

Bosques, suelo y agua: explorando sus interacciones

J.A. Blanco^{1,*}

(1) Departamento de Ciencias del Medio Natural, ETSIA, Universidad Pública de Navarra, Campus de Arrosadía s/n, 31006, Pamplona, Navarra, España.

* Autor de correspondencia: J.A. Blanco [juan.blanco@unavarra.es]

> Recibido el 20 de julio de 2017 - Aceptado el 25 de julio de 2017

Blanco, J.A. 2017. Bosques, suelo y agua: explorando sus interacciones. *Ecosistemas* 26(2): 1-9. Doi.: 10.7818/ECOS.2017.26-2.01

Los bosques y el agua: acciones a nivel internacional

Miles de millones de personas sufren los efectos de un acceso inadecuado al agua (Mekonnen y Hoekstra 2016). En muchas regiones del mundo la explotación excesiva de los recursos hídricos disponibles, el mal de uso de los mismos o su contaminación representan una amenaza cada vez mayor para la disponibilidad y la calidad del agua para usos agrícolas, industriales o urbanos (FAO 2009). El cambio climático puede exacerbar la escasez de agua y amenazar la seguridad alimentaria, pudiendo ser una de las causas de migraciones masivas, aumentando la conflictividad social y política (Kelley et al. 2015). Los bosques juegan un papel integral en el suministro de agua de calidad para distintos usos, y también en estabilizar y proteger los suelos de la erosión. La mayoría del agua dulce mundial se proporciona a través de cuencas arboladas, y los bosques protegen muchos embalses y presas del colmatado por sedimentos. Además, los bosques protegen las aguas subterráneas de contaminantes por medio de la labor filtrante de los suelos forestales (FAO 2009). Tanto el suelo como el agua son condicionantes esenciales en el crecimiento y salud de los árboles, y también del resto de organismos que componen los sistemas forestales. Sin embargo, debido a una demanda creciente de agua para usos urbanos, agrícolas e industriales, así como de terreno urbanizable debido a una población humana que aumenta tanto su número como su calidad de vida, los bosques están con frecuencia bajo fuertes presiones. En muchas regiones del mundo estas presiones se exacerbarán debido al cambio climático (IUFRO 2017).

La *International Union of Forest Research Organizations* (IUFRO) es la principal organización internacional dedicada a investigaciones forestales. IUFRO reúne a la mayoría de organizaciones, sociedades científicas e instituciones académicas que investigan la estructura y funcionamiento de los bosques de todo el mundo. Conecta en una red a 700 organizaciones de 110 países, uniendo a más de 15 000 científicos (IUFRO 2017). Uno de los cinco temas de investigación principales de la estrategia de IUFRO para el período 2015-2019 es "Bosques, suelo, agua y sus interacciones". Para desarrollar este tema, en julio de 2015 se constituyó en Kelowna (Canadá) la *IUFRO Task Force on Forests, Soil and Water Interactions*, para desarrollar una abanico de actividades integradoras sobre este tema. La estrategia 2015-2019 identifica varias lagunas de conocimiento e incertidumbres relacionadas con las interacciones entre bosques, suelos y agua, en particular con los efectos del cambio climático, la gestión forestal, la conservación

del suelo y el suministro de agua. En consecuencia, las áreas de conocimiento que enfatiza la estrategia de la IUFRO incluyen: 1) gestión a macro-escalas e impactos sobre ciclos de agua regionales; 2) estrategias de gestión forestal para la adaptación y mitigación del cambio climático; 3) comprensión del papel de protección de los ecosistemas forestales sobre la conservación de los recursos hídricos; y 4) comprensión del papel de protección de los bosques en la prevención y reducción de desastres naturales relacionados con el agua.

La IUFRO no es la única organización que reconoce la importancia de la relación entre bosques y agua. En particular, la *Reunión Internacional de Expertos sobre los Bosques y el Agua*, celebrada en Shiga (Japón) en noviembre de 2002, puso de relieve la necesidad de adoptar un enfoque más integral para comprender la interacción entre el agua, los bosques, otros usos de la tierra y los factores socioeconómicos en los complejos ecosistemas de las cuencas hidrográficas. Seguidamente, el *Año Internacional del Agua Dulce* (AIAD, celebrado en 2003) y el *Tercer Foro Mundial del Agua* (Kyoto, Japón, 2003) contribuyeron a incorporar en las políticas de gestión de los recursos hídricos esta nueva perspectiva de las interacciones biofísicas entre los bosques y el agua. La FAO sintetizó las principales conclusiones de estos proyectos en una *Agenda para los Bosques y Agua* (FAO 2013). A continuación, la FAO lanzó el *Plan de Acción para los Bosques y el Agua* en el Congreso Forestal Mundial de Durban (Sudáfrica, 2015). El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP), también incluye los bosques dentro de su estrategia para el agua de 2017 a 2021 (UNEP 2017). Todo ello ha generado la necesidad de organizar y aumentar el conocimiento científico existente. Para cubrir esta necesidad las organizaciones internacionales han generado desde entonces diversas revisiones del estado del conocimiento. Algunas de las más destacadas son: 1) el informe sobre los efectos hidrológicos de la gestión forestal en un contexto de cambio en los paisajes publicado por el Consejo de Investigación Nacional de los EE.UU. (CHIFM 2008); 2) el informe "Los Bosques y el Agua" de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO 2009); 3) el reciente informe de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) sobre el impacto de la gestión forestal sobre los recursos hídricos en 13 países de los cinco continentes (García-Chevesich et al. 2017). Por parte de la IUFRO, reconociendo la importancia de este tema, se está organizando actualmente un nuevo informe del Panel Global de Expertos en Bosques (GFEP).

Además, como parte de las actividades que la IUFRO Task Force en Bosques, Suelo, Agua y sus Interacciones, del que el autor de esta editorial es miembro, se presenta este monográfico de la revista ECOSISTEMAS para contribuir a la generación de literatura científica en castellano que pueda contribuir a la mejora de la comprensión de estas complejas relaciones entre bosques, clima, suelo y disponibilidad de agua para usos rurales, urbanos e industriales. El autor espera que este monográfico, con aportaciones de científicos de Colombia, México y España, pueda servir de puerta de entrada a los investigadores que quieran profundizar en el tema.

Los bosques influyen en el ciclo hidrológico global

Los bosques juegan un importante papel en la regulación de los flujos de humedad atmosférica y en las pautas de precipitación sobre zonas terrestres (Ellison et al. 2017). Las superficies terrestres y oceánicas del planeta liberan vapor de agua a la atmósfera. Sobre las superficies continentales, este proceso se complementa con la liberación activa de agua por parte de los bosques y otros tipos de vegetación por medio de la evapotranspiración, una combinación de la evaporación de agua desde la superficie del suelo y las plantas y la transpiración por las plantas que absorben agua del suelo para desplazarla hacia la atmósfera y aprovechar el movimiento generado para mover sus fluidos internos (Fig. 1). La evapotranspiración suele representar al menos un 40% de la precipitación sobre zonas terrestres, pudiendo llegar en algunos ecosistemas de bosques lluviosos tropicales al 70% (Van der Ent et al. 2010; Jasechko et al. 2013). La humedad atmosférica resultante circula alrededor de los continentes y océanos del planeta por medio de los vientos. Este mecanismo puede considerarse como una forma de redistribución del agua entre las distintas superficies terrestres (Ellison et al. 2017).

Aunque la humedad atmosférica, y en consecuencia la contribución de la evapotranspiración a la precipitación, siguen pautas y movimientos a escalas continentales, tradicionalmente estos fenómenos se han estudiado como parte de un ciclo hidrológico forestal poco dinámico, emplazado en una escala local (Fig. 1). Esta visión tradicional limita una comprensión más integradora de la relación de los bosques no sólo con el agua a nivel local o aguas abajo, sino con los flujos hídricos en las zonas a sotavento. Por ejemplo, se ha comprobado que en zonas tropicales, el aire que pasa sobre zonas arboladas provoca el doble de precipitación que el aire que pasa sobre zonas con vegetación escasa (Spracklen et al. 2012). Por otro lado, los bosques promueven la precipitación al producir partículas y aerosoles que se liberan en la atmósfera (polen, bacterias, restos del dosel arbóreo, esporas de hongos, etc.) y que funcionan como núcleos de agregación sobre los que se condensa el vapor de agua, generando precipitación (Morris et al. 2014; Sheil 2014). Estas tele-conexiones entre zonas arboladas y zonas de precipitación pueden existir a nivel local, regional o incluso continental (Ellison et al. 2017). Debido a ello, al aumentar la deforestación, los lugares que estén más alejados de la influencia de los vientos costeros serán los primeros en notar cambios en la predictibilidad, extensión y cantidad de precipitación. Tales cambios pueden llegar a provocar el paso de climas húmedos a secos en las regiones fronterizas entre ambos tipos de clima (Sheil y Murdiyarso 2009). De hecho, la controvertida nueva teoría de la "bomba biológica" propone que la circulación de vientos desde el mar hacia los continentes se debe primariamente a la creación activa por parte de los bosques de zonas de bajas presiones por medio de la transpiración y condensación (Makarieva et al. 2013). Si dicha teoría llega a confirmarse, la reducción de la cubierta forestal podría afectar a la circulación del aire, llegando incluso a invertir las pautas de vientos (Sheil y Murdiyarso 2009).

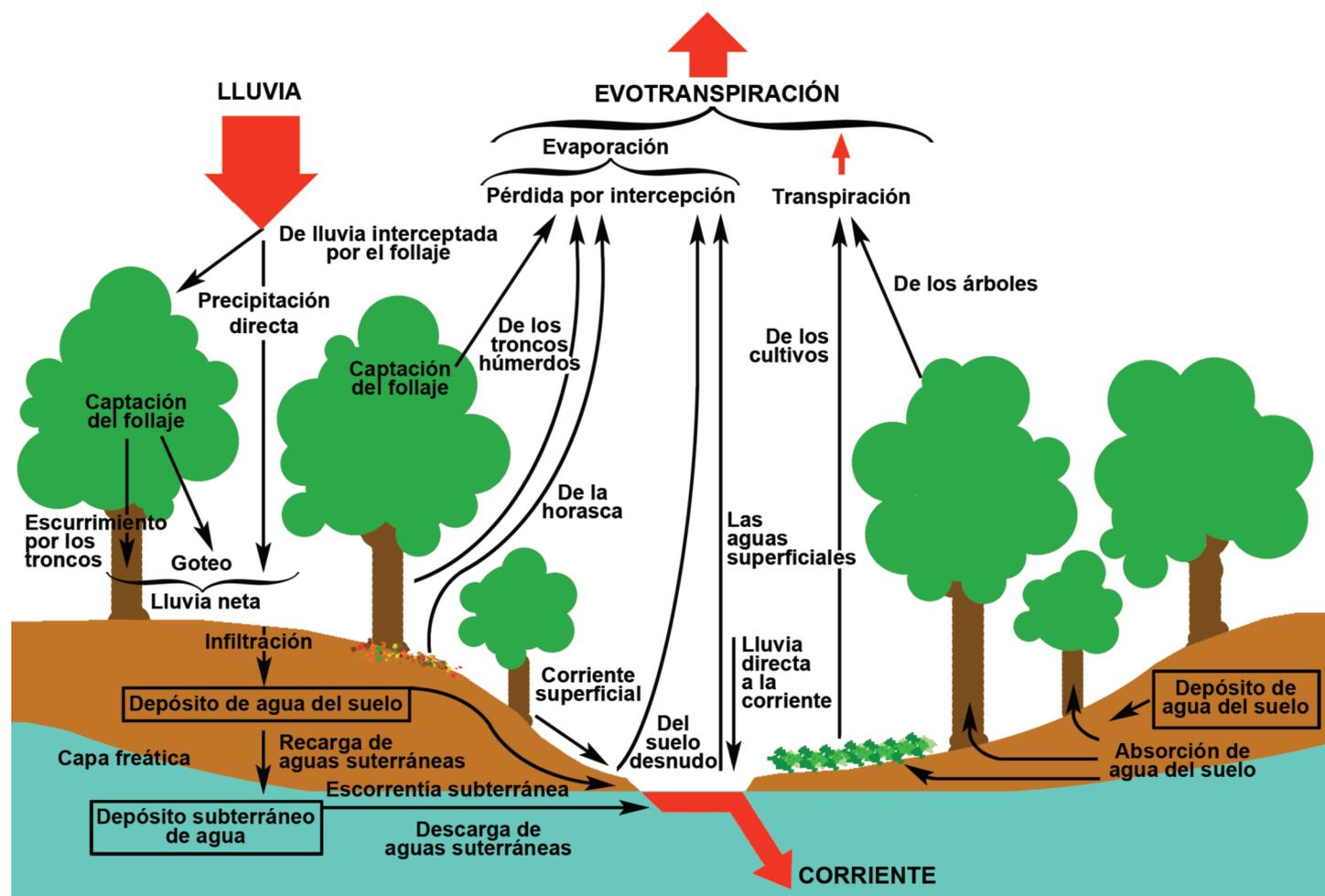


Figura 1. El ciclo hidrológico en un ecosistema forestal (adaptado de FAO 2009).

Figure 1. The hydrological cycle in a forest ecosystem (adapted from FAO 2009).

Los bosques influyen en el suministro de agua

La intercepción de los bosques y la evaporación de agua desde el follaje de los árboles reducen la conversión de la precipitación en aguas subterráneas y caudal superficial. La transpiración de la humedad del suelo a través del follaje incrementa esta reducción (Fig. 1). En este monográfico, Valencia-Leguizamón y Tobón (2017) analizan la influencia de la vegetación en el funcionamiento hidrológico de humedales de la alta montaña tropical de Colombia. Estos autores concluyen entre otras cosas que las características propias de la vegetación, como la arquitectura de las hojas y ramas, pueden llegar a determinar la cantidad de agua interceptada. Aunque estos procesos podrían definirse como pérdidas para la producción de aguas útiles en las cuencas forestales, a través de esta utilización del agua y de la fotosíntesis, los bosques producen madera, hojas, flores, frutos y semillas (Calder 2007). Por ello, aunque no hay duda de que los bosques utilizan agua, también producen muchos bienes y servicios necesarios para las sociedades humanas (FAO 2009).

Por otro lado, los bosques pueden interceptar de manera activa niebla y nubes, creando las llamadas "torres de agua" (Viviroli y Weingartner 2004). Estas torres consisten en zonas forestales a altitudes elevadas que atrapan agua y niebla al condensarse éstas sobre las superficies de las plantas que componen el dosel arbóreo (follaje y ramas de los árboles, musgos, hongos, lianas y otras plantas epifitas) (Bruijnzeel 2004). De hecho, los bosques de niebla pueden generar más agua disponible que llega a la zona de enraizamiento del suelo que otros tipos de bosque con una precipitación similar (Caballero et al. 2013). Por ello, estos bosques pueden llegar a convertirse en importantes fuentes de agua para las zonas aguas abajo, ya que se ha comprobado que pueden tener mayores tasas de infiltración y flujo superficial que las zonas agrícolas adyacentes (Muñoz-Villers et al. 2015). Por ejemplo, se considera que los bosques de niebla mexicanos son uno de los ecosistemas del país con mayor capacidad de provisión de recursos hídricos (González-Espinosa et al. 2012). De forma similar, los bosques nubosos de las Yungas de Bolivia y Argentina son la principal fuente de recursos hídricos para el riego de 400 000 Ha de cultivos y el consumo de agua potable para 2 millones de habitantes (Malizia et al. 2012). Estos ejemplos indican que los bosques de niebla son especialmente importantes, y su conservación debería ser prioritaria no sólo desde el punto de vista de conservación de la biodiversidad, sino también desde el punto de vista de mantenimiento de sus funciones hidrológicas. En este monográfico, el trabajo de Ochoa-Ochoa et al. (2017) muestra una metodología para priorizar y diseñar una estrategia de conservación efectiva de los bosques de niebla mexicanos. Otra consideración importante es que el aporte de precipitación a través del agua capturada por los árboles desde la niebla no solamente es importante en términos de cantidad de agua (pudiendo llegar a suponer hasta un 75% del total del flujo hídrico en algunas cuencas hidrográficas, Bruijnzeel et al. 2011), sino también en función de la temporalidad de las mismas. Por ejemplo, en zonas áridas del interior de China meridional se ha comprobado que hasta el 80% de la precipitación proveniente de la niebla sucede durante la estación seca (Liu et al. 2004).

Por otro lado, también debe destacarse el papel de los bosques en los ciclos hidrológicos de zonas áridas. En muchas partes del mundo, especialmente en climas con estaciones secas, el régimen de flujo del agua es más importante que la cantidad de agua disponible anualmente, tanto para sostener sistemas acuáticos como para mantener actividades agrícolas e industriales (Bruijnzeel 1990). El flujo en los cursos de agua durante la estación seca es vital para la navegación, fauna, comunidades rurales, ganado, pesca, y especialmente para los sistemas de regadío que carecen de la tecnología para bombear agua subterránea (Aylward 2005). En este sentido, el papel hidrológico de los bosques áridos puede ser más importante en relación al mantenimiento de los flujos hídricos durante la estación seca que en relación a la producción anual total de agua disponible aguas abajo (Sandström 1998). Muchas zonas áridas y semiáridas sufren a su vez de sobreexplotación de sus cubiertas vegetales y edáficas, originando problemas

de erosión y desertificación. Por ello, la restauración de la cubierta vegetal y en particular la reforestación son vitales en muchas zonas para recuperar el funcionamiento hidrológico de las cuencas semiáridas y para parar los procesos de degradación y desertificación (Bargues Tobella 2016).

Sin embargo, a pesar de los beneficios proporcionados por árboles y bosques, hay una preocupación creciente de que el establecimiento de árboles en zonas secas puede aumentar la presión y poner en peligro sus escasos recursos hídricos (Jackson et al. 2005). Estas preocupaciones se basan en el paradigma actual que establece que tener más árboles en un área determinada implica una reducción en el flujo superficial y en la recarga de agua subterránea (Brown et al. 2005). Sin embargo, un nuevo paradigma propone la existencia de un óptimo de cobertura arbórea a niveles intermedios en los cuales se maximiza la recarga de agua subterránea, y por lo tanto el flujo en la estación seca (Bargues Tobella 2016, Fig. 2). Apoyando este nuevo paradigma, se ha comprobado que la inclusión de árboles en zonas de pasto puede reducir la escorrenia superficial al aumentar la infiltrabilidad y macroporosidad de los suelos (Benegas et al. 2014).

La gestión forestal puede alterar los flujos hidrológicos

El principal objetivo de la gestión forestal es modificar y aprovechar los procesos ecológicos naturales para obtener los distintos bienes y servicios que la sociedad demanda de los bosques. Obviamente, cuando la gestión forestal modifica la cobertura arbórea ya sea al plantar, cortar o podar todos o parte de los árboles y otra vegetación presentes en el bosque, es esperable que el ciclo hidrológico se modifique (Fig. 1). Sin embargo, en qué dirección se altera no está claro. Tradicionalmente se asume que la eliminación de la cobertura arbórea genera un mayor flujo hídrico en la cuenca al reducirse la evapotranspiración e intercepción mientras que la plantación de nuevos bosques densos de especies de crecimiento rápido reduce el agua disponible que sale del bosque. Existen evidencias que apoyan estas afirmaciones y que han generado los principios descritos por CHIFM (2008) (Tabla 1). Los trabajos de Bosch y Hewlett (1982) y Grip et al. (2005) muestran que en casi todas las cuencas de captación alrededor del mundo, al eliminar la cubierta arbórea se registró un caudal de agua más elevado aguas abajo. Sin embargo, esto no se sostiene en el caso de los bosques higrofiticos de montaña, tales como los bosques nubosos tropicales o los bosques de coníferas boreales que pueden atrapar y almacenar grandes cantidades de agua en forma de nieve sobre sus copas (FAO 2009; Buttle et al. 2000).

Tanto los bosques naturales como las plantaciones utilizan más agua que casi todos los otros tipos de uso del suelo, incluidas la agricultura y los pastos (FAO 2009). Una cuenca hidrológica cubierta con bosques puede presentar una evapotranspiración que supera en un promedio de 170 mm al año a la de una cuenca equivalente pero deforestada (Peel et al. 2010). Por ello, los aumentos en el rendimiento hídrico tras la corta del arbolado en regiones tropicales húmedas oscilan entre los 110 a 825 mm, dependiendo de la precipitación local (Bruijnzeel 1990). En zonas mayoritariamente áridas, como Australia o Sudáfrica, hay un importante debate sobre la competencia por recursos hídricos entre las plantaciones forestales intensivas (normalmente de especies de los géneros *Pinus* o *Eucalyptus*), y otros usos del territorio (agricultura, ganadería, etc.). Esta situación ha llevado a crear programas de certificación forestal que incluyen la gestión del ciclo hidrológico y la regulación y generación de flujos aguas que llegan aguas abajo de las plantaciones (Bren 2015; Benyon 2017; Scott y Gush 2017).

Como se ha descrito antes, el balance entre los distintos componentes del ciclo del agua en una región particular está determinado por la combinación entre la evapotranspiración y el agua que queda libre para escurrirse o infiltrarse, y la suma de estos dos componentes es igual a la precipitación anual (Balvanera 2012). Basados en este paradigma tradicional, la mayoría de trabajos sobre los impactos de la gestión forestal sobre la hidrología determinan que a mayor cobertura aérea eliminada, más flujo de agua

se obtiene aguas abajo. Sin embargo, este paradigma tradicional no tiene en cuenta cambios a largo plazo en la cobertura vegetal, variaciones en la estacionalidad de los flujos de agua, la recarga del agua subterránea (Ellison et al. 2017) o la reducción de la capacidad del suelo de retener agua debido a la erosión o compactación (Bruijnzeel 2004). Por ello, en muchas ocasiones tales ganancias en el flujo de agua son sólo temporales. Además, muchos de los estudios que han dado pie a dicho paradigma se basan en estudios a corto plazo en plantaciones comerciales monoespecíficas de crecimiento rápido en sitios productivos, uno de los tipos de bosque que más agua consumen.

La dimensión temporal y el dinamismo natural que las relaciones bosques-suelo-agua por medio del desarrollo del bosque o la sucesión ecológica o suelen estar ausentes de estos debates, aunque pueden llegar a ser importantes. Por ejemplo, en la cabecera de muchas cuencas hidrográficas de la península ibérica se han registrado importantes descensos en el caudal durante los últimos 50 años, con reducciones de entre el 0.2 y 0.7% en el caudal anual registrado (Gallart et al. 2011). Estas reducciones se deben a la densificación y expansión natural de muchos bosques ibéricos como consecuencia de la reducción en la presión del uso de pastos y bosques de montaña (Gallart 2015). Por último, pocos trabajos han prestado atención a bosques semiáridos o bosques en zonas degradadas (Bruijnzeel 2004; Malmer et al. 2010). Nuevas evidencias muestran que en zonas degradadas una cobertura arbórea intermedia puede maximizar la recarga de agua subterránea, permitiendo una mayor infiltración a la vez que la evapotranspiración e intercepción son moderadas (Ilstedt et al. 2016) (Fig. 2).

Sin embargo, la generalización de dichas asunciones es problemática, ya que los flujos de agua dependen en gran medida del tipo y profundidad de suelo y de las características locales de la topografía y la precipitación (Bruijnzeel 2004). Los suelos profundos (normalmente en pendientes moderadas) pueden almacenar mucha más agua antes de saturarse, y los árboles de raíces profundas hacen que las capas del suelo sean más receptivas al agua al facilitar la infiltración (FAO 2009). Tanto la lluvia como el tipo de suelo y su posible degradación influyen en la generación de escorrentía superficial, y a su vez en la erosión, la generación de sedimentos y posibles corrimientos de tierras (Tabla 1). En este monográfico, Nadal-Sala et al. (2017) exploran la importancia de la profundidad del suelo a la hora de permitir a los pinares de *Pinus halepensis* Mill. sobrellevar el aumento de aridez esperado en condiciones de cambio climático, y concluyen que existirá una fuerte interacción entre profundidad de suelo y severidad de cambio climático que puede hacer que los mismos bosques puedan aumentar o reducir su crecimiento.

Por otro lado, la selección y sustitución de especies puede influir en el rendimiento y disponibilidad hídrica aguas abajo de los bosques. Las pérdidas por evaporación y transpiración son mayores en los bosques perennes que en los caducifolios, aunque la capacidad de cada especie de árbol de resistir distintos niveles de déficit hídrico depende tanto de sus características propias como de la densidad del rodal y las condiciones edafo-climáticas. Por ello, los bosques mixtos de coníferas y frondosas (un tipo de bosque común en muchas regiones templadas) pueden tener dinámicas hidrológicas que no son fáciles de predecir al existir complejas interaccio-

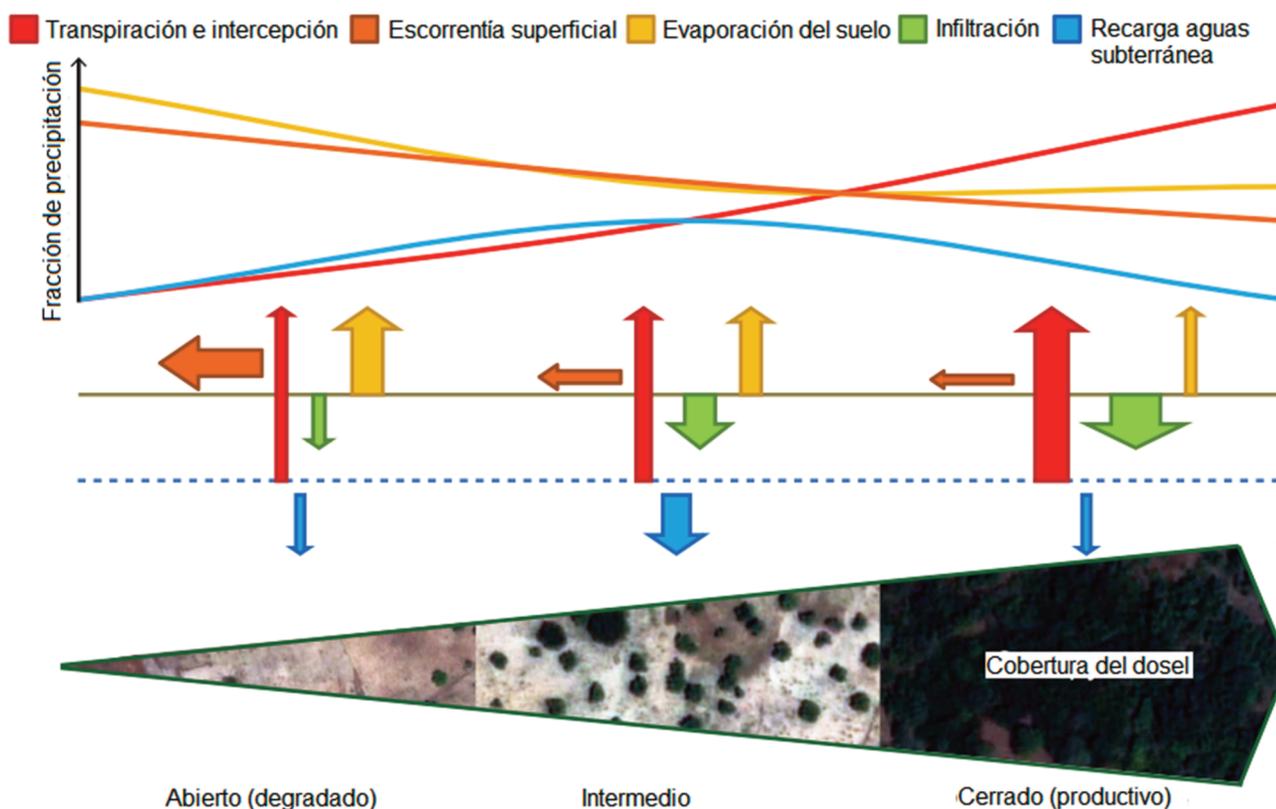


Figura 2. Balance de agua conceptual de la “teoría de la cobertura arbórea óptima”. Una recarga óptima del agua subterránea sucede con coberturas arbóreas intermedias en áreas tropicales con estación seca. Sin árboles, la escorrentía superficial y la evaporación desde el suelo son elevadas, produciendo una baja recarga del agua subterránea a pesar de la baja transpiración. En bosques cerrados productivos, a pesar de la poca escorrentía superficial y evaporación desde el suelo, la transpiración total y la intercepción de la precipitación son elevadas, causando de nuevo una baja recarga del agua subterránea. Con coberturas arbóreas intermedias, una baja escorrentía superficial y evaporación desde el suelo así como una transpiración intermedia optimizan la recarga de agua subterránea. El tamaño de las flechas es proporcional a la magnitud de cada uno de los flujos de agua (Adaptado de Ilstedt et al. 2016).

Figure 2. Conceptual water budget of the “optimum tree cover theory”. Optimum groundwater recharge occurs at intermediate tree cover in seasonally dry tropical areas. Without trees, surface runoff and soil evaporation are high, leading to low groundwater recharge despite low transpiration. In closed productive forests, despite low surface runoff and evaporation as well as intermediate transpiration optimize groundwater recharge. Arrow size is proportional to the magnitude of each water flow (Adapted from Ilstedt et al. 2016).

Tabla 1. Principios de la respuestas de los ciclos hidrológicos a cambios en los ecosistemas forestales (modificado de CHIFM 2008).**Table 1.** Principles of water cycle responses to changes in forest ecosystems (modified from CHIFM 2008).

Principios de la respuesta hidrológica a cambios en la estructura del bosque	
1	La eliminación total o parcial del dosel arbóreo reduce la intercepción (precipitación capturada por hojas y ramas).
2	La eliminación total o parcial del dosel arbóreo aumenta la precipitación neta que llega a la superficie del suelo.
3	La eliminación total o parcial del dosel arbóreo reduce la transpiración (agua liberada a la atmósfera por las plantas).
4	La pérdida de raíces vivas y el aumento de la humedad en el suelo reducen la estabilidad de las laderas.
5	La reducción de la transpiración y el aumento de la precipitación neta aumentan la producción neta de agua, pero el aumento es transitorio y decrece con el tiempo al volver a crecer el bosque.
6	Cuando bosques con alta intercepción (o alta transpiración anual) sustituyen a bosques con baja intercepción (o baja transpiración), este cambio reduce la producción de agua de al alcanzar el nuevo bosque la madurez.
Principios de los cambios en el flujo de agua en el suelo y subsuelo	
7	Las superficies poco permeables (carreteras y pistas forestales) y los contornos alterados de las pendientes (desmontes y terraplenes) modifican los cursos de agua, aumentan el flujo superficial y llevan el flujo superficial directamente a las corrientes de agua (arroyos y ríos).
8	El flujo superficial arrastra sedimentos, materia particulada y disuelve los compuestos que hay sobre la superficie del suelo.
9	Las superficies poco permeables aumentan la erosión superficial.
10	Los contornos de laderas alterados y los flujos superficiales de agua modificados a lo largo de las carreteras y pistas forestales aumentan los corrientes de tierras.
Principios de la respuesta hidrológica a la aplicación de productos químicos	
11	Los productos químicos (fertilizantes, plaguicidas, retardantes de fuego, herbicidas, etc.) pueden afectar de forma adversa a los ecosistemas acuáticos especialmente si se aplican directamente sobre superficies acuáticas o suelos húmedos.
12	Los productos químicos afectan a la calidad de agua de forma diferente en función del tipo de químico, su toxicidad, su tasa de desplazamiento y su persistencia en suelo y agua.
13	La aplicación crónica de productos químicos a través de la deposición atmosférica de nitrógeno o azufre acidifica los suelos forestales, reduce los nutrientes del suelo, afecta a la salud de los árboles, y degrada la calidad del agua con efectos tóxicos potenciales en los organismos acuáticos.

nes entre la fisiología de las distintas especies, y factores espaciales y temporales (del Castillo et al. 2016). De hecho, los bosques mixtos de coníferas y frondosas son uno de los tipos de bosques que presentarán la mayor capacidad para mantener sus funciones hidrológicas en su respuesta al cambio climático, y los que mantendrán una producción de agua más estable (Creed et al. 2014). En este monográfico, Candel-Pérez et al. (2017) exploran el efecto que la densidad de regenerado y el cambio climático pueden tener sobre un bosque mixto compuesto por dos de las especies forestales más importantes de Europa: el pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) y el haya (*Fagus sylvatica* L.). Estos autores destacan que seleccionando la densidad inicial de regenerado en un bosque mixto entre una conífera y una frondosa es posible conseguir un menor déficit hídrico en el rodal. Sin embargo, estas relaciones pueden ser temporales y depender de la eficiencia en el uso del agua de cada especie. Esta eficiencia también cambia con el desarrollo del rodal y a su vez está influenciada con el contenido de dióxido de carbono atmosférico, haciendo que su predicción bajo condiciones de cambio climático sea compleja (González de Andres et al. 2017a, 2017b).

Los bosques afectan a otros aspectos del ciclo hidrológico

La calidad del agua, la protección frente a avenidas, inundaciones, corrimientos de tierra, aludes, colmatación de embalses de agua, protección de orillas de cursos de agua, etc. son servicios ambientales adicionales que proporcionan los bosques y que están relacionados con el ciclo hidrológico (Balvanera 2012) (Tabla 2). Muchos de estos servicios ambientales pueden considerarse parte del total de servicios, valores y productos no maderables que proporcionan los bosques, y pueden integrarse en

servicios de pagos por servicios ecosistémicos o esquemas de coinversión que aseguren el suministro de agua de calidad a otros usuarios fuera del bosque (Namirembe et al. 2014). Ejemplos de programas de pago por servicios ambientales relacionados con los bosques y el agua existen en Norteamérica (Kemkes et al. 2010; Susaeta et al. 2016), Centro- y Sudamérica (Grima et al. 2016), África (FAO 2016), Europa (Popa et al. 2016), Asia (Pham et al. 2015; Leimona et al. 2015) y Oceanía (Benyon 2017). En particular, el pago por servicios ambientales relacionados con los recursos hídricos es una forma prometedora de conservar los bosques y generar riqueza en las comunidades rurales en países en vías de desarrollo (Porrás et al. 2008).

En primer lugar, los niveles de erosión y sedimentos están en relación directa con el tipo y grado de cobertura vegetal que tiene el suelo, la topografía, así como de las alteraciones que la gestión agrícola o forestal hayan podido realizar sobre ese suelo, por medio de actividades como la construcción de carreteras y caminos, la circulación de maquinaria pesada o la aplicación de sustancias químicas (Tabla 1). Por ejemplo, en la costa de Jalisco de México se han descrito aportes de sedimentos 1000 veces mayores desde un campo de maíz que desde un bosque tropical seco en las mismas condiciones edafológicas y geo-topográficas (Maass et al. 2005). Esos sedimentos arrastrados llegan a los ríos, reduciendo la calidad de su agua al enturbiarlos y aumentar la materia orgánica disuelta, principal factor que regula la demanda biológica de oxígeno de esas aguas. Además, los sedimentos también pueden ser arrastrados hasta la desembocadura de los ríos y llegar hasta las costas, reduciendo también la calidad del agua de los estuarios y del mar (Conte et al. 2011), afectando de forma directa a otros bosques importantes en zonas marítimas como los manglares.

Tabla 2. Ejemplos de servicios ambientales relacionados con cuencas hidrográficas arboladas (adaptado de *Porras et al 2008*).**Tabla 2.** Examples of environmental services related to forested watersheds (Adapted from *Porras et al 2008*).

Servicio ambiental	Actividad de gestión a realizar
Mejora de la calidad del agua.	Rehabilitación de áreas degradadas por medio de la plantación de árboles.
Mejora de la calidad y cantidad del agua.	Conservación y ordenación de los suelos. Conservación de los bosques existentes y reforestación.
Mejora de la cantidad de agua.	Protección de los bosques existentes.
Reducción de sedimentos en lagos y embalses.	Técnicas de conservación de suelos, reducción de maquinaria pesada, restricciones de uso, comercio de derechos de agua.
Reducción de sedimentos y mejora de la regulación de los flujos de agua.	Conservación de los bosques existentes, prevención de la conversión de bosques en otros tipos de usos del suelo.
Regulación de la calidad y flujos de agua, reducción de la vulnerabilidad a corrimientos de tierra.	Protección y restauración de los bosques existentes. Combinación de árboles y agricultura (agroforestería, prácticas silvopastorales, cercas vivas, cortavientos, cultivo de café bajo dosel arbóreo).
Mejora de la magnitud y regulación de los flujos de agua.	Conservación de los bosques naturales, mejora de técnicas agrícolas y forestales para reducir su impacto en suelos.
Protección, conservación y gestión de fuentes de agua estratégicas.	Técnicas de conservación de agua y suelo en pequeñas cuencas, eliminación de roza y quema, gestión de los residuos de los cultivos, regeneración natural del bosque a través de cortas selectivas o silvicultura cercana a la naturaleza, gestión de cafetales.

En segundo lugar, los bosques también pueden afectar a la frecuencia e intensidad de los deslizamientos de tierra. La escorrentía superficial que se produce como resultado de una gran cantidad de lluvia en ausencia de una cobertura arbórea continua puede lavar el suelo, arrastrando suelo, roca y algunos árboles ([Tabla 1](#)). Por ejemplo, un estudio en el estado mexicano de Chiapas mostró que a mayor complejidad de la vegetación, menor frecuencia y volumen de corrimientos ([Philpott et al. 2008](#)).

En tercer lugar, los bosques también juegan un papel importante en la regulación de las inundaciones, aunque la capacidad de prevención y reducción de los impactos de las mismas depende de la intensidad y frecuencia con la que ocurren estas perturbaciones ([FAO 2009](#)). Por un lado, combinando los efectos sobre la evapotranspiración y sobre la infiltración discutidos arriba, el resultado es que la deforestación conduce a un aumento en la probabilidad de inundaciones debido al incremento en los caudales máximos o en los picos de escorrentía ([Conte et al. 2011](#)). Por ejemplo, en el caso del río Tocantins, en Brasil, la transformación de 3.5 millones de hectáreas de cerrado a pastos entre 1949 y 1998 llevó a un aumento del 24% en el caudal del río ([Filoso et al. 2006](#)). En la India, se ha comprobado que durante el periodo 1998-2011 los daños por inundaciones estuvieron en relación inversa con la cobertura forestal ([Bhattacharjee y Behera 2017](#)). Por otro lado, en el caso de inundaciones catastróficas de carácter extremo, los bosques tienen poca capacidad de amortiguación ([Ellison et al. 2017](#)).

Necesidades de investigación: una perspectiva de paisaje

La creación por parte de la IUFRO de la *Task Force on Forests, Soil and Water Interactions*, y la actividad del *Global Forest Expert Panel* que pretende generar un informe para el año 2018 sobre el mismo tema, así como otros eventos organizados desde las Naciones Unidas y otras instituciones internacionales, suceden porque tanto la comunidad científica como otros colectivos implicados reconocen la necesidad de aunar esfuerzos para generar más conocimientos con sólidas bases científicas que puedan apoyar una gestión integrada de los bosques, los suelos y el agua. Entre las principales lagunas en el conocimiento científico actual, [CHIFM \(2008\)](#) cita la necesidad de obtener una visión integradora a nivel de paisaje de todos los factores y sus efectos simultáneos sobre el ciclo hidrológico en su relación con los bos-

ques. En particular, el problema más importante que queda por resolver en la hidrología forestal es cómo escalar los conocimientos obtenidos de experimentos y observaciones en cuencas pequeñas y homogéneas hasta grandes paisajes y cuencas hidrográficas heterogéneas. Por ello, el mapeo de las zonas con distinta disponibilidad hídrica, con mayores riesgos de sequías o en las cuales los árboles no tienen acceso a reservas subterráneas de agua es un primer paso necesario ([Orellana et al. 2012](#)). Además, no solamente una mayor visión espacial es necesaria, sino también un mejor entendimiento de la dimensión temporal, dadas las largas escalas temporales en las que se reflejan los principales cambios en los ecosistemas forestales ([Kimmins et al. 2010](#)). Para ello, es fundamental estudiar y comprender las conexiones entre cuencas y el movimiento del agua tanto en la atmósfera como en la superficie y el subsuelo.

Otra área que necesita atención para mejorar nuestro conocimiento se relaciona con los efectos acumulativos que pueden existir en las cuencas hidrográficas. Estos efectos se originan al combinarse distintas actividades de uso del territorio y su alternancia o simultaneidad a lo largo del tiempo, así como los legados de cada una a lo largo del tiempo. Por ejemplo, eventos extremos de precipitación tienen efectos acumulativos sobre un paisaje heterogéneo que pueden llevar tanto a episodios de erosión y pérdida de suelo como a inundaciones. Para examinar tales efectos acumulativos es necesario entender los procesos físicos, químicos y biológicos que determinan el flujo de agua, sedimentos, nutrientes, contaminantes y otros materiales desde las cuencas de cabecera hasta las zonas de descarga y deposición. Las complejas relaciones entre bosques y agua en las grandes cuencas fluviales continúan alimentando los debates tanto a nivel científico como de gestión, por lo que no hay duda de que se precisan ulteriores esfuerzos para entender plenamente dichas relaciones ([Calder et al. 2007](#)). Tales investigaciones en esta área deben estudiar las relaciones entre bosques, suelo, agua y uso del territorio sobre amplias escalas espaciales y temporales ([CHIFM 2008](#)). Para ello, herramientas como los meta-análisis, la teledetección y la modelización hidro-ecológica serán imprescindibles ([Beck et al. 2016](#); [David et al. 2016](#)).

Por último, dos temas que centran mucha de la investigación forestal actual seguirán siendo centrales para mejorar el entendimiento de las relaciones entre bosques, suelo y agua: el cambio

climático y la gestión forestal. El cambio climático traerá variabilidad y posiblemente nuevos estados ecológicos al cambiar el régimen energético del intercambio entre bosques y atmósfera al cambiar las pautas actuales de precipitación y temperatura (Elliott et al. 2017). Este incremento en la variabilidad será especialmente importante en zonas áridas y semiáridas, en las cuales las interacciones entre clima, vegetación y uso del suelo son complejas (Chen et al. 2014). Además, no solamente la producción total de flujos de agua puede verse alterada, sino también la estacionalidad de las mismas, afectando a los periodos de crecimiento vegetativo y al régimen anual de flujos, tanto los en sus picos máximos como el flujo base (Creed et al. 2015). Como consecuencia de estas alteraciones, el cambio climático alterará la función reguladora de los flujos de agua ejercida por los bosques y condicionará la disponibilidad de los recursos hídricos en amplias zonas del planeta (Bergkamp et al. 2003). Cómo pueden afectar estos cambios a la capacidad de las distintas especies forestales dependerá de diversos factores, como el tipo de suelo (Nadal-Sala et al. 2017), o la composición del bosque (Candel-Pérez et al. 2017).

Por su parte, la gestión forestal está evolucionando rápidamente debido a los cambios socioeconómicos que modifican las prácticas tradicionales utilizadas en la gestión forestal (abandono de tareas con grandes cargas de mano de obra, mecanización de actividades e inclusión de nuevas tecnologías, introducción de nuevas especies, variedades y combinaciones de las mismas, etc.), creando nuevos planes de manejo para los que existe poca información disponible sobre sus impactos en la hidrología forestal. Por ejemplo, se ha comprobado que en bosques semiáridos como los mediterráneos de *Quercus ilex* L., el control de la densidad por medio de claras tiene su principal efecto en la reducción de la interceptación y trascolación en el dosel arbóreo, pero más trabajo es necesario para determinar hasta qué punto los flujos de nutrientes asociados pueden también verse alterados (Bautista et al. 2015). En zonas donde los recursos hídricos son limitados, la gestión forestal debería centrarse en prácticas forestales que no dañen los sistemas radiculares de los bosques ni alteren la capacidad del suelo de retener agua (David et al. 2016). Por ejemplo, prácticas como el labrado del suelo o el uso de maquinaria pesada deberían ser evitados, al dañar las raíces de especies que han evolucionado específicamente para generar potentes sistemas radiculares para la captación del escaso agua del suelo (David et al. 2013). Por otro lado, la regulación del área foliar a través de la cual se produce la transpiración (por medio de claras o podas) puede reducir los riesgos de sequía (Linares et al. 2010; Martínez-Vilalta et al. 2012). Sin embargo, la efectividad del control de la densidad del rodal depende de la etapa de desarrollo del mismo (Candel-Pérez et al. 2017). Además, una reducción de la densidad de árboles también puede afectar adversamente a la descomposición de la materia orgánica (Blanco et al. 2011) y favorecer el desarrollo del sotobosque, aumentando por tanto la competencia con los árboles por nutrientes además de por agua (Bi et al. 2007).

Todos estos retos presentan nuevas oportunidades que espero animen a los lectores de este monográfico a explorar nuevas líneas de investigación. La importancia ecológica, económica y social de las interacciones entre bosques, suelos y agua bien lo merece.

Agradecimientos

El autor quiere agradecer la labor inicial de coordinación de este monográfico de Dr. Agustín Merino y Dr. Felipe García Oliva. Se agradece también la colaboración y ánimos por parte de los miembros de la *IUFRO Task Force on Forest, Soil and Water Interactions*, en particular a su director Dr. Richard Harper, así como al apoyo proporcionado desde IUFRO, en particular a Dr. John Parrotta, vicepresidente de IUFRO para *Task Forces*. Esta revisión se ha beneficiado de las discusiones con los miembros del *Global Forest Expert Panel* sobre bosques y agua en reuniones organizadas por IUFRO, en Roma (febrero de 2017) y Cambridge (junio de 2017).

Referencias

- Aylward, B. 2005. Land use, hydrological function and economic valuation. En: Bonell, M., Bruijnzeel, L.A. (eds.) *Forests, Water and People in the Humid Tropics: Past, Present and Future Hydrological Research for Integrated Land and Water Management*, pp. 99-120. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.
- Balvanera, P. 2012. Los servicios ecosistémicos que ofrecen los bosques tropicales. *Ecosistemas* 21 (1-2), 136-147.
- Bargués Tobella, A. 2016. *The importance of tree cover for water resources in semiarid West Africa*. Tesis Doctoral. Swedish University of Agricultural Sciences. Umeå, Suecia.
- Bautista, I., Pabón, C., Lull, C., González-Sanchis, M., Lidón, A., del Campo, A. 2015. Efectos de la gestión forestal en los flujos de nutrientes asociados al ciclo hidrológico en un bosque mediterráneo de *Quercus ilex* L. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales* 41, 343-354.
- Beck, H.E., van Dijk, A.I.J.M., de Roo, A., Miralles, D.G., McVicar, T.R., Schellekens, J., Bruijnzeel, L.A. 2016. Global-scale regionalization of hydrologic model parameters. *Water Resources Research* 52, 3599-3622.
- Benegas, L., Ilstedt, U., Rouspard, O., Jones, J., Malmer, A. 2014. Effects of trees on infiltrability and preferential flow in two contrasting agroecosystems in Central America. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 183, 185-196.
- Benyon, R.G. 2017. Forest management and water in Australia. En: García-Chevesich, P.A., Neary, D.G., Scott, D.F., Benyon, R.G., Reyna, T. (eds.) *Forest management and the impact on water resources: a review of 13 countries*, pp. 21-32. UNESCO, París, Francia.
- Bergkamp G., Orlando B., Burton L. 2003. *Change. Adaptation of water management to climate change*, IUCN, Gland and Cambridge. Reino Unido. 53 p.
- Bi, J., Blanco, J.A., Kimmins, J.P., Ding, Y., Seely, B., Welham, C. 2007. Yield decline in Chinese Fir plantations: A simulation investigation with implications for model complexity. *Canadian Journal of Forest Research* 37, 1615-1630.
- Bhattacharjee, K., Behera, B. 2017. Forest cover change and flood hazards in India. *Land Use Policy* 67, 436-448.
- Blanco, J.A., Imbert, J.B., Castillo, F.J. 2011. Thinning affects *Pinus sylvestris* needle decomposition rates and chemistry differently depending on site conditions. *Biogeochemistry* 106, 397-414.
- Bosch, J.M., Hewlett, J.D. 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology* 55, 3-23.
- Bren, L. 2015. *Forest hydrology and catchment management: an Australian perspective*. Springer, Dordrecht, Países Bajos. 376 p.
- Brown, A.E., Zhang, L., McMahon, T.A., Western, A.W., Vertessy, R.A. 2005. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology* 310(1-4), 28-61.
- Bruijnzeel, L.A. 1990. *Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion: a state of knowledge review*. UNESCO, Programa Hidrológico Internacional. París, Francia.
- Bruijnzeel, L.A. 2004. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? *Agriculture, Ecosystems and Environment* 104, 185-228.
- Bruijnzeel, L.A., Mulligan, M., Scatena, F.N. 2011. Hydrometeorology of tropical montane cloud forests: emerging patterns. *Hydrological Processes* 25, 465-498.
- Buttle, J.M., Creed, I.F., Pomeroy, J.W. 2000. Advances in Canadian forest hydrology, 1995-1998. *Hydrological Processes* 14, 1551-1578.
- Caballero, L.A., Easton, Z.M., Richards, B.K., Steenhuis, T.S. 2013. Evaluating the bio-hydrological impact of a cloud forest in Central America using a semi-distributed water balance model. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 61, 9-20.
- Calder, I.R. 2007. Forests and water- ensuring that forest benefits outweigh water costs. *Forest Ecology and Management* 251, 110-120.
- Calder, I., Hofer, T., Vermont S., Warren, P. 2007. Hacia una nueva comprensión de los bosques y el agua. *Unasylva* 58, 3-10.
- Candel-Pérez, D., Blanco, J.A., González de Andrés, E., Lo, Y.H., Imbert J.B., Castillo, F.J. 2017. Simulando la interacción entre la densidad inicial y los flujos de agua y nutrientes para comprender el desarrollo de rodales mixtos de *Pinus sylvestris* y *Fagus sylvatica* bajo cambio climático. *Ecosistemas* 26(2): 38-51.

- Chen, C., Eamus, D., Cleverly, J., Boulain, N., Cook, P., Zhang, L., Cheng, L., Yu, Q. 2014. Modelling vegetation water-use and groundwater recharge as affected by climate variability in an arid-zone *Acacia* savanna woodland. *Journal of Hydrology* 519, 1084-1096.
- Committee on Hydrologic Impacts of Forest Management (CHIFM) 2008. *Hydrologic effects of a changing forest landscape*. National Research Council. Washington, Estados Unidos. 180 p.
- Conte, M., Emmanay, D., Mendoza, G., Walter, M. T., Wolny, S., Freyberg, D., Nelson, E., Solorzano, L. 2011. Retention of nutrients and sediments by vegetation. En: Kareiva, P., Tallis, H., Ricketts, T.H., Daily, G.C., Polasky, S. (eds.). *Natural Capital. Theory and Practice of Mapping Ecosystem Services*. pp. 89-110, Oxford University Press Inc., Nueva York, Estados Unidos.
- Creed, I.F., Hwang, T., Lutz, B., Way, D. 2015. Climate warming causes intensification of the hydrological cycle, resulting in changes to the vernal and autumnal windows in a norther temperate forest. *Hydrological Processes* 29, 3519-3534.
- Creed, I.F., Spargo, A.T., Jones, J.A., Buttle, J.M., Adams, M.B., Beall, F.D., Booth, E.G., Campbell, J.L. et al. 2014. Changing forest water yields in response to climate warming: results from long-term experimental watershed sites across North America. *Global Change Biology* 20, 3191-3208.
- David, T.S., Pinto, C.A., Nadezhkina, N., David, J.S. 2016. Water and forests in the Mediterranean hot climate zone: a review based on a hydraulic interpretation of tree functioning. *Forest Systems* 25(2), eR02.
- David, T.S., Pinto, C.A., Nadezhkina, N., Kurz-Besson, C., Henriques, M.O., Quilhó, T., Cermak, J., Chaves, M.M., Pereira, J.S., David, J.S. 2013. Root functioning, tree water use and hydraulic redistribution in *Quercus suber* trees: A modeling approach based on root sap flow. *Forest Ecology and Management* 307, 136-146.
- Del Castillo, J., Comas, C., Voltas, J., Ferrio, J.P. 2016. Dynamics of competition over water in a mixed oak-pine Mediterranean forest: spatio-temporal and physiological components. *Forest Ecology and Management* 2016, 214-224.
- Ellison, D., Morris, C.E., Locatelli, B., Sheil, D., Cohen, J., Murdiyarsa, D., Gutierrez, V., et al. 2017. Trees, forests and water: cool insights for a hot world. *Global Environmental Change* 43, 51-61.
- FAO 2009. *Los bosques y el agua*. Estudio FAO Montes 155. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Roma, Italia.
- FAO 2013. *Forests and Water: International Momentum and Action*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Roma, Italia.
- FAO 2016. *Payments for forest environmental services in sub-Saharan Africa: A practical guide*, by Nantongo, P. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Accra, Ghana.
- Filoso, S., Martinelli, L.A., Howarth, R.W., Boyer, E.W., Dentener, F. 2006. Human activities changing the nitrogen cycle in Brazil. *Biogeochemistry* 79,61-89.
- Gallart, F. 2015. Vulnerabilidades de los recursos hídricos en relación al cambio climático y a sus interacciones con los ecosistemas terrestres. En: Herrero, A., Zavala, M.A. (eds.) *Los bosques y la biodiversidad frente al cambio climático: impactos, vulnerabilidad y adaptación en España*, pp. 345-352. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid. España.
- Gallart, F., Delgado, J., Beatson, S.J.V., 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-Chevesich, P.A., Neary, D.G., Scott, D.F., Benyon, R.G., Reyna, T. (Eds). 2017. *Forest management and the impact on water resources: a review of 13 countries*. UNESCO, París, Francia. 197 p.
- González de Andrés, E., Seely, B., Blanco, J.A., Imbert, J.B., Lo, Y.H., Castillo, F.J. 2017a. Increased complementarity in water-limited environments in Scots pine and European beech mixtures under climate change. *Ecohydrology* 10(2), e1810.
- González de Andrés, E., Camarero, J.J., Blanco, J.A., Imbert, J.B., Lo, Y.H., Sangüesa-Barrada, G., Castillo, F.J. 2017b. Tree-to-tree competition in mixed European beech-Scots pine forests has different impacts on growth and water-use efficiency depending on site condition. *Journal of Ecology*, DOI: 10.1111/1365-2745.12813.
- González-Espinosa, M., Meave, J.A., Ramírez-Marcial, N., Toledo-Aceves, T., Lorea-Hernández, F.G., Ibarra-Manríquez, G. 2012. Los bosques de niebla de México: conservación y restauración de su componente arbóreo. *Ecosistemas* 21 (1-2), 36-52.
- Grima, N., Singh, S.M., smetschka, B., Ringhofer, L. 2016. Payment for ecosystem services (PES) in Latin America: analysing the performance of 40 case studies. *Ecosystem Services* 17, 24-32.
- Grip, H., Fritsch, J.M., Bruijnzeel, L.A. 2005. Soil and water impacts during forest conversion and stabilisation to new land use. En: Bonell, M., Bruijnzeel, L.A. (eds.) *Forest, water and people in the humid tropics*, pp. 561-589. UNESCO International Hydrology Series. Cambridge University Press. Cambridge, Reino Unido.
- Ilstedt, U., Bargaues Tobella, A., Bazié, H.R., Bayala, J., Verbeeten, E., Nyberg, G., Sanou, J., et al. 2016. Intermediate tree cover can maximize groundwater recharge in the seasonally dry tropics. *Scientific Reports* 6, 21930.
- IUFRO 2017. International Union of Forestry Research Organizations. Disponible en www.iufro.org. [Accedido el 14 de Julio de 2017].
- Jackson, R.B., Jobbagy, E.G., Avissar, R., Roy, S.B., Barrett, D.J., Cook, C.W., Farley, K.A., le Maitre, D.C., McCarl, B.A., Murray, B.C. 2005. Trading Water for Carbon with Biological Carbon Sequestration. *Science* 310(5756), 1944-1947.
- Jasechko, S., Sharp, Z.D., Gibson, J.J., Birks, S.J., Yi, Y., Fawcett, P.J. 2013. Terrestrial water fluxes dominated by transpiration. *Nature* 496, 347-350.
- Kelley, C.P., Mohtadi, S., Cane, M.A., Seager, R., Kushnir, Y. 2015. Climate change in the Fertile Crescent and implications of the recent Syrian drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112, 3241-3246.
- Kemkes, R.J., Farley, J., Koliba, C.J. 2010. Determining when payments are an effective policy approach to ecosystem services provision. *Ecological Economics* 69, 2069-2074.
- Kimmins, J.P., Blanco, J.A., Seely, B., Welham, C., Scoullar, K. 2010. *Forecasting forest futures: a hybrid modelling approach to the assessment of sustainability of forest ecosystems and their values*. Earthscan, Londres, Reino Unido.
- Leimona, B., van Noordwijk, M., de Groot, R., Leemans, R. 2015. Fairly efficient, efficiently fair: lessons from designing and testing payments schemes for ecosystem services in Asia. *Ecosystem Services* 12, 16-28.
- Linares, J.C., Camarero, J.J., Carreira, J.A. 2010. Competition modulates the adaptation capacity of forests to climatic stress: insights from recent growth decline and death in relict stands of the Mediterranean fir *Abies pinsapo*. *Journal of Ecology* 98, 592-603.
- Liu, W., Meng, F.R., Zhang, Y., Liu, Y., Li H. 2004. Water input from fog drip in the tropical seasonal rain forest of xishuangbanna, south-West China. *Journal of Tropical Ecology* 20, 517-524.
- Maass, J. M., Balvanera, P., Castillo, A., Daily, G. C., Mooney, H. A., Ehrlich, P., Quesada, M., Miranda, A., Jaramillo, V. J., et al. 2005. Ecosystem services of tropical dry forests: insights from long-term ecological and social research on the Pacific Coast of Mexico. *Ecology and Society* 10(1):17.
- Makarieva, A.M., Gorshkov, V.G., Sheil, D., Nobre, A.D., Li, B.L. 2013. Where do winds come from? A new theory on how water vapor condensation influences atmospheric pressure and dynamics. *Atmospheric Chemistry and Physics* 13, 1039-1056.
- Malizia, L., Pacheco, S., Blundo, C., Brown, A.D. 2012. Caracterización altitudinal, uso y conservación de las Yungas Subtropicales de Argentina. *Ecosistemas* 21 (1-2), 53-73.
- Malmer, A., Murdiyarsa, D., Bruijnzeel, L.A. (sompurno), Ilstedt, U. 2010. Carbon sequestration in tropical forests and water: a critical look at the basis for commonly used generalizations. *Global Change Biology* 16, 599-604.
- Martínez-Vilalta, J., Aguadé, D., Banqué, M., Barba, J., Curiel Yuste, J., Galiano, L., García, N., et al. 2012. Las poblaciones ibéricas de pino albar ante el cambio climático: con la muerte en los talones. *Ecosistemas* 21(3), 15-21.
- Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y. 2016. Four billion people facing severe water scarcity. *Science Advances* 2, e1500323.
- Morris, C.E., Conen, F., Huffma, J.A., Phillips, V., Pöschl, U., Sands, D.C. 2014. Bioprecipitation: a feedback cycle linking Earth history, ecosystem dynamics and land use through biological ice nucleators in the atmosphere. *Global Change Biology* 20, 341-351.

- Muñoz-Villers, L., Holwerda, F., Alvarado-Barrientos, M., Geissert, D., Marín-Castro, B., Gomez-Tagle, A. 2015. Efectos hidrológicos de la conversión del bosque de niebla en el centro de Veracruz, México. *Bosque* 36, 395-407.
- Nadal-Sala, D., Sabaté, S., Gracia, C. 2017. Importancia relativa de la profundidad del suelo en la resiliencia de los bosques de pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.) frente al incremento de aridez debido al cambio climático. *Ecosistemas* 26(2): 18-26.
- Namirembe, S., Leimona, B., van Noordwijk, M., Bernard, F., Bacwayo, K.E. 2014. Co-investment paradigms as alternatives to payments for tree-based ecosystem services in Africa. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 6, 89-97.
- Ochoa-Ochoa, L.M., Mejía-Domínguez, N.R., Bezaury-Creel, J. 2017. Priorización para la conservación de los bosques de niebla en México. *Ecosistemas* 26(2): 27-37.
- Orellana, F., Verma, P., Loheide II, S.P., Daly, E. 2012. Monitoring and modeling water-vegetation interactions in groundwater-dependent ecosystems. *Review of Geophysics* 50, RG3003.
- Peel, M.C., McMahon, T.A., Finlayson, B.L. 2010. Vegetation impact on mean annual evapotranspiration at a global catchment scale. *Water Resources Research* 46, W09508.
- Pham, T.T., Loft, L., Bennett, K., Phuong, V.T., Dung, L.N., Brunner, J. 2015. Monitoring and evaluation of payment for forest environmental services in Vietnam: from myth to reality. *Ecosystem Services* 16, 220-229.
- Philpott, S.M., Lin, B.B., Jha, S., Brines, S.J. 2008. A multi-scale assessment of hurricane impacts on agricultural landscapes based on land use and topographic features. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 128,12-20.
- Popa, B., Borz, S.A., Nita, M.D., Ioras, F., Iordache, E., Borlea, F., Pache, R., Abrudan, I.V. 2016. Forest ecosystem services valuation in different management scenarios: a case study of the Maramures Mountains. *Baltic Forestry* 22(2), 327-340.
- Porras, I., Grieg-Gran, M., Neves, N. 2008. All that glitters: *A review of payments for watershed services in developing countries*. Natural Resource Issues No. 11. International Institute for Environment and Development. Londres, Reino Unido.
- Sandström, K. 1998. Can forests "provide" water: widespread myth or scientific reality? *Ambio* 27(2), 132-138.
- Scott, D.F., Gush, M.B. 2017. Forest management and water in the Republic of South Africa. En: Garcia-Chevesich, P.A., Neary, D.G., Scott, D.F., Benyon, R.G., Reyna, T. (eds). *Forest management and the impact on water resources: a review of 13 countries*, pp. 159-168. UNESCO, París, Francia.
- Sheil, D. 2014. How plants water our planet: advances and imperatives. *Trends Plant Science* 19, 209-211.
- Sheil, D., Murdiyarsa, D. 2009. How forests attract rain: an examination of a new hypothesis. *Bioscience* 59, 341-347.
- Spracklen, D.V., Arnold, S.R., Taylor, C.M. 2012. Observations of increased tropical rainfall preceded by air passage over forests. *Nature* 489, 282-285.
- Susaeta, A., Soto, J.R., Adams, D.C., Allen, D.L. 2016. Economic sustainability of payment for water yield in slash pine plantations in Florida. *Water* 8, 382.
- UNEP 2017. Freshwater Strategy 2017-2021. Nairobi. Disponible en <http://www.unep.org/ecosystems/freshwater/ru/node/43> [Accedido 20 de julio de 2017].
- Valencia-Leguizamón, J., Tobón, C. 2017. Influencia de la vegetación en el funcionamiento hidrológico de cuencas de humedales de alta montaña tropical. *Ecosistemas* 26(2): 10-17.
- Van der Ent, R.J., Savenije, H.H., Schaefli, B., Steele-Dunne, S.C. 2010. Origin and fate of atmospheric moisture over continents *Water Resources Research* 46, W09525
- Viviroli, D., Weingartner, R. 2004. The hydrological significance of mountains: from regional to global scale. *Hydrology and Earth System Science* 8, 1017-1030.