la variabilidad meteorológica, hasta la alteración del caudal de los ríos y de la recarga de los acuíferos. Todas estas modificaciones afectan la disponibilidad de agua y hacen del ciclo hidrológico uno de los más vulnerables al cambio climático, lo cual requerirá un intenso esfuerzo de adaptación por parte de la sociedad (IPCC, 2001, 2007; EEA, 2008, 2012; Dragoni y Sukhija, 2008; Cooley, 2009). En este contexto, si la demanda hídrica para usos humanos marcada por el aumento demográfico y las necesidades establecidas por el desarrollo socio-económico aumenta, se pone en evidencia la dificultad de satisfacer las dos funciones principales del recurso agua: el abastecimiento humano y la preservación de las

dinámicas ecológicas y geomorfológicas que sustenta (Sear et al., 1999; Hancock, 2002; Sophocleous, 2002).

Cuando en 2006, Al Gore utilizó el adjetivo "incómodo" para definir las alteraciones asociadas al calentamiento del planeta, lo hizo en el sentido de que nos obligaba a cambiar aquellos paradigmas en los que durante el siglo XX se había basado el conocimiento y la gestión de los recursos (Gore, 2006).

La hidrogeología y la gestión del agua no quedan exentas de este cambio de enfoque: obliga a hidrólogos e hidrogeólogos a modificar su percepción de los procesos que estudian, por la sencilla razón que el marco de referencia —el ciclo hidrológico— variará en magnitud y frecuencia durante las próximas décadas, debiendo incluirse esta variabilidad en los cálculos y previsiones en que se basará la gestión del agua en el futuro inmediato.

Las perspectivas de cambio hidrológico en los próximos 100 años son diversas a lo largo del planeta. Sin embargo, las estrategias para

incluirlas en los análisis de disponibilidad de agua son similares. Comprenden la definición de las tendencias de precipitación y temperatura a escala local a partir de los modelos climatológicos de circulación global, la consideración de la variabilidad de ambos parámetros y, finalmente, la modelización de estos efectos en el ciclo hidrológico, ya sea mediante la simulación de caudales o de niveles piezométricos en acuíferos, teniendo siempre presente la relación entre todos los componentes del ciclo del agua.

En esta comunicación se describen brevemente las implicaciones entre cambio climático y aguas subterráneas, exponiendo algunos aspectos relacionados con la modelización de los efectos esperables. En concreto, se comenta la variabilidad de los parámetros climáticos en el futuro y la incertidumbre que conlleva, el concepto de escala (tanto espacial como temporal) y algunos requerimientos metodológicos para incluir el cambio climático en los modelos de simulación hidrogeológica.

Cambio climático y ciclo hidrológico

Consideremos dos ejemplos. Para el Mediterráneo occidental, las previsiones climáticas a escala mundial coinciden en un incremento general de la temperatura entre 3 y 4°C, y una disminución de la precipitación alrededor de un 20%, especialmente en los meses estivales (IPCC, 2007). Utilizando diversas técnicas de regionalización (INM, 2007), éstas predicciones generales, desarrolladas en el contexto de los proyectos PRUDENCE (Christensen, 2005) y ENSEMBLE (Hewitt, 2005), se han adaptado a la idiosincrasia local pudiendo estimarse tendencias más detalladas a nivel local y estacional según los escenarios climáticos (Calbó, 2012). Ello permite obtener el detalle necesario para afrontar el cálculo del balance hídrico local.

En el contexto argentino, el volumen "*El cambio climático en Argentina*" (Castillo Marín et al., 2009, pp. 32-33) aporta la siguiente diagnosis: "Con respecto a los impactos del cambio climático a futuro, se espera un retroceso de los caudales de los ríos de la Cuenca del Plata debido a un considerable calentamiento y, por lo tanto, un incremento de la evaporación con una consiguiente reducción del escurrimiento superficial. Ésto traerá aparejado pérdidas en la generación hidroeléctrica regional, aumento de la concentración de contaminantes y dificultades en la navegación fluvial. Por la misma razón, se espera un aumento del estrés hídrico en todo el norte y parte del oeste del país lo que afectaría

la producción agropecuaria y en algunas zonas comprometería el suministro de agua potable.

Los escenarios climáticos indican que continuará la persistencia de disminución de la precipitación nival en la Cordillera de los Andes por lo que se verá afectada en gran medida la generación hidroeléctrica en las provincias de Mendoza, Río Negro y Neuquén. Asimismo, el actual modelo productivo de las provincias de Mendoza y San Juan basado en el riego en los oasis de los ríos andinos, se verá severamente afectado.

Se estima, además, que continuará la alta frecuencia de precipitaciones intensas e inundaciones en las zonas actualmente afectadas, con los consiguientes impactos negativos. En la Patagonia y Cuyo continuará el retroceso de los glaciares y en algunos puntos del litoral marítimo y de la costa del Río de la Plata, las inundaciones por mareas de tormenta afectarán mayores superficies debido al aumento del nivel del mar.

En relación a los eventos extremos, el incremento de su frecuencia en el futuro ha sido documentado como uno de los impactos principales del cambio climático a escala global. No obstante, en la escala local, las simulaciones de los modelos climáticos aún manejan un alto nivel de incertidumbre en la proyección de estos eventos".

El estudio dedicado al cambio climático en la cuenca del Río de la Plata (Barros et al., 2006) reconoce un aumento de las precipitaciones (+10%) desde la década de 1970 hasta la actualidad, especialmente en su zona nordeste. Ello ha conllevado un aumento porcentual de los caudales comparado con los valores medios en la cuenca, dado que la evaporación no muestra una tendencia positiva. Asimismo, se contempla la posibilidad que este aumento de caudal esté asimismo relacionado con la deforestación y los cambios agrícolas. También se ha registrado una mayor asiduidad de los episodios fuertes de lluvia, resultando en inundaciones más frecuentes.

Obviamente, en cada región del globo, la variación del contexto climático repercute en el balance hídrico de forma distinta y compleja. A grandes rasgos, la cantidad de recurso a nivel de cuenca se modificará tanto por la variación de la precipitación como de la evapotranspiración, dependiente tanto de la temperatura como de la cubierta forestal. La escorrentía superficial y la infiltración variarán en función de los parámetros anteriores, así como también según la distribución de intensidades de la precipitación y de la nivación en las cordilleras, aportando una variabilidad estacional distinta a

la actual. Consecuentemente, el flujo subterráneo variará al modificarse la recarga y, con él, la cantidad de agua almacenada en los acuíferos y su descarga natural a ríos y humedales, o bien a zonas de extracción (Figura 1). En las zonas costeras, las variaciones del nivel del mar supondrán un factor añadido en la cuantificación del balance hídrico y de la calidad del agua.

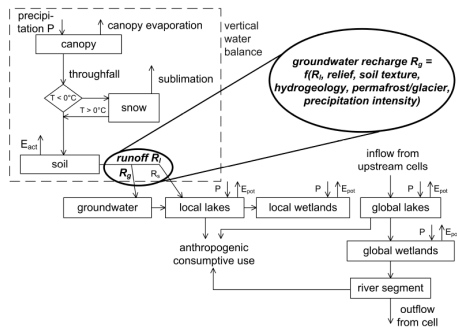


Figura 1. Complejidad de las relaciones entre los distintos componentes del ciclo hidrológico relacionados con el cálculo de la recarga de agua subterránea, según Döll y Fiedler (2008; *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 12).

Existen todavía otros factores que deben considerarse en la evolución futura del ciclo hidrológico: las variaciones que el cambio climático comportará en la cubierta vegetal de las cuencas influirán tanto en la pérdida por evapotranspiración como en la generación de escorrentía o de recarga subterránea (Gracia et al., 1999). En concreto, el cambio de usos del suelo en las cabeceras de las cuencas, por variación de la proporción entre zona forestal y zona agraria/pastoreo, es un factor antrópico relevante en la disponibilidad final de agua en ríos, suelo y acuíferos (Gallart y Llorens, 2001). En concreto, se reconoce que el impacto global de la intervención humana en el ciclo continental del agua, mediante el cambio de usos del suelo y la explotación de los recursos hidrológicos, será tanto o más intenso en la disponibilidad de agua que las presiones propiamente atribuibles al cambio climático (Vörösmarty et al., 2004). Adicionalmente, cabe resaltar los efectos indirectos sobre los recursos subterráneos asociados al cambio climático. En particular, la demanda asociada a la agricultura incrementará

el uso de agua subterránea debido a la escasez prevista de agua superficial en amplias zonas del planeta; lo cual a su vez puede acarrear daños ecológicos al afectar a la relación río-acuífero o de otra índole (subsistencia, intrusión marina, ...; Taylor et al., 2013).

Modelización de los procesos hidrogeológicos en el contexto de cambio climático

La simulación de los procesos hidrogeológicos; es decir, la evaluación del balance hídrico en un sistema acuífero mediante el cómputo de los flujos y la variación del recurso almacenado; se halla "incómodamente" afectada por la realidad del cambio climático. Ésta conlleva distintos tipos de incertidumbre que limitan la capacidad predictiva de los modelos hidrogeológicos, a la vez que obliga a considerar con mayor atención las escalas espaciales y temporales del modelo y, finalmente, a evaluar con mayor criterio los resultados obtenidos destinados a la optimización de los recursos en el proceso de adaptación a condiciones ambientales cambiantes.

Fuentes de incertidumbre

Más allá de los errores en los detalles conceptuales de los propios modelos (que raramente se consideran; Refsgaard et al., 2006); existen distintos tipos de incertidumbre, especialmente en los parámetros que definen las condiciones de contorno y las fuentes o sumideros del modelo. Las más relevantes se hallan asociadas a las mismas previsiones futuras de precipitación y temperatura, en las que se basa la simulación. Los posibles escenarios de futuro basados en la emisión de gases de efecto invernadero y el desarrollo económico ya poseen por sí mismas un cierto grado de imprecisión y, por ello, dan lugar a distintas predicciones de ambas variables para una misma localidad (Portmann et al., 2013). Esta incertidumbre dificulta los análisis necesarios para obtener una posible serie climática fiable, además de los problemas de escala que se comentan a más adelante. Aceptemos pues que, actualmente, la hipótesis de estacionaridad de las series climáticas es errónea y que los valores medios, incluso con su nivel de confianza asociado, ya no son apropiados para sustentar simulaciones hidrológicas (Milly et al., 2008). Asimismo, las predicciones climáticas advierten del aumento de valores extremos poco habituales en las series históricas, siendo la propia modelización de estos valores el objetivo del modelo en múltiples ocasiones (Kidmose et al., 2012). Ello dificulta una apropiada calibración; lo cual, a su

vez, limita la confianza en el modelo matemático utilizado.

Adicionalmente, los modelos hidrogeológicos empleado para predecir la evolución de los recursos subterráneos en un plazo de décadas se enfrentan a la variabilidad de los escenarios socio-económicos. De la misma manera que aceptamos que el clima del futuro será distinto al actual, sería inadecuado pensar que los modelos de explotación territorial y de demanda de recursos hídricos permanecerán invariantes. La transformación en los usos del suelo, ya sea por incremento de la agricultura o cambio de cultivo, dependiente de las circunstancias del mercado, como de las masas forestales por abandono de las mismas, implican cambios en el balance hídrico ya sea por explotación de los recursos o por variación de los procesos naturales, en particular, la evapotranspiración. Añadamos a ello la variación de la demanda por conversión de los sectores económicos o, simplemente, por los cambios demográficos a corto y medio plazo. La predicción de esta transformación socio-económica es difícil, incorporando otra fuente de incertidumbre a las simulaciones hidrogeológicas. Asimismo, cabe esperar que para las predicciones a medio plazo se apliquen políticas de adaptación, en muchos casos actualmente sin definir, cuya eficacia hace aún más incierta la predicción de cambios en los recursos hídricos de una cuenca (Holman et al., 2012).

Escalas espaciales y temporales

La elección de la escala espacial del modelo depende, como es conocido, del objetivo del problema planteado. Evidentemente, el nivel de detalle será distinto para una cuenca de miles de kilómetros cuadrados que para una cuenca mucho menor. En el caso de la modelización de amplias extensiones, las predicciones climáticas derivadas de los modelos de circulación global servirán de referencia y, naturalmente, el nivel de precisión esperable será más relajado.

En cuencas menores, en las cuales la modelización tenga por objetivo la evaluación de los recursos y los límites de explotación apropiados, la inclusión de la perspectiva climática en el modelo requerirá un proceso de escalado o regionalización (en inglés, *down-scaling*; Prudhomme et al., 2002). Esto se debe a que los modelos de predicción climática tienen habitualmente resoluciones de 10x10 km, muy superiores a las celdas habitualmente usadas en la modelización hidrogeológica (por ejemplo, Scibek et al., 2007). Determinados modelos de alta resolución espacial se hallan anidados en modelos a mayor escala y, por tanto, menor

precisión, que permiten simular las condiciones de contorno que condicionan la zona interior de mayor interés (Keating et al., 2003). Sin embargo, los datos climáticos obtenidos mediante técnicas de regionalización deberían usarse con cautela, y aplicando las correcciones posteriores necesarias, en un modelo hidrogeológico dadas la esperable divergencia entre datos diarios reales y simulados y la discrepancia entre los modelos locales para una misma celda espacial.

Similarmente, la escala temporal es otra cuestión a resolver con anterioridad a la modelización. La resolución de los modelos climáticos puede llegar hasta escala diaria, lo cual puede llegar a ser un detalle restrictivo para la discretización temporal en modelos numéricos de flujo. Sin embargo, el uso de valores medios mensuales, como posible simplificación, es inadecuado para reproducir ciertos comportamientos hidrológicos (Mas-Pla et al., 2012).

Algunos requerimientos metodológicos

En el marco de la necesidad de predecir el comportamiento hidrogeológico en escenarios futuros, el uso de modelos es sin duda la herramienta más apropiada. Los modelos numéricos de flujo han sido utilizados con éxito durante más de 30 años para reproducir la dinámica de los sistemas hidrogeológicos y evaluar los límites de explotación de sus recursos hídricos. En general, interiorizando los inconvenientes derivados de la incertidumbre y de la escala de trabajo, los actuales modelos son adecuados para simular variaciones de los parámetros tales como cambios en la recarga, evapotranspiración o regímenes de bombeo. Quizás la parte que comporta mayores dificultades es la interacción entre los cursos fluviales y los acuíferos. La dependencia de muchos algoritmos del nivel de agua en el cauce (*stream/river stage*) para calcular la magnitud y sentido del flujo entre río y acuífero implica un buen conocimiento previo del régimen de caudales y de la morfología del cauce, ambas relacionadas con la distribución de la precipitación y de la generación de escorrentía en la cuenca, con el agravante que los valores extremos serán más frecuentes a causa del cambio climático.

Además, las relaciones entre variación de la precipitación y la escorrentía no son lineales. La evolución de los hidrogramas depende de la interrelación entre variables (por ejemplo, el grado de saturación de humedad en el suelo, entre otras) que no pueden resolverse satisfactoriamente mediante aproximaciones simplistas. Por ello, los modelos que acoplan

conjuntamente los procesos relacionados con el agua subterránea y la dinámica hidrológica superficial serán los idóneos para simular el efecto del cambio climático en los recursos de agua subterránea (Barron et al., 2011).

A escala regional, la recarga de aquellas zonas de los sistemas hidrogeológicos de mayor interés depende de los procesos en sus áreas circundantes, habitualmente montañosas, cuyos rasgos estructurales determinan flujos preferenciales de recarga a las zonas de bombeo (Folch y Mas-Pla, 2010). En estos entornos, los modelos deben considerar como la evolución de la recarga en zonas de montaña (dependiente de variables climáticas, usos del suelo y presiones antrópicas, conjuntamente) influencia la descarga hacia las zonas de interés. Ello conlleva una ampliación de los límites del modelo y la simulación de flujo en zonas habitualmente con escasos datos hidrogeológicos (por ejemplo, niveles piezométricos, conductividad hidráulica; entre otras variables) que dificultan la calibración de los resultados numéricos y, con ella, merman la credibilidad del modelo. La extensión de los contornos del modelo a las zonas más alejadas, y elevadas, de recarga implica otorgar una mayor atención a la caracterización geológica del sistema y extremar la simulación de los flujos verticales tanto de recarga como de descarga hacia las zonas de explotación donde se centra el interés del modelo.

Finalmente, la variación del nivel del mar en las zonas litorales afectará la disponibilidad de los recursos de agua dulce, especialmente en las costas donde se dé una disminución del flujo subterráneo, determinada por el crecimiento de la cuña salina y su interfase (Kruse y Mas-Pla, 2009; Oude Essink, et al., 2010). El uso de modelos para flujos en densidad variable será imprescindible para simular el efecto del ascenso de la cota del mar en la dinámica hidrogeológica.

Conclusiones

Los efectos del cambio climático, acrecentados por la actividad antrópica, en el balance hídrico son complejos y afectan a todos los componentes del ciclo hidrológico, incluida la recarga de los recursos subterráneos. Las proyecciones climáticas implican, en todos los casos, extremar los criterios y acciones de la gestión hidrológica, tanto para garantizar el abastecimiento y proteger las actividades humanas de los eventos extremos (sequías, inundaciones) como para preservar las funciones ecohidrológicas del agua.

La evaluación de estos efectos debe basarse en el monitoreo y control hidrológico de todos los componentes del ciclo en las zonas más vulnerables, así como en las áreas limítrofes donde se efectúa la recarga y, por tanto, regulan el flujo subterráneo hacia las zonas de explotación. La modelización de los sistemas hidrogeológicos requiere algunas reflexiones previas referentes a la incertidumbre asociada a las proyecciones climáticas, a las distintas escalas involucradas en predicción hidrológica (caudales y flujo subterráneo) y al acierto en el modelo conceptual empleado.

Todo ello refuerza la interdisciplinariedad de este tipo de estudios, requiriendo la colaboración de distintas especialidades científicas (climatólogos, ecólogos, edafólogos, economistas, sociólogos, ...) en la investigación hidrogeológica.

Agradecimientos

El contenido de esta ponencia se enmarca en el contexto de sesiones y reflexiones sobre los efectos del cambio climático que realiza el Grup d'Experts en Canvi Climàtic de Catalunya (<http://www.iec.cat/canviclimatic/>; <http://www.gen.cat.cat/cads/>).

Referencias

- Barron, O.V. et al. (2011). *Climate change impact on groundwater resources in Australia*. Waterlines Report Series, 67. National Water Commission, Canberra.
- Barros, V., Clarke, R. y Silva Días, P. (2006). *El cambio climático en la Cuenca del Plata*. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas – CONICET.
- Calbó, J. (2012). Possible climate change scenarios with specific reference to Mediterranean 20 regions. En: Sabater, S. y D. Barceló (eds.) *Water scarcity in the Mediterranean: perspectives 21 under global change*. Handbook of environmental chemistry. Springer-Verlag; pp. 1-13.
- Castillo Marín, N., ed. (2009). *El cambio climático en Argentina*. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. Buenos Aires.
- Christensen, J.H. (2005). *Prediction of regional scenarios and uncertainties for 35 defining European climate change risks and effects (PRUDENCE) final report*. 269 pp. Website: <http://prudence.dmi.dk>
- Cooley, H. (2009). Water Management in a changing climate. En: Gleick, P. *The World's Water 2008-2009*. IslandPress, pp. 39-56.

- Döll, P. y Fiedler K. (2008). Global-scale modeling of groundwater recharge. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 12, 863–885.
- Dragoni, W. y Sukhila, B.S. (2008). Climate change and groundwater: a short review. *En: Dragoni, W. y Sukhila, B.S. (eds.). Climate Change and Groundwater*. Geological Society, London, Special Publications, 288, pp. 1-12.
- EEA (2008). *Impacts of Europe's changing climate - 2008 indicator-based assessment*. Report 4/2008. European Environ. Agency.
- EEA (2012). Climate change, impacts and vulnerability in Europe. Report 12/2012. European Environ. Agency.
- Folch, A. y Mas-Pla, J. (2008). Hydrogeological interactions between fault zones and alluvial aquifers in regional flow systems. *Hydrol. Proc.*, 22: 3476-3487.
- Gallart, F. y Llorens, P. (2001). Efectos de los cambios de uso y cubierta del suelo en los aportes del río Ebro y su evolución futura. *En: Prat, N. y C. Ibáñez (eds.) El curso inferior del Ebro y su delta*. Univ. de Cantabria–Univ. de Barcelona, p. 51-57.
- Gore, A. (2006). *An Inconvenient Truth*. Rodale Press.
- Gràcia, C. A., Tello, E., Sabaté, S. y Bellot J. (1999). "GOTILWA: An integrated model of water dynamics and forest growth. *Ecological Studies*, 137: 163-179.
- Hancock, P.J. (2002). Human impacts on the stream-groundwater exchange zone. *Environ. Management*, 29: 763–781.
- Hewitt, C. (2005). *The ENSEMBLES Project: providing ensemble-based predictions of climate 15 changes and their impacts*. The EGGGS, EGU newsletter, 13.
- Holman, I.P. (2006). Climate change impacts on groundwater recharge-uncertainty, shortcomings, and the way forward? *Hydrogeol. J.*, 14: 637-647.
- Holman, I.P., Allen, D.M., Cuthbert, M.O., Goderniaux, P. (2012). Towards best practice for assessing the impacts of climate change on groundwater. *Hydrogeol. J.*, 20: 1-4.
- INM (2007). *Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España*. Instituto Nacional de Meteorología.
- IPCC (2001). *Climate Change, 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Intergovernmental Panel for Climate Change, Contribution of WG- II to the 3rd Assessment Report. Cambridge University Press.
- IPCC (2007). *Climate Change, 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Intergovernmental Panel for Climate Change, Contribution of WG-II, 4th Assessment Report. Cambridge University Press.
- Keating, E.H. et al. (2003). Coupling basin- and site-scale inverse models of the Española aquifer. *Ground Water*, 41: 200-211.
- Kidmose, J., Refsgaard, J.C., Trolldborg, L., Seaby L.P. y Escrivà M.M. (2012). Climate change impact on groundwater levels: ensemble modelling of extreme values. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 9: 7835–7875.
- Kruse, E. y Mas-Pla, J. (2009). Procesos hidrogeológicos y calidad del agua en acuíferos litorales. *En: Mas-Pla, J. y G.M. Zuppi (eds.) Gestión ambiental integrada de las zonas costeras*. Rubes Editorial, pp. 29-54.
- Mas-Pla, J., Font E., Astui, O., Menció, A., Rodríguez-Florit, A., Folch, A., Brusi, D. y Pérez-Paricio, A. (2012). Development of a stream-aquifer numerical flow model to assess river water management under water scarcity in a Mediterranean basin. *Sci. of the Total Environ.*, 440: 204-218.
- Milly, P.C.D. et al. (2008). Stationarity is dead: Whither water management?. *Science*, 319: 573-574.
- Oude Essink, G.H.P., van Baaren, E.S. y de Louw, P.G.B. (2010). Effects of climate change on coastal groundwater systems: a modeling study in the Netherlands. *Water Resour. Res.*, 46, W00F04.
- Portmann, F.T., Döll, P., Eisner, S. y Flörke, M. (2013). Impact of climate change on renewable groundwater resources: assessing the benefits of avoided greenhouse gas emissions using selected CMIP5 climate projections. *Environ. Res. Lett.*, 8 (024023).
- Prudhomme, C., Reynald, N. y Crooks S. (2002). Downsampling of global climate models for flood frequency analysis: where are we now? *Hydrol. Proc.*, 16: 1137-1150.
- Refsgaard, J.C. et al. (2006). A framework of dealing with uncertainty due to model structure. *Adv. Water Resour.*, 29:1586-1597.
- Scibek, J., Allen, D.M., Cannon, A.J. y Whitfield P.H. (2007). Groundwater-surface water interaction under scenarios of climate change using a high-resolution transient groundwater model. *J. of Hydrol.*, 333: 165-181.
- Sear, D.A., Armitage, P.D. y Dawson, F.H. (1999). Groundwater dominated rivers. *Hydrol. Proc.*, 13: 255-276.
- Sophocleous, M. (2002). Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeology J.*, 10: 52-67.
- Taylor, R.G., et al. (2013). Ground water and climate change. *Nature Climate Change*, 3: 322-329.
- Vörösmarty, C., et al. (2004). Humans transforming the global water system. *Eos, AGU Transactions*, 85(48): 509-512.