



F. Gallart

*Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA), CSIC. Jordi Girona 18. 08034, Barcelona
Correo electrónico: francesc.gallart@idaea.csic.es*

28

Vulnerabilidades de los recursos hídricos en relación al cambio climático y a sus interacciones con los ecosistemas terrestres.

Resultados clave

- En diversas cuencas hidrográficas de España se han observado en los últimos 50-60 años reducciones de los caudales anuales atribuidas al incremento de la cubierta forestal, tanto o más importantes que los cambios atribuidos a las variaciones de precipitación y temperatura.
- Las predicciones de los modelos climáticos coinciden en aumentos de temperatura y descensos de precipitación más marcados en verano que en invierno, causando un aumento del estrés hídrico de la vegetación y una reducción de los caudales de estiaje.
- El diseño de una gestión forestal adaptativa a los aspectos hidrológicos del cambio climático requerirá un gran esfuerzo científico y técnico, ya que un buen número de las prácticas y especies forestales tradicionales no serán adecuadas.
- Será necesario establecer estrategias de gestión forestal para conservar los recursos hídricos ante escenarios de cambio climático, como contener la reforestación de los pastos de montaña y de las áreas de recarga de grandes acuíferos.

■ Evolución reciente de los recursos hídricos en cuencas de España

Durante la última década se han publicado diversos trabajos que muestran claros descensos de los aportes hídricos en las cabeceras de varias cuencas hidrográficas durante los últimos 50 años, como el Ebro (Gallart & Llorens 2003, 2004, Beguería et al. 2003, López-Moreno et al. 2011), la vertiente Norte del Duero

(Morán-Tejeda et al. 2012), el Llobregat y el Ter (Gallart et al. 2012). En todos estos estudios se evidencia que el descenso de los aportes no se justifica por razones climáticas, sino que debe atribuirse total o parcialmente al aumento de la evapotranspiración causada por la extensión de la cubierta forestal en esas cabeceras, ya que no han experimentado ningún aumento relevante de los consumos de agua para el regadío (García-Ruiz et al. 2011). López-Moreno et al. (2010) muestran además que durante este período se observa una disminución de la frecuencia y tamaño de las crecidas en las cabeceras pirenaicas que no se justifica por cambios en la precipitación sino que debe atribuirse al aumento de la cubierta forestal. También encuentran un aumento de los caudales bajos, sobre todo en invierno y primavera; este aumento debería atribuirse principalmente a una fusión prematura de la nieve por aumento de la temperatura (0.3° C por década según López-Moreno et al. 2011).

Es relevante destacar que tanto en las cabeceras del Ebro (Gallart & Llorens 2004) como del Llobregat y Ter (Gallart et al. 2011), la relación encontrada entre el aumento de la cubierta forestal y el descenso de los aportes es muy próxima a la que se puede predecir como resultado del aumento de la cubierta forestal según los resultados obtenidos en cuencas experimentales en todo el Mundo, sintetizados en la ecuación de Zhang et al (2001). En la Tabla 1 se resumen los cambios observados en estas cuencas. La variación bruta de los aportes hídricos se refiere a la variación observada en los aforos y la variación neta se refiere a la variación residual de los aportes una vez se ha tenido en cuenta el efecto de la variabilidad climática, así como el aumento de los usos consuntivos (riego) en el caso de la cuenca del Ebro.

Estos resultados ponen de manifiesto que las previsiones sobre la disponibilidad de recursos hídricos para el futuro no pueden estimarse solamente a partir de

Tabla 1. Cambios en los aportes hídricos y la cubierta forestal en algunas cuencas hidrográficas. Los períodos de estudio son diversos. Basado en Gallart & Llorens (2003) y Gallart et al. (2011).

Cuenca	Aportes hídricos			Cubierta forestal
	Medios anuales hm ³	variación bruta anual (%)	Variación neta anual (%)	variación anual (% de la cuenca)
Ebro	12900	-0,63	-0,20	0,22
Cardener	99	-0,82	-0,50	0,61
alto Llobregat	210	-1,10	-0,66	0,39
alto Ter	493	-0,25	-0,26	0,36

los resultados de los modelos climáticos, sino que también hay que tener en cuenta las modificaciones sufridas por la cubierta vegetal, que, a su vez, dependen de la evolución del clima, de los ciclos vegetativos y de la gestión del territorio. A título de comparación, las reducciones estimadas durante un periodo de 50 años por causa del aumento de la cubierta forestal respecto a los caudales medios anuales son del 10 al 17% para el Ebro (Gallart & Llorens 2003), del 25% para el Cardener (afluente del Llobregat) y del 12% para el alto Ter (Gallart et al. 2011). En la actualidad se dispone de modelos adecuados para la previsión de los aportes de agua a la escala de cuenca operacional (de gestión de recursos) ante cambios de cubierta y clima (Delgado et al. 2010, Zhang et al. 2001).

■ Otros resultados experimentales sobre los efectos hidrológicos de los cambios en la cubierta vegetal

Además de las observaciones mencionadas en cuencas operacionales, los resultados experimentales obtenidos en diversos ambientes muestran que los suelos suelen estar más húmedos en los claros de hierba que bajo cubierta arbórea (Gallart et al. 1997, Gray et al. 2002, Cubera & Moreno 2007, García-Estríngana et al. 2013), lo que implica tasas de recarga de los acuíferos más elevadas en ausencia de cubierta forestal (Joffre & Rambal 1993, Ladekarl et al. 2005, Green et al. 2006). En algunos casos particulares, como en la recarga localizada de sistemas cársticos en ambientes semiáridos, la cubierta forestal puede tener poca importancia (Bazan et al. 2013).

Los resultados de estos trabajos a escala de parcela son congruentes con los estudios a largo plazo realizados en extensas zonas semiáridas de diversas partes del Globo, que coinciden en mostrar ascensos retardados de la capa freática como respuesta a la corta de matorrales o bosques naturales para dar lugar a pastos o cultivos de secano (Clarke et al. 2002, Scanlon et al. 2005, Leblanc et al. 2008). En la actualidad se dispone de modelos adecuados para la previsión de la recarga de acuíferos ante cambios de cubierta y clima (Bellot et al. 2001, 2013).

Numerosos estudios realizados en cuencas experimentales muestran que los caudales bajos o de estiaje aumentan en igual o mayor porcentaje que los de crecida al eliminar la cubierta forestal, llevando en

algunos casos a un cambio en el régimen hídrico, que pasa de estacional a permanente, o viceversa en el caso de forestación (Hornbeck et al. 1993, Scott et al. 2000, Sikka et al. 2003, Silberstein et al. 2003, Brown et al. 2005). En algunas cuencas experimentales o de mayor tamaño los efectos de los cambios de cubierta sobre los caudales bajos son inapreciables, lo que se ha atribuido a un efecto más importante de las características geológicas que de la cubierta sobre los caudales de estiaje: si los acuíferos son de pequeño volumen pueden ser rellenados completamente durante la estación húmeda sea cual sea la cubierta, de modo que los caudales de estiaje no son afectados por sus cambios (Robinson et al. 2003, Calder 2005).

■ Previsiones de cambios en los sistemas hidrológicos durante las próximas décadas

Las predicciones de cambio climático tienen un elevado grado de incertidumbre, debida a los diversos escenarios de emisiones y a las características de los distintos modelos. Además, la precipitación, que es la entrada principal de los sistemas hidrológicos, no es simulada de un modo fiable por los modelos climáticos actuales. A pesar de estas incertidumbres, hay un amplio consenso entre los diversos modelos en que el aumento de la temperatura y, en segundo lugar, la disminución de la precipitación van a causar una reducción sensible, entre el 10 y el 30% de los recursos hídricos en la Península Ibérica para mediados del presente siglo respecto al periodo de finales del siglo XX (Arnell et al. 2003, Milly et al. 2005).

Desde el punto de vista estacional, las predicciones muestran un notable acuerdo en que los aumentos de temperatura y descensos de precipitación serán mucho más acusados en verano que en invierno a finales del presente siglo (Christensen et al. 2007). Para simplificar el problema podemos considerar los dos principales factores limitantes de la evapotranspiración: la energía (donde no falta agua) y el agua (donde no falta energía). En ambientes donde la evapotranspiración está limitada por la energía, como la alta montaña, un aumento de la temperatura en verano puede representar un incremento directo de la evapotranspiración y un descenso de los aportes hídricos, pero en los ambientes donde la evapotranspiración está limitada por la disponibilidad del agua, un aumento de la temperatura en verano puede no tener efecto apreciable sobre la evapotranspiración real

y los caudales. Cabe esperar por lo tanto que el aumento de la aridez tenga mayores efectos sobre el estrés hídrico de las comunidades vegetales terrestres que sobre la generación de los recursos hídricos.

Sin embargo, cabe prever que, tanto el incremento de la severidad de la sequía estival como la fusión prematura del manto nival en alta montaña debida al aumento de las temperaturas, originen un descenso de los caudales de estiaje (García-Ruiz et al. 2011). Paralelamente, es previsible que se produzca un notable aumento de la frecuencia y magnitud de las sequías extremas, de modo que las sequías que tenían un período de recurrencia de 100 años a finales del siglo XX pueden tener períodos de recurrencia entre 70 y menos de 10 años a mediados del presente siglo (Lehner et al. 2005). Las modificaciones de las crecidas son menos claras en las predicciones para la zona Mediterránea; aunque se considera en general que los eventos extremos tendrán un papel creciente como resultado de una circulación atmosférica intensificada, no se ha observado un aumento de las crecidas relacionado con el calentamiento climático (Kundzewicz et al. 2007).

Por otro lado, los cambios en el forzamiento climático no se producirán sobre una cubierta vegetal estacionaria, sino que ésta sufrirá modificaciones que afectarán a las consecuencias hidrológicas de los cambios de precipitación y temperatura. Algunas de las causas de estas modificaciones de la cubierta vegetal son la expansión y crecimiento de masas forestales sobre áreas de cultivos o pastos abandonados (Poyatos et al. 2003), la forestación de áreas de alta montaña cercanas al límite altitudinal del bosque favorecida por el calentamiento climático (Peñuelas et al. 2007, véase también sección 3.2.3), la decadencia de especies inadaptadas a las condiciones climáticas cambiantes por causas directas (Keenan et al. 2011) o por proliferación de plagas (Rouault et al. 2006), y las actuaciones de gestión forestal que se lleven a cabo.

■ Recursos hídricos y gestión forestal adaptativa ante el contexto actual

Hasta finales del siglo XX la gestión forestal realizada en numerosos países, entre ellos España, partía de la hipótesis de que el aumento de la masa y cubierta forestal en una cuenca hidrográfica era la mejor opción para proteger los suelos frente a la erosión y regular la respuesta hidrológica. Es decir, disminuir las crecidas y mejorar la regularidad de los recursos, al favorecer la recarga de los acuíferos y aumentar los caudales de estiaje (MAGRAMA 2002). En la actualidad se dispone de evidencias suficientes para afirmar que la cubierta forestal puede aportar una buena protección contra la erosión y las crecidas pequeñas y moderadas, pero a expensas de una mayor evapotranspiración, lo que suele conllevar disminuciones apreciables de los aportes hídricos totales, la recarga de los acuíferos y los caudales de estiaje. Solamente los bosques que capturan volúmenes importantes de neblina o los bosques primigenios (más de 100 años) parecen apartarse de esta regla general (véase el siguiente apartado). Este cambio de paradigma ya ha sido recogido recientemente en documentos del ámbito de la gestión forestal, como la FAO (2006) y el European Forest Institute (2011).

A causa de las condiciones climáticas cambiantes y del cambio de paradigma, el diseño de las actuaciones de restauración hidrológico-forestal de las cuencas hidrográficas y la propia definición de los servicios ecosistémicos hidrológicos del bosque están en estos momentos en una encrucijada y plantean serios retos científicos y técnicos. La protección contra la erosión de los suelos y la protección de los recursos hídricos mediante la forestación ya no son equivalentes, sino que en la mayor de los casos son antagónicas. En unas determinadas áreas la protección de los suelos será el criterio preferente de las actuaciones, mientras que en otras lo será la generación de escorrentía o la recarga de los acuíferos. La selección de especies con diversas necesidades hídricas, el diseño de actuaciones como ciclos de corta, aclareos o control del sotobosque, así como las previsiones sobre la progresión, el crecimiento y la viabilidad de las masas forestales en distintas localizaciones de las cuencas bajo condiciones climáticas cambiantes son algunos de estos retos.

La gestión forestal de cada perímetro dependerá de los servicios ecosistémicos prioritarios, pudiendo ser la generación de recursos hídricos en alguno de ellos. A título de ejemplo, debería evitarse la instalación de cubiertas forestales densas en áreas donde se generan los principales recursos hídricos en las cuencas. Las cabeceras en áreas de montaña alta y media húmeda han sido tradicionalmente utilizadas como pastos para el ganado, pero en la actualidad suelen experimentar la expansión del bosque por efecto del abandono de las actividades pecuarias y por el calentamiento global, lo que está produciendo una disminución de la generación de los recursos hídricos. Las áreas de recarga de los grandes acuíferos son también zonas que deberían mantenerse libres de una cubierta forestal densa, siempre que ello sea compatible con otros servicios ecosistémicos prioritarios. Por último, tal como suele hacerse en diversas áreas semiáridas, debería evitarse la excesiva propagación de rodales de freatofitas para conservar los recursos subterráneos y los caudales de estiaje (Doody et al. 2011).

■ Material suplementario

En el texto anterior se ha intentado mostrar una visión sintética del tema planteado sin entrar en aspectos más técnicos que podrían dificultar su lectura. Como complemento, se adjuntan algunos aspectos adicionales que amplían o justifican el contenido anterior

Papel de los cambios de cubierta vegetal en los balances de agua

Si solamente consideramos los factores limitantes a la evapotranspiración, se pueden simplificar las diferencias entre las cubiertas de árboles y de vegetación corta (Calder 1998b). Cuando el factor limitante es la energía, una cubierta de árboles suele tener un albedo más bajo (capta más energía radiativa) y tiene una rugosidad aerodinámica mucho más elevada (intercambia energía y materia con una capa atmosférica mucho más gruesa) que una cubierta herbácea. Durante los eventos lluviosos, los árboles tienen una biomasa aérea más importante, por lo que pueden interceptar un mayor volumen de agua y, por las razones anteriores, tienen una mayor capacidad de evaporar el agua interceptada. Cuando el factor limitante es el agua, los árboles suelen tener un sistema de raíces notablemente más profundo

que las herbáceas, de modo que tienen acceso a un mayor volumen de agua. Como resultado, los árboles tienen una mayor capacidad de evapotranspirar agua que las cubiertas herbáceas en una amplia gama de condiciones, lo que explica la coincidencia de los resultados obtenidos en diversas partes del mundo (véase por ejemplo, Brown et al. 2005, Zhang et al. 2011).

Si una cubierta forestal implica una mayor evapotranspiración real que una cubierta herbácea, originará una mayor humedad atmosférica y por lo tanto un mayor retorno de esta humedad en forma de precipitación (véase una explicación de los mecanismos en Millán et al. 2005). Lo que suele ocurrir en la realidad es que esta mayor precipitación se hace efectiva fuera del ámbito de la misma cuenca, a escala de cuenca muy grande o continental. Hay varios ejemplos observados y simulados de variación de la precipitación a escala continental como resultado de cambios de la cubierta vegetal (Calder 1998a, 2005). El estudio de Millán et al. (2005) ha mostrado una disminución de las precipitaciones convectivas estivales en la región valenciana durante el período 1959-1999, que ha sido atribuida, como hipótesis de trabajo y entre otras causas, a una menor evapotranspiración por deforestación de las montañas litorales y prelitorales. Sin embargo, esta hipótesis es incompatible con el notable aumento de la cubierta forestal observada en estas zonas durante las últimas décadas como consecuencia del abandono rural (Segura-Beltrán & Sanchis-Ibor 2013).

Hay pocas excepciones a la pauta general de que la cubierta de bosque origina una disminución de los aportes de la cuenca en comparación una cubierta herbácea. En algunas zonas con neblinas recurrentes, los árboles pueden captar parte de esta neblina y convertirla en 'precipitación oculta' que puede representar una entrada de agua importante en zonas con poca pluviosidad convencional (Bruijnzeel et al. 2005). También se ha observado que cuando se talan o queman bosques primigenios la escorrentía muestra un aumento inicial, pero desciende fuertemente respecto al valor originario al desarrollarse un bosque joven. Se ha sugerido por lo tanto

que el consumo de agua de algunos bosques desciende paulatinamente con su edad, hasta llegar a tasas estables no mucho más elevadas que los de una cubierta herbácea, cuando alcanzan una edad de 100 - 150 años (Kuczera 1987, Vertessy et al. 2001).

Perspectivas actuales de la gestión de los recursos de agua en las cuencas hidrográficas

La gestión tradicional de los recursos de agua en una cuenca se basa en estimar los aportes de agua disponibles en ríos y acuíferos, utilizando los datos de aforos o las simulaciones realizadas con un modelo hidrológico, y realizar unas asignaciones de caudales a los diversos usos previstos (MARM 2008). El gran problema de este enfoque desde en punto de vista de la sostenibilidad, sobre todo en un contexto de cambio global, es que asume que el ciclo hidrológico empieza en (y solamente se puede gestionar a partir de) el río o el embalse. La evidencia de que los usos y cubiertas vegetales de las cabeceras de las cuencas tienen un papel relevante en los aportes de agua de los ríos ha mostrado la necesidad de realizar una gestión integral del balance de agua de las cuencas, teniendo en cuenta todos los consumos (naturales y artificiales) en particular cuando los recursos de agua en la cuenca son limitados. La República de Sudáfrica ha tenido un papel pionero en el desarrollo de esta aproximación integral cuando se hizo evidente que el establecimiento de explotaciones forestales comerciales en las cabeceras de las cuencas disminuía los aportes de agua necesarios para los cultivos de subsistencia en las partes bajas. Esto llevó a la promulgación de la 'National Water Act' (Republic of South Africa 1998), en la cual las explotaciones forestales comerciales se consideran 'actividades de reducción de los caudales fluviales' (*Stream Flow Reduction Activities*) y están obligadas a compensar económicamente a la autoridad de la cuenca por la detracción de caudales que ocasionan. En palabras de Calder (2005), esta ley representó salir de las reglas coloniales y las regulaciones de los países Europeos húmedos, que favorecían los intereses de un grupo dominante con acceso privilegiado a la tierra y el agua.

Figura 1

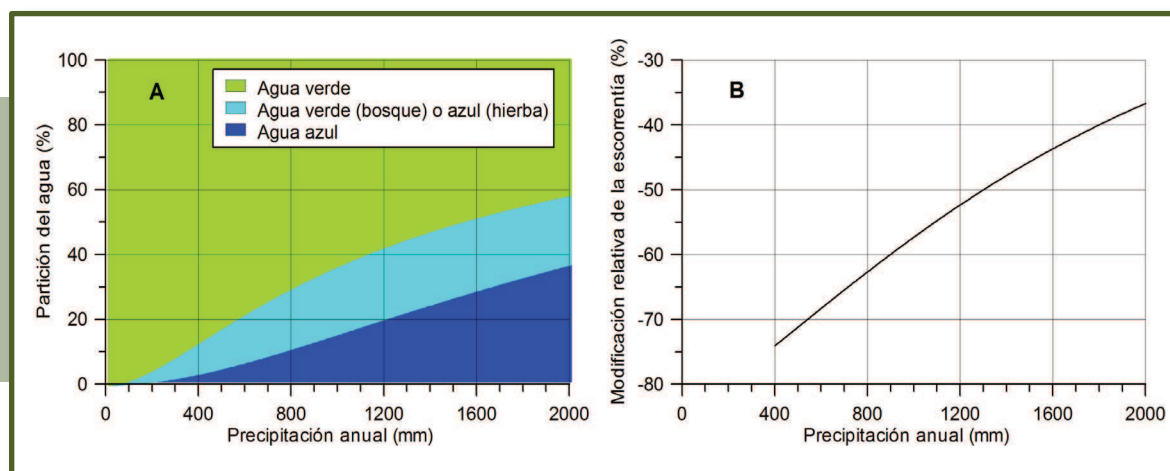


Figura 1. SA: Diagrama de la partición del agua de lluvia en un rango de precipitación entre: i) agua verde, ii) agua verde si la cubierta vegetal es forestal o agua azul si es herbácea e iii) agua azul en cualquier caso. B: Simulación de la modificación relativa de la escorrentía en caso de forestación total de una cuenca de cubierta herbácea. Se ha utilizado la ecuación original de Zhang et al (2001) que asume un clima subtropical con elevada demanda evapotranspirativa (1100 mm anuales).

Fuente: Elaboración propia.

Para facilitar la gestión integral del territorio y el agua, en 1993 se introdujo en un seminario de la FAO (1995) el concepto de ‘agua verde’ para expresar y cuantificar el agua consumida por los ecosistemas terrestres, incluyendo los prados y cultivos de secano, reservando el término de ‘agua azul’ para el agua líquida de escorrentía o subterránea. Se estima que, a nivel mundial, dos tercios del agua de precipitación se emplean en la producción de la biomasa de los ecosistemas terrestres (agua verde) mientras que solamente un tercio es agua azul; el 60-70% de la producción de alimentos en el mundo se produce gracias al ‘agua verde’ que no se tiene en cuenta en los balances de agua tradicionales.

Este enfoque permite la asignación de recursos de agua a todos los usos de la cuenca, sean irrigados o no, haciendo posible la integración de la gestión del agua con la gestión del territorio (Calder 2005, Falkenmark & Rockstrom 2004). Los cambios de uso y cubierta vegetal, aunque no sean irrigados, pueden de este modo ser gestionados por la autoridad de cuenca. Esto facilita, por ejemplo, el establecimiento de compensaciones económicas por los servicios ecosistémicos relacionados con los cambios de uso o las actuaciones de gestión forestal, como talas o entresacas. La Figura 1A muestra un diagrama de la partición de la lluvia entre agua verde y agua azul para un rango de precipitación; la Figura 1B muestra que en los climas secos y subhúmedos el cambio de cubierta vegetal representa un gran cambio relativo en la partición del agua.

Modelos hidrológicos

Las series de aportes observadas en las estaciones de aforos no son usualmente adecuadas para la planificación hidrológica. Esto se debe a dos causas: los caudales observados son afectados por la gestión de los recursos (embalses, tomas y retornos), y solamente están disponibles en los puntos de observación y no en los puntos de interés para la gestión. Por estas razones se utilizan modelos hidrológicos (o de lluvia-escorrentía) para generar series de caudales ‘en régimen natural’ a partir de los registros climáticos en los puntos de interés de la cuenca.

Los modelos utilizados para esta finalidad en España son normalmente el Sacramento (Burnash 1995), que se calibra utilizando las series de aforos de estaciones que se consideran poco influenciadas por los usos, y el SIMPA (Ruiz-García 1999) que se parametriza con mapas de características del terreno. En ambos casos, los modelos se utilizan para convertir las series de precipitación y evapotranspiración potencial en series de aportes, suponiendo que las características de las cuencas no varían en el tiempo. Por esta razón a los aportes simulados de este modo se les debería llamar propiamente caudales ‘en régimen climático’.

La comparación de los aportes simulados en régimen climático con los aportes observados es uno de los métodos que permiten estudiar el papel hidrológico de los cambios sufridos en las cabeceras, una vez descontados los cambios de usos consuntivos de agua en el caso de que se hayan producido. La utilización de los registros y simulaciones realizadas por los organismos responsables de la gestión para estos estudios tiene la doble ventaja de ser más convincente ante estos organismos y de facilitar la aplicación de los resultados a la gestión.

Existen pocos modelos hidrológicos diseñados para estudiar el papel hidrológico de los cambios de cubierta vegetal. El modelo más sencillo es la ecuación de Zhang et al. (2001) que expresa el balance anual de agua en un área de cubierta vegetal uniforme usando un solo parámetro empírico (tipo de cubierta vegetal). Aunque para el desarrollo de esta ecuación se utilizaron solamente cuencas en climas subtropicales exentas de precipitación nival, ha dado resultados aceptables cuando se ha aplicado a cuencas con cabeceras pirenaicas con un papel poco importante de la nieve en la precipitación total (Delgado et al. 2010, Gallart et al. 2011). Esta ecuación se puede implementar fácilmente en un Sistema de Información Geográfica para estudiar la respuesta de cuencas medianas y grandes ante diversos escenarios (Bradford et al. 2001). El modelo a escala diaria más empleado en la práctica es SWAT (Arnold & Fohrer 2005) el cual, aunque tiene unas bases conceptuales notablemente débiles, se basa en una estructura en ‘unidades de respuesta hidrológica’ y tiene la gran ventaja de disponer de una extensa comunidad de usuarios que intercambian información y experiencias. El modelo HYLUC (Calder et al. 2003, Delgado et al. 2010) es un modelo agregado de subcuencas a escala diaria especialmente diseñado para este problema, que tiene sólidas bases conceptuales. Por último, existen también otros modelos, como el modelo mensual SIMPA, que aunque no han sido diseñados para esta finalidad, admiten la adaptación de sus parámetros a distintas cubiertas vegetales para simular los cambios (Ruiz-García 1999). Antes de utilizar este tipo de modelos para esta finalidad es aconsejable verificar que el cambio de parámetros de cubierta vegetal representa esencialmente una modificación de las tasas de evapotranspiración real, y que las demás alteraciones en los flujos y almacenes simulados son consecuentes con esta modificación.

Referencias bibliográficas

- Arnell NW (2003) Effects of IPCC SRES emissions scenarios on river runoff: a global perspective. *Hydrology and Earth System Sciences* 7:619-641
- Arnold JG, Fohrer N (2005) SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. *Hydrological Processes* 19:563-572
- Bazan RA, Wilcox BP, Munster C, Gary M (2013) Removing woody vegetation has little effect on conduit flow recharge. *Ecohydrology* 6:435-443
- Beguéría S, López-Moreno JI, Lorente A, Seeger M, García-Ruiz JM (2003) Assessing the effects of climate oscillations and land-use changes on streamflow in the Central Spanish Pyrenees. *Ambio* 32:283-286
- Bellot J, Benet A, Sanchez JR, Chirino E (2001) Likely effects of land use changes on the runoff and aquifer recharge in a semiarid landscape using a hydrological model. *Landscape and Urban Planning* 55:41-53
- Bellot J, Chirino E (2013) Hydrobal: An eco-hydrological modelling approach for assessing water balances in different vegetation types in semi-arid areas. *Ecological Modelling* 266: 30-41

- Bradford A, Zhang L, Hairsine P (2001) *Implementation of a mean annual water balance model within a GIS framework and application to the Murray-Darling basin*. Cooperative Research Centre for catchment Hydrology. Technical Report 01/8. Bruce, Australia. Disponible en: <http://www.nfp-facility.org/5865-06c5b4f34ca7eb9155af198cbfd42498.pdf> Último acceso 27 de Enero de 2014
- Brown AE, Zhang L, McMahon TA, Western T, Vertessy RA (2005) A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology* 310:28–61
- Bruijnzeel LA, Eugster W, Burkard R (2005) Fog as a hydrologic input. En: Anderson M, McDonnell J, Anderson M, editores. *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. John Wiley and Sons, Chichester. pp. 559-582
- Burnash RJC (1995) The NWS River Forecast System - Catchment Modeling. En: Singh VP, editor. *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications, Littleton, Colo. pp: 311-366
- Calder IR (1998a) *Water-resource and land-use issues. SWIM Paper 3*. International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka. Disponible en: http://www.iwmi.cgiar.org/Publications/SWIM_Papers/PDFs/SWIM03.PDF Último acceso 27 de Enero de 2014
- Calder IR (1998b) Water use by forests, limits and controls. *Tree Physiology* 18:625-631
- Calder IR (2003) Assessing the water use of short vegetation and forests: development of the Hydrological Land Use Change (HYLUC) model. *Water Resources Research* 39:1318
- Calder IR (2005) *Blue Revolution: Integrated Land and Water Resources Management*. Earthscan, London
- Christensen JH, Hewitson B, Busuioc A, Chen A, Gao X, Held I, Jones R, Kolli RK, Kwon W-T, Laprise R, Magaña Rueda V, Mearns L, Menéndez CG, Räisänen J, Rinke A, Sarr A, Whetton P (2007) Regional Climate Projections. En: Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HB, editores. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge and New York
- Clarke CJ, George RJ, Bell RW, Hatton TJ (2002) Dryland salinity in South-Western Australia: its origins, remedies and future research directions. *Australian Journal of Soil Research* 40:93-113
- Cubera E, Moreno G (2007) Effect of land-use on soil water dynamic in dehesas of Central–Western Spain. *Catena* 71:298-308
- Delgado J, Llorens P, Nord G, Calder IR, Gallart F (2010) Modelling the hydrological response of a Mediterranean medium-sized headwater basin subject to land cover change: The Cardener River basin (NE Spain). *Journal of Hydrology* 383:125-134
- Doody TM, Nagler PL, Glenn EP, Moore GW, Morino K, Hultine KR, Benyon RG (2011) Potential for water salvage by removal of non-native woody vegetation from dryland river systems. *Hydrological Processes* 25:4117-4131
- European Forest Institute (2011) *Agua para los bosques y la Sociedad en el Mediterráneo. Un difícil equilibrio*. What Science can tell us, European Forest Institute. Disponible en: http://www.efi.int/files/attachments/publications/efi_what_science_can_tell_us_1_2011_sp.pdf Último acceso 27 de Enero de 2014
- Falkenmark M, Rockstrom J (2004) *Balancing Water for Humans and Nature. The New Approach in Ecohydrology*. Earthscan, Sterling, VA. Disponible en: <http://f3.tiera.ru/1/genesis/655-659/658000/a342d7a0a312513181fec0537faaadbe>. Último acceso 27 de Enero de 2014
- FAO (1995) *Land and water integration and river basin management*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/v5400e/v5400e00.HTM> Último acceso 27 de Enero de 2014
- FAO 2006. *The new generation of watershed management programmes and projects*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. Disponible en: <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/009/a0644e/a0644e.pdf>. Último acceso 27 de Enero de 2014
- Gallart F, Llorens P (2003) Catchment management under environmental change: Impact of land cover change on water resources. *Water International* 28:334–340
- Gallart F, Llorens P (2004) Observations on land cover changes and water resources in the headwaters of the Ebro catchment, Iberian Peninsula. *Physics and Chemistry of the Earth* 29:769-773
- Gallart F, Latron J, Llorens P, Rabadà D (1997) Hydrological functioning of Mediterranean mountain basins in Vallcebre, Catalonia: Some challenges for hydrological modelling. *Hydrological Processes* 11:1263-1272
- Gallart F, Delgado J, Beatson SJV, Posner H, Llorens P, Marcé R (2011) Analysing the effect of global change on the historical trends of water resources in the headwaters of the Llobregat and Ter river basins (Catalonia, Spain). *Physics and Chemistry of the Earth* 16:655-661
- García-Estríngana P, Latron J, Llorens P, Gallart F (2013) Spatial and temporal dynamics of soil moisture in a Mediterranean mountain area (Vallcebre, NE Spain). *Ecohydrology* 6:741 - 753
- García-Ruiz JM, López-Moreno JI, Vicente-Serrano SM, Lasanta-Martínez T, Beguería S (2011) Mediterranean water resources in a global change scenario. *Earth Sciences Reviews* 105: 121-139

- Gray AN, Spies TA, Easter MJ (2002) Microclimatic and soil moisture responses to gap formation in coastal Douglas-fir forests. *Canadian Journal of Forest Research* 32:332-43
- Green JC, Reid I, Calder IR, Nisbet TR (2006) Four-year comparison of water contents beneath a grass ley and a deciduous oak wood overlying Triassic sandstone in lowland England. *Journal of Hydrology* 329:16-25
- Hornbeck JW, Adams MB, Corbett ES, Verry ES, Lynch JA (1993) Long-term impacts of forest treatments on water yield: a summary for northeastern USA. *Journal of Hydrology* 150: 323-344
- Joffre R, Rambal S (1993) How Tree Cover Influences the Water Balance of Mediterranean Rangelands. *Ecology* 74:570-582
- Keenan T, Serra JM, Lloret F, Ninyerola M, Sabate S (2011) Predicting the future of forests in the Mediterranean under climate change, with niche- and process-based models: CO2 matters! *Global Change Biology* 17:565-579
- Kuczera G (1987) Prediction of water yield reductions following a bushfire in ash mixed species eucalypt forest. *Journal of Hydrology* 94:215-236
- Kundzewicz ZW, Mata LJ, Arnell NW, Döll P, Kabat P, Jiménez B, Miller KA, Oki T, Sen Z, Shiklomanov IA (2007) Freshwater resources and their management. En: Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, van der Linden PJ, Hanson CE, editores. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge
- Ladekarl UL, Rasmussen KR, Christensen S, Jensen KH, Hansen B (2005) Groundwater recharge and evapotranspiration for two natural ecosystems covered with oak and heather. *Journal of Hydrology* 300:76-99
- Leblanc MJ, Favreau G, Massuel S, Tweed S, Loireau M, Cappelaere B (2008) Land clearance and hydrological change in the Sahel: SW Niger. *Global and Planetary Change* 61:135-150
- Lehner, B, Döll P, Alcamo, J, Henrichs H, Kaspar F (2005) Estimating the impact of global change on flood and drought risks in Europe: a continental, integrated assessment. *Climatic Change* 75:273-299
- López-Moreno JI, Beguería S, García-Ruiz JM (2010) Trends in high flows in the central Spanish Pyrenees: response to climatic factors or to land-use change? *Hydrological Sciences Journal* 51:1039-1050
- López-Moreno JI, Vicente-Serrano SM, Morán-Tejeda E, Zabalza J, Lorenzo-Lacruz J, García-Ruiz JM (2011) Impact of climate evolution and land-use changes on water yield in the Ebro basin. *Hydrology and Earth System Sciences* 15:311-322
- McCulloch JSG, Robinson M (1993) History of forest hydrology. *Journal of Hydrology* 150:189-216
- MAGRAMA (2002) Plan Forestal Español. MAGRAMA, Madrid. Disponible en: http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/temas/politica-forestal/pfe_tem7-30496.pdf. Último acceso 27 de Enero de 2014
- MARM (2008) Orden ARM/2656/2008 de 10 de septiembre por la que se aprueba la instrucción de planificación hidrológica. Boletín Oficial del Estado 229:38472-38582
- Milly PCD, Dunne KA, Vecchia AV (2005) Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature* 438:347-350
- Morán-Tejeda E, Ceballos-Barbancho A, Llorente-Pinto JM, López-Moreno JI (2012) Land-cover changes and recent hydrological evolution in the Duero Basin (Spain). *Regional Environmental Change* 12:17-33
- Peñuelas J, Ogaya R, Boada M, Jump AS (2007) Migration, invasion and decline: changes in recruitment and forest structure in a warming-linked shift of European beech forest in Catalonia (NE Spain). *Ecography* 30:829-837
- Poyatos R, Latron J, Llorens P (2003) Land use and land cover change after agricultural abandonment. The case of a mediterranean mountain area (Catalan Pre-Pyrenees). *Mountain Research and Development* 23:362-368
- Republic of South Africa (1998) National Water Act. (Act No. 36 of 1998). Government Gazette 398 no. 19182
- Robinson M, Cognard-Plancq AL, Cosandey C, David J, Durand P, Fuhrer HW, Hall R, Hendriques MO, Marc V, McCarthy R, McDonnell M, Martin C, Nisbet T, O'Dea P, Rodgers M, Zollner A (2003) Studies of the impact of forests on peak flows and baseflows: a European perspective. *Forest Ecology and Management* 186:85-97
- Rouault G, Candau JN, Lieutier F, Nageleisen LM, Martin JC, Warzée N (2006) Effects of drought and heat on forest insect populations in relation to the 2003 drought in Western Europe. *Annals of Forest Sciences* 63:613-24
- Ruiz García JM (1999) Modelo distribuido para la evaluación de recursos hídricos. Monografías del CEDEX, 67. Ministerio de Fomento, Madrid
- Scanlon BR, Reedy RC, Stonestrom DA, Prudic DE, Dennehy KF (2005) Impact of land use and land cover change on groundwater recharge and quality in the southwestern US. *Global Change Biology* 11:1577-1593
- Scott DF, Prinsloo FW, Moses G, Mehlomakulu M, Simmers ADA (2000) A re-analysis of the South African afforestation experimental data, Water Research Commission, WRC Report No. 810/1/00, South Africa

- Segura-Beltrán F, Sanchis-Ibor C (2013) Assessment of channel changes in a Mediterranean ephemeral stream since the early twentieth century. The Rambla de Cervera, eastern Spain. *Geomorphology* 201:199-214
- Sikka AK, Samra JS, Sharda VN, Samraj P, Lakshmanan V (2003) Low flow and high flow responses to converting natural grassland into bluegum (*Eucalyptus globulus*) in Nilgiris watersheds of South India. *Journal of Hydrology* 270:12-26
- Silberstein R, Adhitya A, Dabrowski C (2003) Changes in flood flows, saturated area and salinity associated with forest clearing for Agriculture. Technical Report 03/1. CRC Centre for Catchment Hydrology, Monash, Australia. Disponible en: <http://www.catchment.crc.org.au/pdfs/technical200301.pdf>. Último acceso 27 de Octubre de 2008
- Vertessy RA, Watson RGR, O'Sullivan SK (2001) Factors determining relations between stand age and catchment water balance in mountain ash forests. *Forest Ecology and Management* 143:13-26
- Zhang L, Dawes WR, Walker GR (2001) Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research* 37:701-708