

## A restauração de ecossistemas e a produção de água

Eliane Akiko Honda<sup>1,2</sup> e Giselda Durigan<sup>1</sup>

Recebido: 27.09.2016; aceito: 15.05.2017

**ABSTRACT** - (Ecosystem restoration and water yield). Although there is a widespread belief that planting forests increases water yield and rainfall, science has demonstrated that, at the scale of a watershed, the proportion of annual rainfall that flows through the river or recharges groundwater reserves is inversely proportional to the tree biomass and that increasing forests does not increase rain in the same watershed. It follows, therefore, that open ecosystems such as grasslands and savannas are more efficient than forests in water yield and also that restoration through planting trees cannot increase the amount of water produced by a watershed, in spite of improving water quality and regulation of hydrological flows. Besides preserving natural ecosystems, adopting soil conservation and suitable cultivation practices that increase the infiltration of rain throughout the catchment area can have greater contribution than planting forests if the goal is to feed the river flow even in dry months, ensuring the ecosystem services depending on that water.

**Keywords:** ecological restoration, ecosystem services, hydrology, land use, water yield

**RESUMO** - (A restauração de ecossistemas e a produção de água). Embora exista uma crença generalizada de que plantar florestas aumenta a água dos rios e a quantidade de chuva, a ciência tem demonstrado que, na escala de microbacia hidrográfica: 1) a proporção da chuva anual que se torna recurso hídrico renovável é inversamente proporcional à biomassa arbórea e 2) mais floresta não significa mais chuva na mesma bacia. Ecossistemas naturais abertos como campos e savanas são, portanto, mais eficientes que florestas como geradores de recurso hídrico renovável e plantar árvores não aumenta a produção de água, embora melhore sua qualidade e contribua para regulação da vazão ao longo do ano. Uma vez preservados os ecossistemas naturais, adotar práticas de cultivo e conservação do solo que aumentem a infiltração da chuva em toda a bacia, trará contribuição maior do que o plantio de florestas para assegurar a vazão dos rios mesmo nos meses de estiagem, proporcionando os serviços ecossistêmicos dependentes dessa água.

**Palavras-chave:** ciclo hidrológico, hidrologia, restauração, serviços ecossistêmicos, uso da terra

### Introdução

Os usos da água envolvem consumo humano, irrigação de cultivos e jardins, dessedentação de rebanhos, produção industrial, geração e fornecimento de energia e até mesmo a manutenção dos ecossistemas, que também necessitam de água para manter seu funcionamento (Postel 1996, 2000, Baron *et al.* 2002, Poff *et al.* 2003, Coates *et al.* 2012). O aumento de demanda de bens e alimentos exigidos pela população humana crescente, a degradação ambiental e as mudanças climáticas têm levado ao aumento das incertezas quanto à disponibilidade futura de água em todo o planeta (Postel 1998, Jackson *et al.* 2001, Balaji *et al.* 2012, IPCC 2014). Estudos têm demonstrado que grande proporção da população mundial já vivencia escassez hídrica (FAO 2003, Mekonnen & Hoekstra

2016) e que, até o ano de 2025, o aumento da demanda por água exercerá influência maior sobre o estado dos sistemas hídricos do planeta do que o aquecimento global (Vörösmarty *et al.* 2000).

A degradação dos ecossistemas naturais e o manejo inadequado do solo reduzem a oferta de água com padrão de qualidade aceitável para os diferentes usos e agravam os conflitos diante da escassez (Falkenmark & Molden 2008, Balaji *et al.* 2012). Algumas estratégias podem contribuir para a solução do problema: 1) diminuir o consumo da água; 2) melhorar a eficiência do uso da água; 3) otimizar o compartilhamento dos recursos disponíveis (Mekonnen & Hoekstra 2016), e 4) controlar as perdas evaporativas na bacia hidrográfica, de forma a aumentar o volume do recurso hídrico explorável. Todavia, ainda que o consumo possa ser racionalizado,

1. Floresta Estadual de Assis, Instituto Florestal do Estado de São Paulo, Caixa Postal 104, 19802-970 Assis, SP, Brasil

2. Autor para correspondência: eahonda@gmail.com

a tendência global é de aumento progressivo da demanda (Postel 1998, Vörösmarty *et al.* 2000 Coates *et al.* 2012) e muitas das ações que objetivam a melhoria da eficiência do uso e o compartilhamento solidário da água esbarram em dificuldades técnicas, biológicas e sociais (Postel 1998, 2000, Jackson *et al.* 2001, Falkenmark 2003, 2013, Poff *et al.* 2003, Falkenmark & Rockstrom 2008, Gordon *et al.* 2010, Connor & Stoddard 2012, Hoekstra 2014). Controlar as perdas evaporativas na bacia, por outro lado, tem sido a solução proposta para aproveitar melhor a água da chuva (Rockstrom *et al.* 1999) e, com isso, obter acréscimo da água que pode ser efetivamente utilizada em uma bacia hidrográfica. Trata-se de um grande desafio, de solução complexa (Huxman *et al.* 2005, Wilcox *et al.* 2006, Doody *et al.* 2011), que nem sempre resulta em aumento da produção hídrica (Hawtree *et al.* 2015, Smethurst *et al.* 2015), mas que é factível, com base nos resultados de décadas de estudos em hidrologia florestal (Bosch & Hewlett 1982, Swank *et al.* 1988, Brown *et al.* 2005, Jackson *et al.* 2005). Cabe esclarecer que, neste artigo, utilizamos o termo produção de água para nos referirmos ao recurso hídrico renovável (Postel 1996, Jackson *et al.* 2001, Huxman *et al.* 2005) ou, conforme definição da FAO (2003), ao fluxo anual dos rios e recarga dos aquíferos, gerados pela precipitação. Ou seja, ao conceito mais tradicionalmente utilizado, que abrange apenas a água que abastecerá os corpos d'água superficiais (descarga ou deflúvio - Hewlett & Hibbert 1967), acrescentamos a proporção da chuva que recarrega reservas mais profundas, como os grandes aquíferos que hoje em dia são considerados estratégicos para o futuro da humanidade (Rocha 1997, Balaji *et al.* 2012).

O papel dos ecossistemas naturais ou restaurados na proteção da qualidade da água superficial é relativamente bem compreendido, especialmente em se tratando de zonas ripárias (Neary *et al.* 2009, Dosskey *et al.* 2010, Sweeney & Newbold 2014). Os ecossistemas naturais contribuem para a regulação do microclima, do regime de fluxo de rios e do ciclo geoquímico (MEA 2005). Todavia, as relações entre a cobertura vegetal e a produção hídrica, embora amplamente estudadas e relativamente bem compreendidas pelos hidrólogos, ainda não têm sido assimiladas por outros campos da ciência e não são devidamente compreendidas pelos tomadores de decisão e pela sociedade como um todo. Para Falkenmark (2003), o entendimento equivocado sobre as questões hídricas é baseado em mitos amplamente disseminados, como o de que florestas criam água

ou florestas chamam chuva (Bruijnzeel 2004, Calder 2007, Hamilton 2008). Também no Brasil, a maioria das pessoas acredita, equivocadamente, que plantar árvores faz aumentar a água dos rios e a quantidade de chuva no local onde a ação foi executada (Lima 2010). No entanto, a ciência tem demonstrado que, na maioria das vezes, o funcionamento hidrológico dos ecossistemas é muito diferente do que prega o senso comum.

A correta compreensão dos processos hidrológicos e de sua relação com a vegetação depende de estudos multidisciplinares e da tradução do conhecimento para a sociedade como um todo e, em especial, para formuladores de políticas públicas (Poff *et al.* 2003, Falkenmark 2003, 2013, Gordon *et al.* 2010, Falkenmark *et al.* 2014). Buscando facilitar essa compreensão, reunimos, neste artigo, os conhecimentos existentes sobre as relações entre a cobertura vegetal e a produção de água, provenientes de estudos já realizados, e construímos nossa argumentação relativa aos benefícios que se pode esperar da restauração de ecossistemas em relação à produção de água em bacias hidrográficas em nível local.

Embora existam publicações brasileiras abordando as relações entre a vegetação e os processos hidrológicos (Lima 1993, 2010, Tucci & Clarke 1997, Lima & Zakia 2010, Tucci 2002, Tucci & Mendes 2006, Salemi *et al.* 2011), raramente esta relação tem sido explorada no contexto da restauração de ecossistemas, que foi objeto do nosso estudo. A restauração ecológica é definida como o processo e prática de auxiliar a recuperação de um ecossistema que foi degradado, danificado ou destruído (SER, 2004). Embora a Sociedade Internacional de Restauração Ecológica (SER 2004) recomende que as ações de restauração busquem restabelecer um ecossistema o mais semelhante possível ao pré-existente, este entendimento não é consensual (Choi 2007). Alguns estudos indicam que esta não é uma meta factível (Rey-Benayas *et al.* 2009, Suding 2011) e, em diferentes regiões do mundo, a literatura traz exemplos de intervenções de reabilitação, sistemas agroflorestais ou mesmo silvicultura que têm sido consideradas como restauração (Li 2006, Moreno-Calles *et al.* 2010, Cao *et al.* 2011, Deng *et al.* 2016). Além disso, nem sempre existem informações históricas sobre os ecossistemas e, especialmente no Brasil, é comum que a restauração seja baseada, unicamente, no plantio de árvores, sendo negligenciadas outras formas de vida e tipos de vegetação não-florestal (Durigan

& Melo 2011, Durigan & Engel 2012, Overbeck *et al.* 2015). A verdade é que todas essas formas de intervenção que visam recuperar a cobertura vegetal, independentemente da sua adequação ao conceito adotado pela SER (2004), exercem influência sobre os recursos hídricos.

Abordar a produção hídrica no contexto da restauração é de extrema importância no momento em que iniciativas e acordos globais se propõem a plantar florestas em larga escala em todo o planeta, sem que as consequências dessas ações de plantio sobre os recursos hídricos em escala local tenham sido devidamente avaliadas. Para Falkenmark (2003), as ideias de sequestro de carbono em países tropicais pobres para que os países ricos de clima temperado resolvam suas culpas relativas às mudanças climáticas é uma demonstração cabal do descaso com as questões hídricas, a que a autora se refere como *water blindness*. Entre os grandes acordos globais de restauração florestal destaca-se o Bonn Challenge (IUCN 2011), que tem mobilizado diversos países a restaurar 150 milhões de hectares de florestas até 2020, sem que haja iniciativas correspondentes para restaurar savanas, campos, áreas úmidas ou outros tipos de ecossistemas não florestais. Os autores do mapa global das regiões prioritárias para a restauração (Laestadius *et al.* 2011), base para as ações relativas ao Bonn Challenge (IUCN 2011), apontam a existência de mais de 2 bilhões de hectares de terras ‘disfuncionais’, quantificadas como oportunidades para restauração de paisagens florestais. No entanto, esse mapa inclui pelo menos 900 milhões de hectares de campos e savanas, que foram considerados disfuncionais e, por isso, erroneamente mapeados como áreas prioritárias para restauração florestal (Veldman *et al.* 2015). Esta interpretação de que savanas e campos são terras disfuncionais norteia também as orientações técnicas para a priorização de áreas para restauração em todo o mundo (IUCN & WRI 2014), que, inclusive, tratam plantações florestais homogêneas com espécies exóticas de rápido crescimento como uma das técnicas que podem ser utilizadas para cumprir as metas globais de restauração.

Partindo da premissa de que os benefícios da restauração florestal sobre a qualidade da água são razoavelmente bem compreendidos, nosso objetivo maior neste artigo é elucidar as relações entre as ações de restauração de ecossistemas e a água como recurso renovável. A compreensão dessas relações pode contribuir para evitar ações inadequadas de restauração, que possam comprometer

os recursos hídricos renováveis, tanto superficiais como subsuperficiais, onde este é um recurso escasso.

### Florestas e produção de água

O funcionamento hidrológico de bacias hidrográficas e suas relações com a cobertura vegetal têm sido objeto de estudo há décadas, o que possibilitou algumas generalizações. Salvo em casos específicos (Huxman *et al.* 2005, Wilcox *et al.* 2006, Doody *et al.* 2011), a regra, válida para a unidade espacial de uma microbacia hidrográfica, é que: 1) a proporção de água da chuva que comporá os recursos hídricos renováveis é inversamente proporcional à biomassa da vegetação arbórea (Lima *et al.* 1990, Le Maitre *et al.* 1999, Zou *et al.* 2014, Oliveira *et al.* 2016); e 2) o aumento da vegetação florestal dificilmente aumenta o volume de chuva na mesma bacia hidrográfica, a menos que a área da bacia hidrográfica seja muito extensa (Eltahir & Bras 1996, Tremberth 1999, Ellison *et al.* 2012). Tremberth (1999) menciona que, em uma extensão de 500 km, apenas cerca de 8,9% da precipitação total sobre a superfície terrestre são provenientes de evapotranspiração dentro da mesma região. Geralmente, a água evaporada precipita em algum local distante de onde evaporou ou até mesmo nos oceanos ou em qualquer outro lugar do planeta, que dependerá da movimentação das massas de ar em escala global (Tremberth 1999, Ellison *et al.* 2012). Entretanto, neste artigo, não tratamos da influência da vegetação sobre o ciclo da água em escala planetária. Conforme afirmamos anteriormente, nesse artigo abordaremos aspectos relativos à microbacia, escala em que é possível aplicar o conceito de manejo integrado de vegetação, água e solo e identificar os efeitos decorrentes dos tratamentos aplicados.

Para entender as relações entre a cobertura vegetal e a quantidade de água da chuva que fará parte dos recursos hídricos é preciso, primeiramente, saber que essas relações se estabelecem no espaço territorial de uma bacia hidrográfica, sendo mais fácil quantificar, compreender ou manejar a produção de água em bacias de pequenas dimensões - as microbacias hidrográficas. A quantidade de água da chuva que pode vir a ser recurso hídrico renovável em uma bacia hidrográfica pode ser estimada pela seguinte equação:

$$V = P - (I + T + E)$$

Onde:

V: quantidade anual de água que pode vir a ser recurso hídrico (corpos d'água superficiais ou reservas subterrâneas)

P: precipitação anual

I: interceptação anual da chuva (pela vegetação ou pela serapilheira)

T: transpiração anual pelas plantas (água que é retirada do solo pelas plantas e lançada à atmosfera)

E: evaporação anual da superfície do solo ou dos corpos d'água

Dessa forma, o volume anual de recurso hídrico renovável fornecido por uma bacia hidrográfica será tanto maior quanto menores forem as perdas de água para a atmosfera ( $I + T + E$ ). Extensos estudos de revisão (Bosh & Hewlett 1982, Brown *et al.* 2005, Jackson *et al.* 2005) evidenciaram seguidamente os resultados obtidos em bacias hidrográficas com manipulação da vegetação, em que a redução da biomassa resultou em aumento da produção hídrica. Estudos baseados em bacias hidrográficas extensas (Costa *et al.* 2003, no Tocantins e Coe *et al.* 2011, no Araguaia), assim como estudos baseados em modelagem para escalas maiores (D'Almeida *et al.* 2007, para a Amazônia como um todo), indicam que geralmente o desmatamento leva ao aumento da vazão, em diferentes escalas.

A ciência tem demonstrado que, quando há disponibilidade de água no solo, tanto maiores serão as perdas evaporativas quanto maior for a biomassa da vegetação (Calder 1998, Huxman *et al.* 2005, Zhang *et al.* 2005). As perdas evaporativas aumentam em função do aumento da interceptação - que é a água retida pelas copas durante a chuva e que retorna para a atmosfera por evaporação (Carlyle-Moses & Gash 2011, Zou *et al.* 2014, Honda & Durigan 2016)

e da transpiração pelas plantas (Bucci *et al.* 2008, Giambelluca *et al.* 2009, del Campo *et al.* 2014). O aumento da transpiração, por sua vez, é proporcional ao aumento da superfície foliar (Dietz *et al.* 2006, Kramer & Holscher 2009, Del Campo *et al.* 2014) e do volume de solo explorado pelo sistema radicular (Nepstad *et al.* 1994, Jackson *et al.* 1996, Calder *et al.* 1997, Wine *et al.* 2015). À medida que aumentam as perdas evaporativas, diminui a quantidade de água do solo (Bond *et al.* 2007, Bucci *et al.* 2008, Giambelluca *et al.* 2009, del Campo *et al.* 2014, Zou *et al.* 2014, Deng *et al.* 2016) e, por consequência, diminui a recarga das reservas subterrâneas (Lima *et al.* 1990, Le Maitre *et al.* 1999, Oliveira *et al.* 2016). Para exemplificar, a percentagem da água da chuva interceptada em relação à precipitação anual total em florestas tropicais pode corresponder a 9,6% a 31,8% (Carlyle-Moses & Gash 2011), enquanto em estudo realizado no gradiente de biomassa entre o cerrado *strictu sensu* e o cerradão a interceptação variou de 3,4% a 20,3% da precipitação anual (Honda & Durigan 2016).

Em síntese, conforme ilustrado na figura 1, à medida que aumenta a biomassa aérea, é otimizado o serviço ecossistêmico de armazenamento de carbono, mas diminui a proporção de água da chuva que pode abastecer corpos d'água superficiais ou reservas subterrâneas (Lima *et al.* 1990, Le Maitre *et al.* 1999, Oliveira *et al.* 2016). Depreende-se, portanto, que ecossistemas naturais de menor biomassa, como campos e savanas, são mais eficientes do que ecossistemas florestais no fornecimento de recurso hídrico renovável. Ou seja, para um mesmo volume

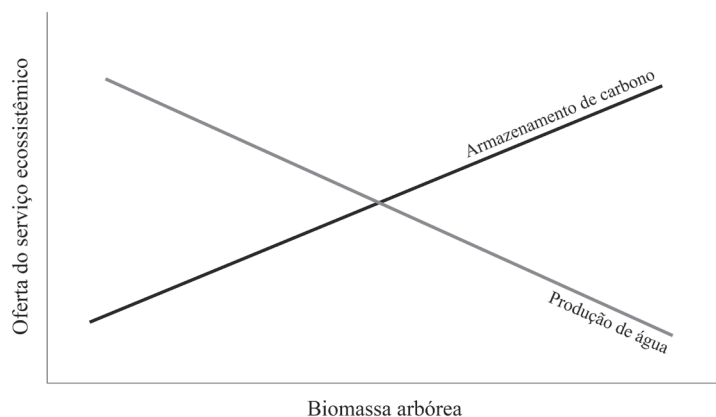


Figura 1. Representação esquemática do trade-off entre a oferta dos serviços ecossistêmicos de armazenamento de carbono e produção de água em função da biomassa arbórea.

Figure 1. Schematic representation of the trade-off between the supply of the ecosystem services of Carbon storage and water yield as a function of tree biomass.



de chuvas, o volume de água que irá para os corpos d'água superficiais ou reservas subterrâneas será maior em uma bacia hidrográfica ocupada por vegetação de baixa biomassa do que se a mesma bacia fosse ocupada por floresta.

### Uso da terra e regulação da vazão dos rios

Nas situações em que regular a vazão da bacia ao longo do ano é mais importante do que aumentar o volume total produzido anualmente, o destino da água da chuva é muito importante e mais complexo do que na equação apresentada anteriormente. Tucci & Clarke (1997) descrevem o destino da parcela de precipitação que atinge o solo da seguinte forma: “pode infiltrar ou escoar superficialmente dependendo da capacidade do solo em infiltrar. (...). A água que infiltra pode percolar para o aquífero ou gerar um escoamento subsuperficial ao longo dos canais internos do solo, até a superfície ou um curso d'água. A água que percola até o aquífero é armazenada e transportada até os rios, criando condições para manter os rios perenes nos períodos de longa estiagem”. Esta descrição está correta, exceto pela omissão da proporção da água que percola profundamente e ficará confinada em aquíferos profundos, não alimentando corpos d'água superficiais. A recarga anual do Aquífero Guarany, por exemplo, é estimada em  $160 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$  (Rocha 1997).

O uso do solo exerce, portanto, forte influência sobre as proporções de todos esses processos e sobre a distribuição da vazão ao longo do ano, conforme representado na figura 2. Quando o solo é recoberto por vegetação nativa (campos, savanas ou florestas, naturais ou restaurados), a infiltração é favorecida e o escoamento superficial tende a ser mínimo, exceto em eventos chuvosos de alta intensidade ou em locais onde os solos são rasos (Bonell 2005). Quando o solo é cultivado com práticas adequadas de conservação e são preservadas as suas propriedades físicas favoráveis à infiltração e percolação da água (Derpsch *et al.* 1991, Bonell 2005, Leite *et al.* 2009, Pinheiro *et al.* 2009), o escoamento superficial também pode ser mínimo (Beutler *et al.* 2003, Panachuki *et al.* 2011). Cabe ressaltar, todavia, que, embora tanto florestas quanto ecossistemas de baixa biomassa ou cultivos com boas práticas exerçam, igualmente, a função de regulação da vazão ao longo do ano, o volume será comparativamente menor quando há florestas (naturais ou plantadas), conforme foi claramente demonstrado por Zhang *et al.* (2001) e Brown *et al.* (2005). Porém, em pastagens ou cultivos com solos compactados e sem práticas de conservação, assim como em solos expostos, a infiltração é reduzida e o impacto direto das gotas da chuva desagrega as partículas do solo e produz sedimentos que são carregados diretamente para os rios pela água da chuva que não infiltrou (Tarolli &

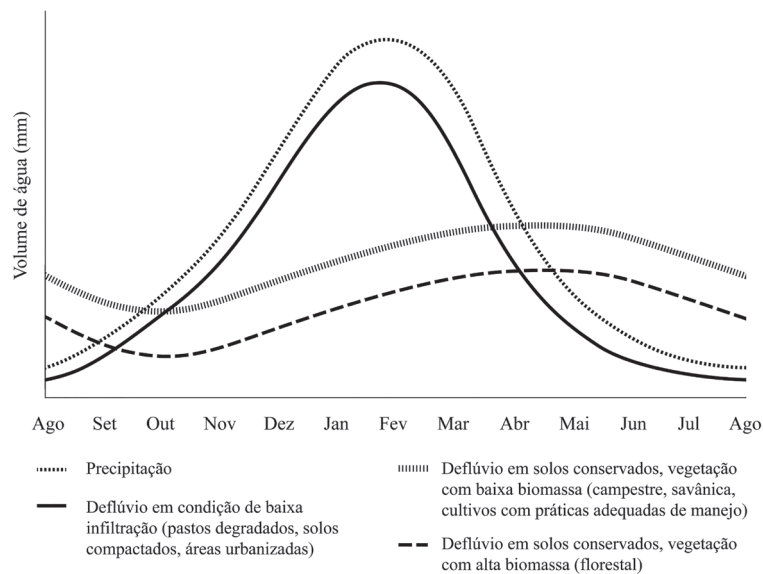


Figura 2. Representação esquemática da variação na precipitação e no deflúvio ao longo do ano em região de clima estacional, em três condições hipotéticas relativas ao tipo de cobertura vegetal e manejo do solo.

Figure 2. Schematic representation of the variation in rainfall and flow throughout the year in a region of seasonal climate, in three hypothetical conditions related to the type of vegetation cover and soil management.

Sofia 2016). As consequências são a diminuição da vazão ou até a interrupção do fluxo na estiagem e cheias com maior volume e mais frequentes na estação chuvosa (Grip *et al.* 2005), além de assoreamento e contaminação de fontes hídricas. A situação é agravada em áreas impermeabilizadas, como zonas urbanas ou rodovias, em que toda a água da chuva escoar pela superfície (Rijsdijk *et al.* 2007, Thomaz *et al.* 2013, Ramos-Scharrón & LaFevor 2016). Nesses casos, cabe ressaltar que a conservação ou restauração da vegetação apenas nas faixas ciliares não impede que a água que não infiltrou a montante escoar imediatamente para os rios. Este volume concentrado de água que escoar superficialmente, embora seja quantificado como parte da produção hídrica, permanece disponível por um período muito curto de tempo, o que o torna, na prática, indisponível (FAO 2003, Falkenmark & Rockstrom 2008, Falkenmark *et al.* 2014). Além disso, essa água tem, frequentemente, qualidade abaixo dos padrões estabelecidos para consumo humano. O excesso de água decorrente do escoamento superficial em picos de chuva pode se tornar um problema maior do que a escassez (Hamilton 2008), mesmo em regiões com baixa pluviosidade. Os serviços esperados dos ecossistemas protegidos ou restaurados são, portanto, dependentes da água que infiltra e abastece os corpos d'água e as reservas subterrâneas (Postel 1998, Jackson *et al.* 2001, FAO 2003, Falkenmark & Rockstrom 2008).

Se o ecossistema (natural ou restaurado) ou o uso adequado da terra otimizam a capacidade de infiltração da água da chuva em toda a bacia hidrográfica, a proporção de água que poderá vir a ser recurso hídrico dependerá, essencialmente, da diferença entre o volume de chuva que precipita (P) e o que é interceptado (I) ou utilizado pelas plantas (T). A evaporação direta da superfície do solo exposto (E) é um processo de perda da água para a atmosfera em geral de menor importância, embora possa atingir valores significativos na presença de energia e suprimento contínuo de água (Reichardt & Timm 2010). A presença de vegetação desfavorece as perdas evaporativas da superfície do solo (Ritchie 1972, Royer *et al.* 2012, Bodner *et al.* 2015), ao mesmo tempo que favorece as demais formas de perda (interceptação e transpiração) (Sun & Liu 2013). Consequentemente, a proporção da evaporação direta da superfície do solo, em ecossistemas naturais ou restaurados, torna-se ínfima em relação ao total de água perdida pelo sistema (Savenije 2004, Huxman *et al.* 2005).

Os estudos já realizados sobre as relações entre a cobertura vegetal e a produção de água (volume de água dos rios) em uma bacia hidrográfica, em conjunto, levam a uma outra generalização altamente relevante no contexto da restauração de ecossistemas: para que a mudança na vegetação afete significativamente a produção de água em uma bacia hidrográfica, é preciso que essa mudança ocorra em pelo menos 20% da área da bacia (Bosch & Hewlett 1982, Brown *et al.* 2005). Simplificadamente, ao contrário do que prega o senso comum, desmatar mais de 20% da bacia poderá aumentar a produção total de água e plantar florestas em mais de 20% da bacia poderá diminuir o volume total de água dos rios. Mudanças em áreas menores normalmente não resultam em variação significativa de vazão dos rios, embora possam exercer forte influência sobre a qualidade da água.

### **A restauração e os serviços ecossistêmicos relacionados à água**

Uma vez entendidos os componentes da equação que representa os processos envolvidos na produção de água em uma bacia hidrográfica, o papel das intervenções de restauração sobre esses processos pode ser mais facilmente compreendido. Tais intervenções, se adequadas, otimizam os serviços ecossistêmicos que dependem do volume de água disponível, da sua qualidade e da regulação da vazão dos rios. A conservação da água, tanto em quantidade como em qualidade, depende, primariamente, de práticas adequadas de conservação do solo em toda a bacia (Falkenmark & Rockstrom 2008, Gordon *et al.* 2010, Falkenmark *et al.* 2014), que incluem também a localização correta de carreadores e estradas. Enfatizamos ainda que, enquanto os efeitos benéficos das práticas de conservação do solo são percebidos imediatamente após a aplicação das técnicas (Bodner *et al.* 2015), os efeitos das funções de proteção aos recursos hídricos após as atividades de restauração só serão percebidos após o lento processo de crescimento da vegetação (Grip *et al.* 2005, Holscher *et al.*, 2005, Mu *et al.* 2007, Vertessy *et al.* 2011). A recuperação da vegetação deve ser entendida, portanto, como uma ação complementar.

As Áreas de Preservação Permanente - APP, somadas à Reserva Legal, geralmente não ultrapassam 20% da área de uma propriedade, proporção estabelecida pela lei como área mínima a ser protegida ou recuperada na maioria dos casos no Brasil (exceto na Amazônia). Assim, a ação isolada de restauração florestal em

APPs pode influenciar muito pouco o volume de água fornecido por uma bacia hidrográfica com base nos limiares já conhecidos (Bosch & Hewlett 1982, Brown *et al.* 2005), embora possa melhorar sua qualidade. Cabe a ressalva de que, em alguns casos, o plantio de árvores, mesmo em áreas pequenas, pode influenciar negativamente a produção de água. Por exemplo, a substituição equivocada de uma vegetação ripária de pequeno porte, com baixa superfície foliar e sistema radicular superficial (campos de altitude, campos úmidos, veredas, etc.), por árvores com alto índice de área foliar e sistema radicular profundo, com capacidade de acesso permanente à água subterrânea ou do próprio rio, pode acarretar aumento do consumo de água pela vegetação substituída (Le Maitre *et al.* 1999, Doody *et al.* 2011), resultando em diminuição da produção hídrica na bacia hidrográfica (Le Maitre *et al.* 2015). O plantio de floresta, nesses casos, não pode, portanto, ser considerado uma ação de restauração.

O papel da restauração na produção de água em uma bacia hidrográfica deve ser definido com base no serviço ecossistêmico esperado e, conforme demonstrado, não se deve esperar aumento da produção hídrica como um dos serviços prestados pela floresta. Ao contrário, o decréscimo da produção hídrica devido à presença da floresta é o preço por ela cobrado pelos outros serviços ecossistêmicos prestados, como a fixação de carbono (Jackson *et al.* 2005). Entre os serviços ecossistêmicos mais importantes prestados pela floresta merecem destaque o controle da erosão superficial, a regulação do fluxo dos rios, da ciclagem biogeoquímica e do microclima e a melhoria da qualidade da água (extensa revisão em MEA 2005, síntese em Costanza *et al.* 1997, e texto em português por Tambosi *et al.* 2015).

A eficácia da cobertura florestal no controle da erosão superficial e na diminuição da frequência de cheias em escala de microbacia hidrográfica é comprovada (Rice *et al.* 1969, Montgomery *et al.* 2000, Glade 2003, Ramos-Scharrón & MacDonald 2007, Reubens *et al.* 2007, García-Ruiz *et al.* 2010). Uma vez que a água atinge o solo, espera-se que a vegetação restaurada estimule a sua infiltração, para evitar que escoe pela superfície, arrastando consigo os sedimentos, poluentes, contaminantes e detritos, ou desencadeando processos erosivos mais severos. Quanto maior a área restaurada, é de se esperar que seja maior a eficácia no controle de cheias e menor a frequência desses eventos. É importante ressaltar, porém, que a proteção oferecida pela floresta só é

efetiva em eventos chuvosos de baixo a médio volume (Bruijnzeel 2004, Ramos-Scharrón & MacDonald 2007). Além disso, para os processos erosivos superficiais mais severos, como a erosão em sulcos ou voçorocas ou no caso de erosão geológica, a vegetação florestal não é eficiente e nem evita a ocorrência de eventos extremos de movimento de massa (Grip *et al.* 2005, Steinacher *et al.* 2009).

Se o benefício esperado é a qualidade da água, as intervenções de restauração devem priorizar a recuperação do solo e da vegetação nos locais mais frágeis, nas áreas descobertas e nos trechos da bacia sujeitos a maior escoamento superficial e, portanto, expostos a maiores riscos de erosão e assoreamento. Nascentes e terrenos inclinados devem ser, portanto, prioritariamente protegidos. Para esta finalidade, florestas, savanas ou campos, se devidamente restaurados, podem igualmente exercer a função de proteção, que será mais efetiva quanto maior a largura da faixa restaurada ao redor do corpo d'água (Sweeney & Newbold 2014). Porém, sabe-se hoje que as principais causas de erosão e assoreamento, não somente no Brasil, mas também em grande parte do planeta, são a localização inadequada das estradas rurais e rodovias e a falta de preocupação com o destino da água das chuvas por elas captadas (Thomaz *et al.* 2014, Ramos-Scharrón & LaFevor 2016, Tarolli & Sofia 2016). Esses problemas, todavia, as intervenções de restauração não podem resolver.

Se o problema a resolver é a escassez local de água, o plantio de árvores pode contribuir pouco ou até mesmo agravar o problema, caso a ação de restauração seja equivocada, como está acontecendo em extensas regiões na China (Mu *et al.* 2007, Cao *et al.* 2011, Deng *et al.* 2016). Estudos realizados naquele país têm demonstrado que a vazão dos rios foi severamente comprometida após o plantio de florestas substituindo ecossistemas de menor biomassa ou utilizando espécies arbóreas de rápido crescimento em alta densidade. Nesses casos, é mais importante readequar o uso e manejo do solo em toda a bacia, com base no conhecimento de que o plantio de florestas poderá levar à diminuição da produção de água, ainda que contribua para melhorar sua qualidade ou regularizar o regime de fluxo. A restauração de vegetação não florestal pode exercer igualmente a proteção contra a erosão superficial e melhoria da qualidade da água, sem comprometer a produção hídrica. A ameaça que plantações florestais oferecem aos recursos hídricos em regiões com escassez de água (Jackson *et al.* 2005, Cao *et al.* 2011, Deng *et al.* 2016) é ainda mais grave

se a silvicultura for realizada em larga escala ou se as árvores tiverem acesso permanente ao lençol freático, como tem ocorrido, por exemplo, na África do Sul (Le Maitre *et al.* 1999, 2015), Argentina (Jackson *et al.* 2005, Noretto *et al.* 2005), Estados Unidos (Zou *et al.* 2014) e Índia (Calder 2007). Estudo baseado em mais de 600 conjuntos de dados de bacias hidrográficas em todo o mundo, em regiões com estação seca prolongada, demonstrou números alarmantes de diminuição da vazão dos rios (em média 52% de diminuição do fluxo) e de rios que secaram completamente por no mínimo um ano (13%), quando foram efetuadas plantações florestais em áreas que não tinham florestas, sendo o risco maior em regiões com índice pluviométrico anual inferior a 1.000 mm (Jackson *et al.* 2005). Embora não se trate, na maioria dos casos, de restauração ecológica conforme definida pela SER (2004), o comprometimento da produção hídrica é a ameaça que se coloca quando grandes acordos internacionais propõem o plantio de florestas sobre savanas e campos (Veldman *et al.* 2015), já que plantações florestais têm sido tratadas nos acordos como uma das alternativas técnicas de restauração (IUCN & WRI 2014).

### Considerações finais

Neste artigo tratamos da produção de água em uma bacia hidrográfica e de suas relações com intervenções que visam a restauração da cobertura vegetal. Abordamos as implicações dessas intervenções e da conservação dos solos sobre a oferta dos serviços ecossistêmicos relacionados com a água para as populações locais. Esta abordagem é distinta dos estudos de modelagem baseados no ciclo da água em escala planetária, que apontam para a importância das grandes massas de floresta na alimentação dos chamados rios voadores (Makarieva *et al.* 2009, 2014) e, portanto, sobre o clima global. Sob esta perspectiva, teoricamente, a implantação de florestas em larga escala em todo o planeta seria capaz de influenciar o clima. Este seria, porém, um serviço ecossistêmico difuso potencialmente oferecido pelos ecossistemas restaurados, assim como o sequestro de carbono, cujo benefício não pode ser percebido localmente, conforme destacado por Parr *et al.* (2014).

Não questionamos os benefícios que são proporcionados pelas florestas em relação à qualidade da água e à regulação da vazão dos rios na escala de microbacias hidrográficas, que, cabe ressaltar, também são proporcionados por outros tipos de ecossistemas que não florestas. No entanto, buscamos destacar neste artigo que não se pode esperar que o plantio de

florestas faça aumentar o volume total de água que pode ser utilizado como recurso renovável (vazão dos rios + recarga de água subterrânea). Ao contrário, o aumento da biomassa fará diminuir a água utilizável. Este pode não ser um problema em regiões em que não há escassez hídrica, mas pode impactar diretamente a economia regional e as populações humanas em regiões onde a água é um recurso limitado.

Além das mudanças decorrentes do plantio de árvores, outras causas de mudança estrutural da vegetação que resultem em aumento de biomassa (adensamento da vegetação nativa, invasão das savanas por espécies florestais nativas ou exóticas) também devem ser contabilizadas como ameaça à produção hídrica (Huxman *et al.* 2005, Zou *et al.* 2014, Le Maitre *et al.* 2015, Honda & Durigan 2016). Esta constatação é de extrema importância para o planejamento das ações de restauração. Se o objetivo da restauração em relação à produção de água é restabelecer o regime de fluxo histórico, ou seja, anterior à conversão dos ecossistemas naturais (Poff *et al.* 1997, Baron *et al.* 2002), a restauração nunca deve resultar em vegetação com biomassa diferente do ecossistema natural pré-existente que foi degradado. Por exemplo, plantar árvores em alta densidade (florestas) sobre campos naturais (campos sulinos, campos úmidos, veredas) ou em regiões de Cerrado não pode ser considerada uma ação de restauração. Ao contrário, pode ser um desastre ambiental para quem busca aumentar a produção de água, já que quanto mais árvores, menos água estará disponível para proporcionar os serviços ecossistêmicos dos quais tanto dependemos.

### Agradecimentos

As autoras agradecem aos cinco revisores anônimos pelas sugestões para aprimoramento do artigo e a Dora Souza Dias, pela melhoria da qualidade das figuras. G.D. agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela bolsa de produtividade em pesquisa (Processo 303179/2016-3).

### Literatura citada

Balaji, R., Connor, R., Glennie, P., Van der Gun, J., Lloyd, G.J. & Young, G. 2012. The water resource: variability, vulnerability and uncertainty. *In*: WWAP (World Water Assessment Programme). The United Nations World Water Development Report 4, Volume 1: Managing Water under Uncertainty and Risk. Paris, UNESCO, pp. 77-100.



- Baron, J.S., Poff, N.L., Angermeier, P.L., Dahm, C.N., Gleick, P.H., Hairston, N.G., Jackson, R.B., Johnston, C.A., Richter, B.D. & Steinman, A. D.** 2002. Meeting ecological and societal needs for freshwater. *Ecological Applications* 12: 1247-1260.
- Rey-Benayas, J.M., Newton, A.C., Diaz, A. & Bullock, J.M.** 2009. Enhancement of biodiversity and ecosystem services by ecological restoration: a meta-analysis. *Science* 325: 1121-1124.
- Beutler, J.F., Bertol, I., Veiga, M. & Wildner, L.P.** 2003. Perdas de solo e água num Latossolo Vermelho aluminoférrico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo sob chuva natural. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 27: 509-517.
- Bodner, G., Nakhforoosh, A. & Kaul, H.P.** 2015. Management of crop water under drought: a review. *Agronomy for Sustainable Development* 35: 401-442.
- Bond, B.J., Meinzer, F.C., & Brooks, J.R.** 2008. How trees influence the hydrological cycle in forest ecosystems. *In: P.J. Wood, D.M. Hannah, J.P. Sadler (eds.) Hydroecology and Ecohydrology: Past, present and future.* Wiley & Sons, New York, pp. 7-28.
- Bonell, M.** 2005. Runoff generation in tropical forests. *In: M. Bonell, L.A. Bruijnzeel (eds.) Forests, Water and People in the Humid Tropics: Past, present and future hydrological research for integrated land and water management.* Cambridge University Press, Cambridge, pp. 314-406.
- 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.
- 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: 28-61.
- Bruijnzeel, L.A.** 2004. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? *Agriculture, Ecosystems and Environment* 104: 185-228.
- Bucci, S.J., Scholz, F.G., Goldstein, G., Hoffmann, W.A., Meinzer, F.C., Franco, A.C., Giambelluca, T. & Miralles-Wilhelm, F.** 2008. Controls on stand transpiration and soil water utilization along a tree density gradient in a Neotropical savanna. *Agricultural and Forest Meteorology* 148: 839-849.
- Calder, I.R., Rosier, P.T., Prasanna, K.T. & Parameswarappa, S.** 1997. Eucalyptus water use greater than rainfall input-possible explanation from southern India. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 1: 249-256.
- Calder, I.R.** 1998. Water use by forests, limits and controls. *Tree Physiology* 18: 625-631.
- Calder, I.R.** 2007. Forests and water-ensuring forest benefits outweigh water costs. *Forest Ecology and Management* 251: 110-120.
- Cao, S., Chen, L., Shankman, D., Wang, C., Wang, X. & Zhang, H.** 2011. Excessive reliance on afforestation in China's arid and semi-arid regions: lessons in ecological restoration. *Earth-Science Reviews* 104: 240-245.
- Carlyle-Moses, D.E., Gash, J.H.C.** 2011. Rainfall interception loss by forest canopies. *In: D.F. Levia, D. Carlyle-Moses, T. Tanaka (eds.) Forest Hydrology and Biogeochemistry: Synthesis of Past Research and Future Directions.* Springer, Dordrecht Heidelberg London New York. (Ecological Studies 216).
- Choi Y.D.** 2007. Restoration Ecology to the Future: A Call for New Paradigm. *Restoration Ecology* 15: 351-353.
- Coates, D., Connor, R., Leclerc, L., Rast, K.S. & Webber, M.** 2012. Water demand: what drives consumption? *In: WWAP (World Water Assessment Programme). The United Nations World Water Development Report 4, Volume 1: Managing Water under Uncertainty and Risk.* UNESCO, Paris, pp. 44-76.
- Coe, M.T., Latrubesse, E.M., Ferreira, M.E., & Amsler, M.L.** 2011. The effects of deforestation and climate variability on the streamflow of the Araguaia River, Brazil. *Biogeochemistry* 105: 119-131.
- Connor, R. & Stoddard, H.** 2012. Recognizing the centrality of water and its global dimensions. *In: WWAP (World Water Assessment Programme). The United Nations World Water Development Report 4, Volume 1: Managing Water under Uncertainty and Risk.* UNESCO, Paris, pp. 22-42.
- Costa, M. H., Botta, A., & Cardille, J. A.** 2003. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia. *Journal of Hydrology* 283: 206-217.
- Costanza, R., d'Arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neil, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P. & van der Brilt, M.** 1997. The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital. *Nature* 387: 253-260.
- D'Almeida, C., Vörösmarty, C.J., Hurtt, G.C., Marengo, J.A., Dingman, S.L. & Keim, B.D.** 2007. The effects of deforestation on the hydrological cycle in Amazonia: a review on scale and resolution. *International Journal of Climatology* 27: 633-647.
- Del Campo, A.D., Fernandes, T.J. & Molina, A.J.** 2014. Hydrology-oriented (adaptive) silviculture in a semiarid pine plantation: How much can be modified the water cycle through forest management? *European Journal of Forest Research* 133: 879-894.
- Deng, L., Yan, W., Zhang, Y. & Shangguan, Z.** 2016. Severe depletion of soil moisture following land-use changes for ecological restoration: Evidence from northern China. *Forest Ecology and Management* 366: 1-10.

- Derpsch, R., Roth, C., Sidiras, N. & Köpek, U.** 1991. Controle de erosão no Paraná, Brasil: sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo. GTZ, Eschborn.
- Dietz, J., Hölscher, D. & Leuschner, C.** 2006. Rainfall partitioning in relation to forest structure in differently managed montane forest stands in Central Sulawesi, Indonesia. *Forest Ecology and Management* 237: 170-178.
- Doody, T.M., Nagler, P.L., Glenn, E.P., Moore, G.W., Morino, K., Hultine, K.R. & Benyon, R.G.** 2011. Potential for water salvage by removal of non-native woody vegetation from dryland river systems. *Hydrological Processes* 25: 4117-4131.
- Dosskey, M.G., Vidon, P., Gurwick, N.P., Allan, C.J., Duval, T.P. & Lowrance, R.** 2010. The role of riparian vegetation in protecting and improving chemical water quality in streams. *Journal of the American Water Resources Association* 46: 261-277.
- Durigan, G. & Melo, A.C.G.** 2011. Panorama das políticas públicas e pesquisas em restauração ecológica no estado de São Paulo, Brazil. *In: E. Figueroa (org.). Conservación de la biodiversidad en las Américas: lecciones y recomendaciones de política.* Universidad de Chile, Santiago, pp. 355-387.
- Durigan, G. & Engel, V.L.** 2012. Restauração de ecossistemas no Brasil: onde estamos e para onde podemos ir? *In: S.V. Martins (org.). Restauração ecológica de ecossistemas degradados.* Editora UFV, Viçosa, pp. 41-68.
- Ellison, D., Futter, M.N. & Bishop, K.** 2012. On the forest cover-water yield debate: from demand-to supply-side thinking. *Global Change Biology* 18: 806-820.
- Eltahir, E.A., & Bras, R.L.** 1996. Precipitation recycling. *Reviews of Geophysics* 34: 367-378.
- Falkenmark, M.** 2003. Freshwater as shared between society and ecosystems: from divided approaches to integrated challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 358: 2037-2049.
- Falkenmark, M.** 2013. Growing water scarcity in agriculture: future challenge to global water security. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 371: 20120410.
- Falkenmark, M., Jägerskog, A. & Schneider, K.** 2014. Overcoming the land-water disconnect in water-scarce regions: time for IWRM to go contemporary. *International Journal of Water Resources Development* 30: 391-408.
- Falkenmark, M. & Molden, D.** 2008. Wake up to realities of river basin closure. *International Journal of Water Resources Development* 24: 201-215.
- Falkenmark, M. & Rockström, J.** 2008. Building resilience to drought in desertification-prone savannas in Sub-Saharan Africa: The water perspective. *Natural Resources Forum* 32: 93-102.
- FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations.** 2003. Review of world water resources by country. *Water Reports* 23.
- Giambelluca, T.W., Scholz, F.G., Bucci, S.J., Meinzer, F.C., Goldstein, G., Hoffmann, W.A., Franco, A.C. & Buchert, M.P.** 2009. Evapotranspiration and energy balance of Brazilian savannas with contrasting tree density. *Agricultural and Forest Meteorology* 149: 1365-1376.
- García-Ruiz, J.M., Beguería, S., Alatorre, L.C. & Puigdefábregas, J.** 2010. Land cover changes and shallow landsliding in the flysch sector of the Spanish Pyrenees. *Geomorphology* 124: 250-259.
- Glade, T.** 2003. Landslide occurrence as a response to land use change: a review of evidence from New Zealand. *Catena* 51: 297-314.
- Gordon, L.J., Finlayson, C.M. & Falkenmark, M.** 2010. Managing water in agriculture for food production and other ecosystem services. *Agricultural Water Management* 97: 512-519.
- Grip, H., Fritsch, J.M. & Bruijnzeel, L.A.** 2005. Soil and water impacts during forest conversion and stabilisation to new land use. *In: M. Bonell, L.A. Bruijnzeel (eds.). Forests, Water and People in the Humid Tropics: Past, present and future hydrological research for integrated land and water management.* Cambridge University Press, Cambridge, pp 561-589.
- Hamilton, L.S.** 2008. Forests and water. UNESCO, Roma. (FAO Forestry Paper 155).
- Hawtree, D., Nunes, J.P., Keizer, J.J., Jacinto, R., Santos, J., Rial-Rivas, M.E., Boulet, A.-K., Tavares-Wahren & Feger, K. H.** 2015. Time series analysis of the long-term hydrologic impacts of afforestation in the Águeda watershed of north-central Portugal. *Hydrology and Earth System Sciences* 19: 3033-3045.
- Hewlett, J.D. & Hibbert, A.R.** 1967. Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. *In: W.E. Sopper, & H.W. Lull (eds.). Symposium of Forest Hydrology.* Oxford: Pergamon. pp 275-290.
- Hoekstra, A.Y.** 2014. Sustainable, efficient, and equitable water use: the three pillars under wise freshwater allocation. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 1: 31-40.
- Hölscher, D., Mackensen, J. & Roberts, J.M.** 2005. Forest recovery in the humid tropics: changes in vegetation structure, nutrient pools and the hydrological cycle. *In: M. Bonell, L.A. Bruijnzeel (eds.). Forests, water and people in the humid tropics.* Cambridge University Press, Cambridge, pp. 598-621.
- Honda, E.A. & Durigan, G.** 2016. Woody encroachment and its consequences on hydrological processes in the savannah. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 371: 1703.

- Huxman, T., Wilcox, B.P., Breshears, D.D., Scott, R.L., Snyder, K.A., Small, E.E., Hultine, K., Pockman, W.T. & Jackson, R.B.** 2005. Ecohydrological implications of woody plant encroachment. *Ecology* 86: 308-319.
- IUCN - International Union for Conservation of Nature.** 2011. Bonn Challenge. Disponível em <http://www.bonnchallenge.org> (acesso em 6-VIII-2016).
- IUCN & WRI – International Union for Conservation of Nature & World Resources Institute.** 2014. A guide to the Restoration Opportunities Assessment Methodology (ROAM): Assessing forest landscape restoration opportunities at the national or sub-national level. Working Paper (Road-test edition). IUCN, Gland.
- Jackson, R.B., Canadell, J., Ehleringer, J.R., Mooney, H.A., Sala, O.E. & Schulze, E.D.** 1996. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia* 108: 389-411.
- Jackson, R.B., Carpenter, S.R., Dahm, C.N., McKnight, D.M., Naiman, R.J., Postel, S.L. & Running, S. W.** 2001. Water in a changing world. *Ecological Applications* 11: 1027-1045.
- Jackson, R.B., Jobbágy, E.G., Avissar, R., Roy, S.B., Barrett, D.J., Cook, C.W., Farley, K.A., Le Maitre, D.C., McCarl, B.A. & Murra, B.C.** 2005. Trading water for carbon with biological carbon sequestration. *Science* 310: 1944-1947.
- Krämer, I. & Hölscher, D.** 2009. Rainfall partitioning along a tree diversity gradient in a deciduous old-growth forest in Central Germany. *Ecohydrology* 2: 102-114.
- Laestadius, L., Maginnis, S., Minnemeyer, S., Potapov, P.V., Reynter, K. & Saint-Laurent C.** 2015. Sparing grasslands: map misinterpreted. *Science* 347: 1210-1211.
- Le Maitre, D.C., Gush, M.B. & Dzikiti, S.** 2015. Impacts of invading alien plant species on water flows at stand and catchment scales. *AoB Plants* plv 043.
- Le Maitre, D.C., Scott, D.F. & Colvin C.** 1999. Review of information on interactions between vegetation and groundwater. *Water SA* 25: 137-152.
- Leite, M.H.S., Couto, E.G., Amorim, R.S.S., Costa, E.L. & Maraschin, L.** 2009. Perdas de solo e nutrientes num Latossolo Vermelho-Amarelo ácrico típico, com diferentes sistemas de preparo e sob chuva natural. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 33: 689-699.
- Li, M.S.** 2006. Ecological restoration of mineland with particular reference to the metalliferous mine wasteland in China: a review of research and practice. *Science of the Total Environment* 357: 38-53.
- Lima, W.P.** 1993. *Impacto Ambiental do Eucalipto*. 2. EdUSP, São Paulo.
- Lima, W.P.** 2010. A silvicultura e a água: ciência, dogmas, desafios. *Cadernos do Diálogo* 1: 1-68.
- Lima, W.P. & Zákia, M.J.B. (org.).** 2010. *As Florestas Plantadas e a Água: Implementando o conceito da microbacia hidrográfica como unidade de planejamento*. RiMa Editora, São Carlos.
- Lima, W.D.P., Zakia, M.B., Libardi, P.L. & de Souza Filho, A.P.** 1990. Comparative evapotranspiration of *Eucalyptus*, Pine and natural “Cerrado” vegetation measure by the soil water balance method. *IPEF International* 1: 5-11.
- Makarieva, A.M., Gorshkov, V.G. & Li, B.L.** 2009. Precipitation on land versus distance from the ocean: evidence for a forest pump of atmospheric moisture. *Ecological complexity* 6: 302-307.
- Makarieva, A.M., Gorshkov, V.G., Sheil, D., Nobre, A.D., Bunyard, P. & Li, B.L.** 2014. Why does air passage over forest yield more rain? Examining the coupling between rainfall, pressure, and atmospheric moisture content. *Journal of Hydrometeorology* 15: 411-426.
- MEA - Millenium Ecosystem Assessment.** 2005. Ecosystems and human well-being: current state and trends - findings of the Condition and Trends Working Group. Island Press, Washington DC.
- Mekonnen MM, Hoekstra AY.** 2016. Four billion people facing severe water scarcity. *Science Advances* 2: e1500323.
- Montgomery, D.R., Schmidt, K.M., Greenberg, H.M. & Dietrich, W.E.** 2000. Forest clearing and regional landsliding. *Geology* 28: 311-314.
- Moreno-Calles, A.I. & Casas, A.** 2010. Agroforestry systems: restoration of semiarid zones in the Tehuacán Valley, Central Mexico. *Ecological Restoration* 28: 361-368.
- Mu, X., Zhang, L., McVicar, T.R., Chille, B. & Gau, P.** 2007. Analysis of the impact of conservation measures on stream flow regime in catchments of the Loess Plateau, China. *Hydrological Processes* 21: 2124-2134.
- Neary, D.G., Ice, G.G. & Jackson, C.R.** 2009. Linkages between forest soils and water quality and quantity. *Forest Ecology and Management* 258: 2269-2281.
- Nepstad, D.C., de Carvalho, C.R., Davidson, E.A. & Jipp, P.H.** 1994. The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures. *Nature* 372: 666-669.
- Nosetto, M.D., Jobbágy, E.G. & Paruelo, J.M.** 2005. Land-use change and water losses: the case of grassland afforestation across a soil textural gradient in central Argentina. *Global Change Biology* 11: 1101-1117.
- Oliveira, P.T.S., Leite, M.B., Mattos, T., Nearing, M.A. Scott, R.L., Xavier, R.O., Matos, D.M.S. & Wendland, E.** 2016. Groundwater recharge decrease with increased vegetation density in the Brazilian cerrado. *Ecohydrology*.
- Overbeck, G.E., Vélez-Martin, E., Scarano, F.R., Lewinsohn, T.M., Fonseca, C.R., Meyer, S.T., Müller, S.C., Ceotto, P., Dadalt, L., Durigan, G., Ganade, G., Gossner, M.M., Guadagnin, D.L., Lorenzen, K., Jacobi, C.M., Weisser, W.W. & Pillar, V.D.** 2015. Conservation in Brazil needs to include non-forest ecosystems. *Diversity and Distributions* 21: 1455-1460.



- Panachuki, E., Bertol, I., Alves Sobrinho, T., Oliveira, P.T.S.D. & Rodrigues, D.B.B.** 2011. Perdas de solo e de água e infiltração de água em Latossolo Vermelho sob sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 35: 1777-1786.
- Parr, C.L., Lehmann, C.E., Bond, W.J., Hoffmann, W.A. & Andersen, A.N.** 2014. Tropical grassy biomes: misunderstood, neglected, and under threat. *Trends in Ecology & Evolution* 29: 205-213.
- Pinheiro, A., Teixeira, L.P. & Kaufmann, V.** 2009. Capacidade de infiltração de água em solos sob diferentes usos e práticas de manejo agrícola. *Revista Ambiente e Água* 4: 188-199.
- Poff, N.L., Allan, J.D., Bain, M.B., Karr, J.R., Prestegard, K.L., Richter, B.D., Sparks, R.E. & Stromberg, J.C.** 1997. The natural flow regime. *BioScience* 47: 769-784.
- Poff, N.L., Allan, J.D., Palmer, M.A., Hart, D.D., Richter, B.D., Arthington, A.H., Rogers, K.H., Meyer, J.L. & Stanford, J.A.** 2003. River flows and water wars: emerging science for environmental decision making. *Frontiers in Ecology and the Environment* 1: 298-306.
- Postel, S.L., Daily, G.C., & Ehrlich, P.R.** 1996. Human appropriation of renewable fresh water. *Science* 271: 785-788.
- Postel, S.L.** 1998. Water for food production: Will there be enough in 2025? *BioScience* 48: 629-637.
- Postel, S.L.** 2000. Entering an era of water scarcity: the challenges ahead. *Ecological Applications* 10: 941-948.
- Ramos-Scharrón, C.E., & MacDonald, L.H.** 2007. Measurement and prediction of natural and anthropogenic sediment sources, St. John, US Virgin Islands. *Catena* 71: 250-266.
- Ramos-Scharrón, C.E. & LaFevor, M.C.** 2016. The role of unpaved roads as active source areas of precipitation excess in small watersheds drained by ephemeral streams in the Northeastern Caribbean. *Journal of Hydrology* 533: 168-179.
- Reichardt, K. & Timm, L.C.** 2012. Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações. 2 ed. Manole, São Paulo.
- Reubens, B., Poesen, J., Danjon, F., Geudens, G. & Muys, B.** 2007. The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: a review. *Trees* 21: 385-402.
- Rice, R.M., Crobett, E.S. & Bailey, R.G.** 1969. Soil slips related to vegetation, topography, and soil in southern California. *Water Resources Research* 5: 647-659.
- Rijsdijk, A., Bruijnzeel, L.S. & Sutoto, C.K.** 2007. Runoff and sediment yield from rural roads, trails and settlements in the upper Konto catchment, East Java, Indonesia. *Geomorphology* 87: 28-37.
- Ritchie, J.T.** 1972. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Research* 8: 1204-1213.
- Rocha, G.A.** 1997. O grande manancial do Cone Sul. *Estudos Avançados* 11: 191-212.
- Rockström, J., Gordon, L., Folke, C., Falkenmark, M. & Engwall, M.** 1999. Linkages among water vapor flows, food production, and terrestrial ecosystem services. *Conservation Ecology* 3.
- Royer, P.D., Breshears, D.D., Zou, C.B., Villegas, J.C., Cobb, N.S. & Kurc, S.A.** 2012. Density-dependent ecohydrological effects of piñon-juniper woody canopy cover on soil microclimate and potential soil evaporation. *Rangeland Ecology & Management* 65: 11-20.
- Salemi, L.F., Groppo, J.D., Trevisan, R., De Moraes, J.M., Lima, W.P. & Martinelli, L.A.** 2011. Aspectos hidrológicos da recuperação florestal de áreas de preservação permanente ao longo dos corpos de água. *Revista do Instituto Florestal* 23:69-80.
- Savenije, H.H.** 2004. The importance of interception and why we should delete the term evapotranspiration from our vocabulary. *Hydrological Processes* 18: 1507-1511.
- SER - Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group.** 2004. The SER International Primer on Ecological Restoration. Society for Ecological Restoration International, Tucson.
- Smethurst, P.J., Almeida, A.C. & Loos, R.A.** 2015. Stream flow unaffected by Eucalyptus plantation harvesting implicates water use by the native forest streamside reserve. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 3: 187-198.
- Steinacher, R., Medicus, G., Fellin, W. & Zangerl, C.** 2009. The influence of deforestation on slope (in-) stability. *Austrian Journal of Earth Sciences* 102: 90-99.
- Suding, K.N.** 2011. Toward an era of restoration in ecology: successes, failures, and opportunities ahead. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 42: 465-487.
- Sun, G. & Liu, Y.** 2013. Forest influences on climate and water resources at the landscape to regional scale. *In: B. Fu, & Jones (eds.). Landscape Ecology for Sustainable Environment and Culture.* Netherlands, Springer. pp. 309-334.
- Swank, W.T., Swift Jr, L.W. & Douglass, J.E.** 1988. Streamflow changes associated with forest cutting, species conversions, and natural disturbances. *In: W.T. Swank & D.A. Crossley Jr (eds.). Forest hydrology and ecology at Coweeta.* Springer, New York. pp. 297-312.
- Sweeney, B.W. & Newbold, J.D.** 2014. Streamside forest buffer width needed to protect stream water quality, habitat, and organisms: a literature review. *Journal of the American Water Resources Association* 50: 560-584.



- Tambosi, L.R., Vidal, M.M., Ferraz, S.F.D.B. & Metzger, J.P.** 2015. Funções eco-hidrológicas das florestas nativas e o Código Florestal. *Estudos Avançados* 29:151-162.
- Tarolli, P. & Sofia, G.** 2016. Human topographic signatures and derived geomorphic processes across landscapes. *Geomorphology* 255: 140-161.
- Thomaz, E.L., Vestena, L.R. & Ramos Scharrón, C.E.** 2014. The effects of unpaved roads on suspended sediment concentration at varying spatial scales—a case study from Southern Brazil. *Water and Environment Journal* 28: 547-555.
- Trenberth, K.E.** 1999. Atmospheric moisture recycling: Role of advection and local evaporation. *Journal of Climate* 12: 1368-1381.
- Tucci, C.E.** 2002. Impactos da variabilidade climática e uso do solo sobre os recursos hídricos. Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas-Câmara Temática de Recursos Hídricos, Brasília.
- Tucci, C.E. & Clarke, R.T.** 1997. Impacto das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: revisão. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 2: 135-152.
- Tucci, C.E., & Mendes, C.A.** 2006. Curso de Avaliação ambiental integrada de bacia hidrográfica. Ministério do Meio Ambiente/SQA. MMA/SQA, Brasília.
- Veldman, J.W., Overbeck, G.E., Negreiros, D., Mahy, G., Le Stradic, S., Fernandes, G.W., Durigan, G., Buisson, E., Putz, F.E. & Bond, W. J.** 2015. Where tree planting and forest expansion are bad for biodiversity and ecosystem services. *BioScience* biv118.
- Vertessy, R.A., Watson, F.G. & Sharon, K.O.** 2011. Factors determining relations between stand age and catchment water balance in mountain ash forests. *Forest Ecology and Management* 143: 13-26.
- Vörösmarty, C.J., Green, P., Salisbury, J. & Lammers, R.B.** 2000. Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. *Science* 289: 284-288.
- Wine, M.L., Hendrickx, J.M., Cadol, D., Zou, C.B. & Ochsner, T.E.** 2015. Deep drainage sensitivity to climate, edaphic factors, and woody encroachment, Oklahoma, USA. *Hydrological Processes* 29: 3779-3789.
- Wilcox, B.P., Owens, M.K., Dugas, W.A., Ueckert, D.N. & Hart, C.R.** 2006. Shrubs, streamflow, and the paradox of scale. *Hydrological Processes* 20: 3245-3259.
- Zhang, L., Dawes, W.R. & Walker, G.R.** 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research* 37: 701-708.
- Zou, C.B., Turton, D.J., Will, R.E., Engle, D.M. & Fuhlendorf, S.D.** 2014. Alteration of hydrological processes and streamflow with juniper (*Juniperus virginiana*) encroachment in a mesic grassland catchment. *Hydrological Processes* 28: 6173-6182.