

**EFEITOS DAS MUDANÇAS DA COBERTURA VEGETAL NO REGIME
HIDROLÓGICO DA BACIA: revisão de casos envolvendo a aplicação de bacias
experimentais**

Débora Missio Bayer¹ & Walter Collischonn²

RESUMO --- O gerenciamento dos recursos florestais tem sido muito discutido no Brasil no último ano. Isso se deve a proposta de alterações do código florestal brasileiro. O objetivo deste trabalho é apresentar os resultados de estudos realizados em todo o mundo, sobre os efeitos das mudanças da cobertura vegetal no regime hidrológico da bacia. Nesse contexto, são apresentados trabalhos que envolveram o estudo de bacias experimentais pareadas discutidos na literatura. Nos mais de 100 anos de pesquisas, há fortes evidências de que tratamentos envolvendo reflorestamento diminuem a quantidade de água disponível, enquanto que o desmatamento aumenta. Além disso, as pesquisas indicam que outros fatores como a diferença nas espécies das plantas, nas idades da vegetação, nos tipos de solo e de clima produzem efeitos diferentes sobre as águas. Sendo assim, o gerenciamento e o planejamento dos recursos florestais devem ser realizados de maneira integrada com a gestão dos recursos hídricos, além de considerar os demais fatores sociais, econômicos e ambientais envolvidos.

ABSTRACT --- The forest resources management has been widely discussed in Brazil. This is due to proposed changes to Brazilian Forest Code. The objective of this paper is to review results from worldwide studies of the effects of land cover changes on water yield. For this, we present the paired-watershed studies and hydrological aspects discussed in the literature. In over 100 years of research, there is strongly evidence that afforestation decreases the water yield, and that deforestation increases water yield. Furthermore, studies indicate that factors such as different species, ages of plants, soil and climate types, has different impacts in water yield. Thus, the forest management and planning should be jointly with the water resources management and consider social, economic and environmental interests.

Palavras-Chave – Recursos florestais, recursos hídricos, cobertura vegetal.

¹ Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. - Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Fone: (51)8209-9490, E-mail: deborabayer@gmail.com

² Professor adjunto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Instituto de Pesquisas Hidráulicas - Av. Bento Gonçalves, 9500, CP. 15029, 91501-970. Porto Alegre. RS. E-mail: collischonn@iph.ufrgs.br

1 - INTRODUÇÃO

As florestas e a maneira como são gerenciadas podem ter grandes efeitos sobre as águas. Quando bem gerenciadas, as florestas contribuem para proteger as águas e a variabilidade da flora e da fauna. No entanto, um mau planejamento pode provocar a escassez d'água, inundações, poluição das águas, assoreamento e lixiviação dos nutrientes do solo (Calder, 1993; Forest Research, 2011).

Os efeitos hidrológicos das mudanças no uso da terra podem seguir muitos caminhos e apresentar diferentes escalas espaciais e temporais. Os impactos mais perceptíveis são as alterações diretas e imediatas na qualidade e na quantidade do escoamento superficial na bacia hidrográfica. Tradicionalmente as preocupações têm se concentrado mais nesses efeitos, no entanto cada vez mais hidrólogos e gestores têm voltado suas atenções para os impactos secundários gerados (Calder 1993).

No Brasil, estimativas apontam que mais de 700.000 km² da floresta Amazônica tenham sido desmatadas e, como forma de reduzir as perdas adicionais e preservar os importantes recursos naturais e culturais dessa região, grandes unidades de conservação foram criadas pelo governo brasileiro (Trancoso et al, 2009). Essa estimativa de desmatamento desconsidera outros biomas brasileiros, também devastados, como o cerrado, a mata atlântica, o pantanal, a caatinga e o pampa.

Na busca por um melhor gerenciamento dos recursos florestais, em 1934 foi aprovado o primeiro Código Florestal Brasileiro por meio de um decreto federal (Decreto 23.793 de 1934). Desde então, diversos decretos-leis, leis e medidas provisórias envolvendo questões relacionadas às florestas foram criados. Em 1965 foi aprovado um novo texto para o Código Florestal (Lei 4.771 de 1965) que, devido às novas propostas de alterações, tem sido muito discutido no presente ano, tanto pela sociedade civil quanto pelo governo.

Para entender como a vegetação interfere no regime hidrológico de uma bacia hidrográfica, e assim promover um manejo adequado do solo e a conservação dos recursos hídricos, são necessários estudos que apontem como cada alteração da vegetação reflete na hidrologia da bacia. Para isso, pesquisadores de todo o mundo utilizaram ou utilizam uma importante ferramenta para o estudo de mudanças do uso da terra, o monitoramento de bacias hidrográficas experimentais. Nesse contexto, esse trabalho tem por objetivo apresentar alguns aspectos históricos que nortearam os estudos das relações entre a vegetação e o regime hidrológico da bacia. A ênfase do trabalho será dada a estudos que envolveram a aplicação de bacias hidrográficas experimentais.

2 - A VEGETAÇÃO E A ÁGUA

2.1 - Contradições do passado

Em 2004, Andréassian apresentou questões históricas sobre as relações entre a água e as florestas na França, conciliando argumentos dos cientistas do passado com a ciência hidrológica moderna. Segundo o autor, os debates acerca do assunto no passado dividiam-se em dois grupos com visões bem distintas: o partido dos florestais, que apresentavam uma visão mais romântica e mitológica, e o partido dos engenheiros, que acreditavam que as ideias românticas eram duvidosas e buscavam dados hidrométricos e meteorológicos para entender o problema.

Rauch, segundo Andréassian (2004), era um entusiástico líder do partido dos florestais. Em 1821, Rauch apresentou um conceito romântico para o papel das árvores no meio ambiente. Segundo o autor, “as árvores funcionariam como sifões entre as nuvens e a terra, em que suas copas atrairiam as águas longínquas da atmosfera, para derramá-las em uma urna protegida que alimenta as nascentes, os riachos, mantém os campos verdes, fertiliza as sementes que estão sob a terra e, com suas raízes passar, por reciprocidade, do interior da terra, os fluidos necessários às regiões superiores”.

A partir desse conceito, Rauch apresenta uma discussão sobre a relação entre a água e as plantas, como pode ser observado na seguinte passagem de seu trabalho: “A correlação entre as plantas e os hidrometeoros é demonstrada a nossos sentidos; físicos qualificados descobriram através de experiências tão engenhosas e interessantes, quanto as plantas absorvem, por sua própria atração, das ondas d’água vaporizadas que elas mesmas destilam sobre a terra: ele resulta, desses experimentos que, a massa de água que as florestas e todas as plantas aspiram é enorme e, como a natureza racional não faz nada em vão, ela faz a mesma quantidade de rios e de transpiração das plantas para formar o orvalho, névoa e nuvens novamente. [...] e o sol puxa invariavelmente a mesma massa de água para o ar [...], temos que pensar com horror que pode, destes mares tornarem-se suspensos quando as plantas diminuírem, [...] grandes florestas ainda existentes na África e América, que atraem, como as da Guiana, fluxos de água que fluem sobre as terras [...]. Uma parte dessas águas, anteriormente atribuído à terra para fertilizá-la, não é capaz de descer na ausência de milhões de sifões [...], agora segue o caminho dos que estavam eternamente destinados aos polos e as geleiras nas altas montanhas, para alimentar os tanques dos mares e rios.”

A visão romântica apresentada por Rauch era muito contestada pelo partido dos engenheiros. O engenheiro francês Alexandre Surell, em seu livro “*Etude sur les torrents des Hautes Alpes*”, com primeira versão publicada em 1841, discute, entre outros assuntos, a influência da topografia na distribuição das chuvas e, como a água proveniente da chuva é separada de três formas: (i) retorno da água por evaporação para a atmosfera; (ii) infiltração da água no solo, reaparecendo como nascentes ou formando os reservatórios profundos; (iii) escoamento superficiais, que alimentam os córregos e os rios (Surell, 1872). Apesar de recomendar o reflorestamento para controlar enxurradas, a relação direta entre as florestas e a água não é discutida por Surell (1872), porém o

mesmo apresenta conceitos importantes nessa relação, como de evaporação, de escoamento superficial e de infiltração. Nesse contexto, o autor diz que solos de regiões florestadas são capazes de armazenar mais água que solos sem a presença de vegetação, além de apresentar relações entre a velocidade de escoamento e a presença da vegetação.

Uma visão contraditória a cerca dos efeitos das florestas sobre os cursos d'água fica evidente nos discursos dos florestais e dos engenheiros, como pode ser visto em Andréassian (2004). De uma maneira geral, os cientistas do partido dos florestais acreditavam que o desmatamento provocava uma diminuição nos fluxos d'água e significativas alterações no clima. Os engenheiros, alguns mais cautelosos, questionavam a falta de dados que embasasse essas afirmações.

No contexto desses debates e da necessidade de obtenção de dados que pudessem responder, satisfatoriamente, as questões que envolvem a influência das florestas no ciclo da água surgem os estudos em pequenas bacias hidrográficas.

2.2 - Balanço hídrico

O balanço hídrico em uma bacia hidrográfica pode ser entendido como sendo a quantidade de água armazenada na bacia, em um determinado intervalo de tempo, obtida pela diferença entre a quantidade de água que entra, principalmente através da chuva, e a quantidade de água que sai, através do escoamento superficial, do escoamento subterrâneo, da evapotranspiração e da recarga dos aquíferos. Ou seja, a água não pode ser criada ou destruída, mas sim transferida de um local para outro (Zhang et al, 2007).

A vegetação possui alguns efeitos sobre os processos hidrológicos que compõem o balanço hídrico. Em relação à entrada de água na bacia, Calder (1998) sugere que associar as florestas ao aumento da precipitação seria um mito. Na maioria dos casos poderia ser considerado que as florestas possuem influência nula sobre a precipitação, pois seus efeitos tendem a ser relativamente pequenos. No entanto não podem ser totalmente rejeitados. De acordo com o autor, a teoria meteorológica sugere que exista uma pequena influência da vegetação alta, que provoca um ligeiro efeito orográfico resultando em um pequeno aumento nas chuvas.

Quando se trata das retiradas de água da bacia, a vegetação aparece como ator principal no processo de transpiração, mas possui influência significativa nos demais processos. O processo de transpiração consiste na vaporização da água líquida contida no tecido das plantas e sua remoção para a atmosfera. Água, juntamente com nutrientes, é conduzida pelas raízes e transportada pela planta. A sua vaporização ocorre nas folhas e é controlada pela abertura dos estômatos (Allen et al, 1998). De acordo com Allen et al (1998) quase toda a água conduzida pelas raízes é perdida por transpiração e somente uma fração mínima é usada pela planta.

O processo de transpiração depende de fatores climáticos, como radiação, temperatura do ar, umidade do ar e velocidade do vento, além de outras características que possuem influência direta na taxa de transpiração, como o conteúdo de água no solo e sua capacidade de conduzir água para as raízes das plantas, as características das plantas, os aspectos ambientais e as práticas de cultivo (Allen et al, 1998). De acordo com Tucci e Clarke (1996, 1997), as florestas absorvem uma maior radiação de onda curta e refletem menos, logo a retirada das florestas provocam um aumento do albedo, além de produzir maiores flutuações de temperatura e déficit de tensão de vapor das superfícies das áreas desmatadas.

Outro processo de retirada de água da bacia que é influenciado pelas características climáticas citadas anteriormente é a evaporação (Allen et al, 1998; Hewlett, 1982). Nesse a água líquida é convertida em vapor e transferida para a atmosfera, no entanto é um processo diferente da transpiração, pois não é controlado pelos estômatos e características fisiológicas. A evaporação ocorre em locais chamados de superfícies de evaporação, como lagos, rios, pavimentos, solos e vegetação úmida. Além dos fatores climáticos, quando a superfície de evaporação está na altura do solo, o grau de sombreamento das copas da vegetação e a quantidade de água disponível afetam a taxa de evaporação. Segundo Allen et al (1998), quando o solo está bem suprido de água, o processo de evaporação é determinado por condições meteorológicas, no entanto se o fornecimento for escasso e a habilidade do solo de conduzir umidade para a superfície é reduzida, a água contida na superfície do solo seca. Sendo assim, nessas condições, a disponibilidade limitada de água passa a controlar o processo de evaporação.

A influência da vegetação no processo de interceptação também é significativa, pois parte da água da chuva fica retida nas folhas, nos caules e nos troncos das árvores. Esses passam a funcionar como superfícies de evaporação, citadas anteriormente como vegetação úmida, fazendo a água retornar a atmosfera por evaporação. Os processos de evaporação e transpiração ocorrem simultaneamente e são difíceis de serem separados. Sendo assim, a união das perdas desses dois processos é chamada de evapotranspiração.

O fracionamento da evapotranspiração, segundo Allen et al (1998), em evaporação e transpiração depende da quantidade de radiação solar que atinge o solo. Essa quantidade diminui com o crescimento da vegetação. Quando a vegetação é pequena a água é predominantemente perdida por evaporação, mas quando a planta está grande e bem desenvolvida, cobrindo a superfície do solo, a perda passa a ser principalmente devido à transpiração, como pode ser visto na Figura 1. Essa diferença ocorre, não apenas em relação à idade da planta, mas também em relação a espécies com tamanhos diferentes, uma vez que em regiões florestadas a perda de água do solo por evaporação é menor, pois essa isola a superfície do solo da ação da radiação e do vento (Hewlett, 1982). Outro ponto importante a ser considerado no balanço hídrico é que a transpiração em

florestas é maior do que em vegetações menores em condições de seca, pois as suas raízes são mais profundas e, conseqüentemente tem um maior acesso à água que está no solo (Calder, 1998).

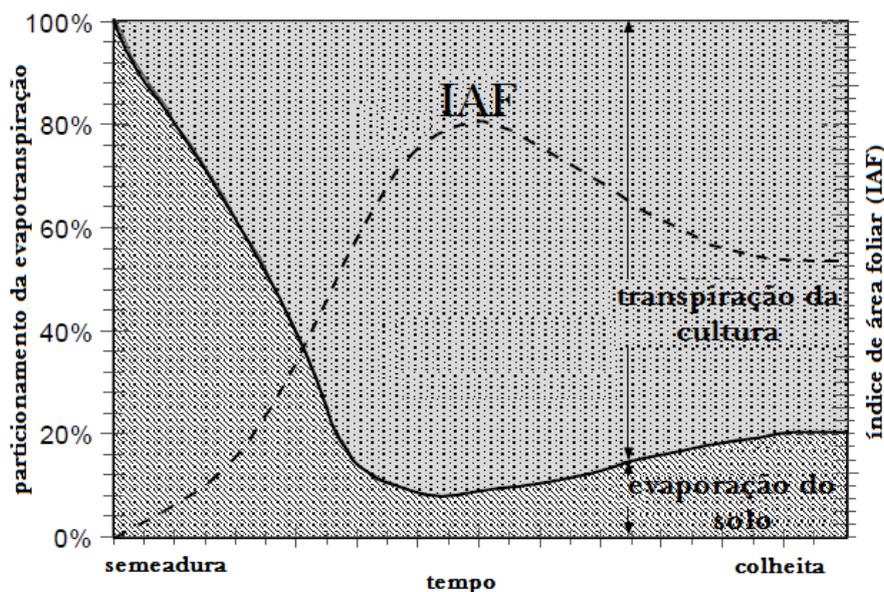


Figura 1. Particionamento da evapotranspiração em evaporação e transpiração no período do crescimento de uma cultura anual. Fonte: Allen et al (1998).

Hotta et al (2010) verificaram a influência do corte da vegetação, em bacias íngremes, na água subterrânea. Os autores perceberam que devido à redução na interceptação vegetal, após o corte da vegetação, ocorria um aumento na umidade do solo. Isso seria consequência de algumas mudanças nas propriedades físicas da superfície do solo, como a diminuição da condutividade hidráulica em fluxos laterais nessa camada superficial, que poderiam ocasionar aumentos no nível dos lençóis subterrâneos. Ruprecht et al (1991) mostraram que a supressão da vegetação promove um aumento no nível do lençol freático, relacionado a diminuição na interceptação e na sequente evaporação, considerado pelos autores, a principal causa do aumento de vazão. Os pesquisadores relatam ainda, que essas alterações promovem um novo equilíbrio para o sistema. Tucci e Clarke (1996, 1997) relatam que a remoção das florestas provoca uma menor variabilidade da umidade das camadas profundas do solo, uma vez que essas podem retirar umidade em profundidades superiores a 3,6 m, enquanto que vegetações rasteiras atingem apenas cerca de 20 cm.

Best et al (2003) apresenta uma discussão sobre as influências da vegetação em todos os processos envolvidos no balanço hídrico, com as seguintes constatações: (i) alterações de vegetação em uma escala local não provocam impactos sobre a precipitação, no entanto se as alterações forem em escala regional ou continental poderia haver modificações em relação a sua quantidade; (ii) a interceptação é maior em florestas do que em gramíneas ou pastagens, sendo assim o aumento de água em regiões desmatadas poderia estar relacionada a diminuição na interceptação; (iii) o fluxo rápido ou escoamento superficial é menos provável ser afetado pelas mudanças da vegetação que o

escoamento de base; (iv) alterações na quantidade de água como resultado da alteração da cobertura vegetal permanente, provavelmente, reflitam sobre o escoamento de base; (v) na maioria das condições climáticas, a evapotranspiração em florestas é maior que em gramíneas.

Reconhecer o equilíbrio do balanço hídrico ajuda a prever implicações do reflorestamento (Zhang et al, 2007) e do desmatamento nas bacias hidrográficas e fornece uma base para a tomada de decisão em relação a gestão de bacias hidrográficas.

2.3 - Bacias experimentais

Em 1928, Bates e Henry perceberam a necessidade de provas experimentais para as questões acerca das influências da vegetação sobre as águas. Para eles não era suficiente saber se há influência e sim saber como ela ocorre, em que época, em que condições de clima, de solo e de topografia e, também entender as variações entre diferentes tipos de florestas. Para responder a essas questões, os autores monitoraram durante 15 anos duas bacias hidrográficas nas proximidades de Wagon Wheel Gap, uma região montanhosa no estado do Colorado nos Estados Unidos da América (EUA). Para Hibbert (1969), Hewlett (1981) e Andréassian (2004) essa foi a primeira vez que a metodologia de bacias pareadas era utilizada.

A metodologia das bacias pareadas passou a ser muito empregada para estudar mudanças no uso da terra (Zimer et al, 1991; Best et al, 2003). Nesse método, duas bacias adjacentes com características semelhantes em termos de declividade, aspecto, solo, área e vegetação são monitoradas por um determinado período, chamado de calibração. Após o período de calibração, em uma das bacias é aplicado o tratamento, ou seja, ocorre uma alteração no uso da terra seguido por um novo período de monitoramento, para verificar se houve ou não alguma alteração relacionada ao tratamento aplicado (Figura 2). A existência de uma bacia controle permite que a variabilidade climática seja considerada na análise, sendo assim as alterações na quantidade de água podem ser atribuídas à mudança da vegetação. O estudo de bacias pareadas pode ser dividido em quatro tipos de tratamento: (i) arborização; (ii) rebrota; (iii) desmatamento e (iv) conversão de florestas (Best et al, 2003).

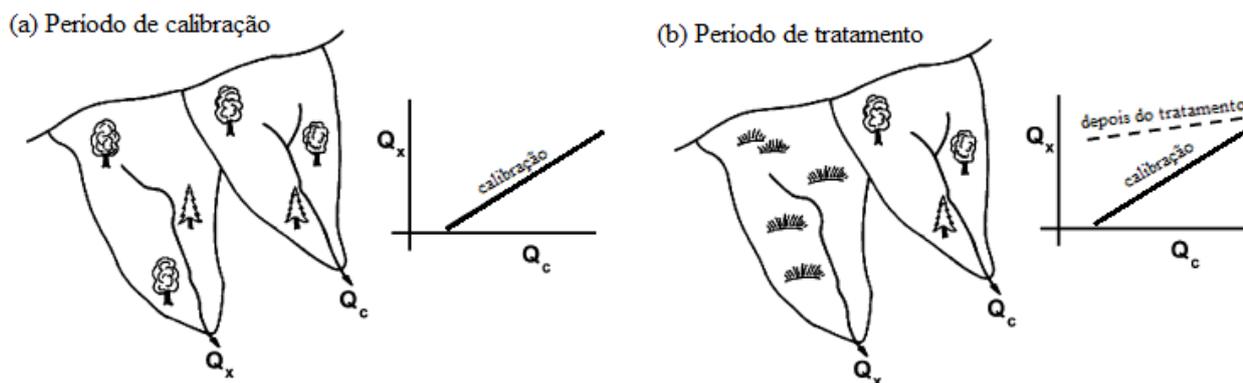


Figura 2- Esboço da metodologia das bacias pareadas. Fonte: Adaptado de Hewlett (1982).

Para determinar mudanças no volume total anual de água é utilizada a regressão linear simples. Para isso é obtida uma equação de regressão entre as duas bacias no período de calibração. Essa equação é utilizada para prever o volume de água que iria ocorrer na bacia tratada na ausência do tratamento. A diferença entre o valor previsto e o valor medido na bacia corresponde a alteração na quantidade total de água. A análise sazonal das mudanças no volume d'água também é possível em bacias pareadas através do uso de dados mensais, porém, segundo Best et al (2003), isso é menos comum.

2.4 - Revisão da literatura

Na década de 1930, com a implantação de estudos em bacias hidrográficas em locais como a Floresta Experimental San Dimas (*San Dimas Experimental Forest*) na Califórnia, EUA (Dunn et al, 1988) e pelo Laboratório Hidrológico de Coweeta (*Coweeta Hydrologic Laboratory*) na Carolina do Norte, EUA (Swank e Crosseley, 1988) ocorreu uma expansão das pesquisas relacionadas a gestão de bacias hidrográficas.

Em 1967, Hibbert fez uma revisão abrangendo resultados de estudos realizados pelo mundo sobre os efeitos da alteração da cobertura da terra sobre as águas. Para isso, o autor reuniu trabalhos desenvolvidos em trinta e nove bacias e buscou discuti-los de modo coletivo. Dessa maneira, Hibbert explicita três generalizações: (i) reduções nas florestas aumentam a quantidade de água; (ii) substituir uma área de vegetação escassa por uma cobertura florestal provoca uma diminuição na quantidade de água; (iii) as respostas ao tratamento são altamente variáveis e, na maioria, imprevisíveis.

Na análise coletiva dos dados, Hibbert (1967) verificou baixa correlação entre o aumento d'água e a porcentagem de redução florestal, mas associou grandes aumentos a altas precipitações e pequenos aumentos a baixas precipitações. Além disso, o autor constatou que esse aumento ocorre logo após o tratamento de desmatamento, ou seja, nos primeiros 12 meses. O aumento é seguido por

uma taxa de declínio, atribuído a rebrota da vegetação. Isso fica mais claro ao analisar os gráficos apresentados por Hibbert (1967) para duas bacias hidrográficas, ambas monitoradas pelo Laboratório Hidrológico de Coweeta, que podem ser vistos na Figura 3.

De acordo com Hewlett et al (1969) a principal contribuição prática das bacias experimentais para a hidrologia é a medida de suas respostas ao tratamento vegetal em relação as águas e ao tempo. Sendo assim, ao longo dos anos, muitas outras bacias experimentais foram monitoradas. Em 1982, Bosch e Hewlett apresentaram um estudo que incorporou cinquenta e cinco novas bacias experimentais as já apresentadas por Hibbert (1967). O resultado obtido pelos autores pode ser visto na Figura 4, em que foram realizados ajustes pelo método dos mínimos quadrados para diferentes tipos de vegetação, com coeficientes de correlação na ordem de 0,650 para as coníferas, 0,506 para as lenhosas decíduas e 0,340 para a capoeira.

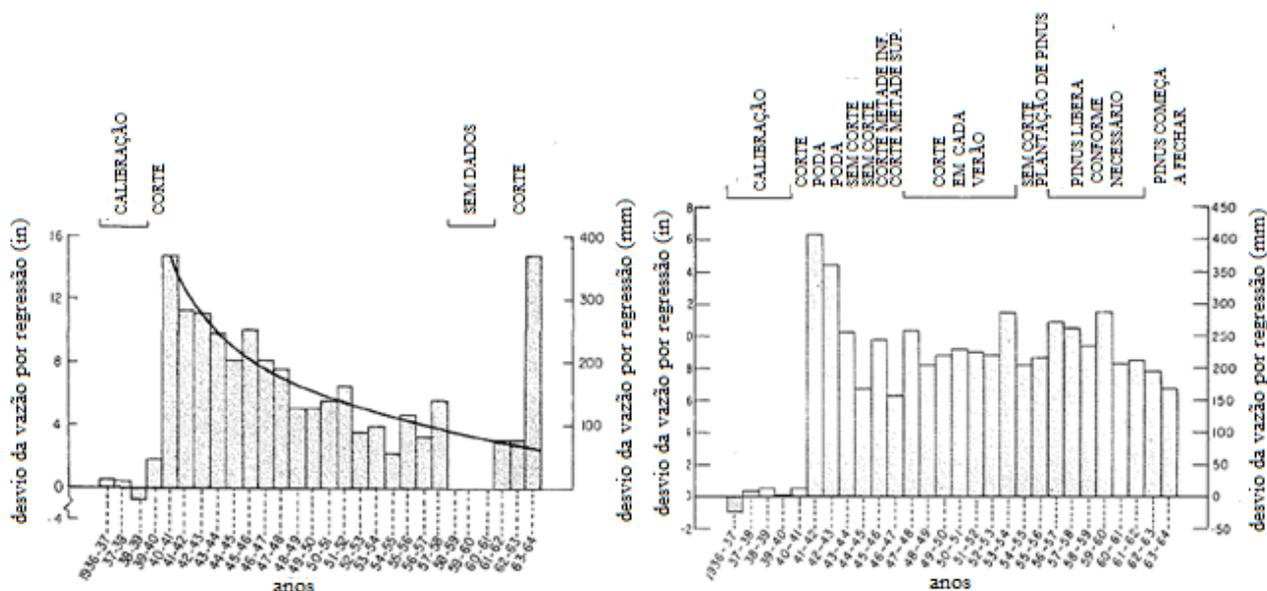


Figura 3 - Análise de regressão da vazão anual para duas das bacias estudadas pelo Laboratório Hidrológico de Coweeta. Fonte: Adaptado de Hibbert (1967).

Segundo Bosch e Hewlett (1982), a adição das novas bacias experimentais pouco alterou os resultados obtidos anteriormente por Hibbert. No entanto, eles verificaram que a interferência da vegetação sobre as águas era alterada em função das características das plantas, ou seja, ocorre um decréscimo da influência na seguinte ordem: florestas coníferas, vegetação lenhosa decídua, capoeiras e pastagens. A magnitude da interferência de florestas de coníferas e de eucaliptos, para uma alteração em 10% na cobertura florestal, era de aproximadamente 40 mm no total anual de águas, enquanto que para vegetação lenhosa decídua era de aproximadamente 25 mm e para capoeiras ou pastagens era de aproximadamente 10 mm. Alterações na água proveniente de reduções inferiores a 20% em florestas, de acordo com Bosch e Hewlett (1982), são difíceis de serem percebidas utilizando métodos hidrométricos.

Em 1985, Troendle e King analisaram os efeitos do corte de parte da vegetação na floresta experimental de Fraser, Colorado, EUA. O estudo abrangeu um período de até 30 anos após a supressão da vegetação. Os autores verificaram que devido ao aumento na deposição de neve (área mais exposta) ocorria um aumento equivalente na vazão de pico da bacia e, com os dados climáticos obtidos, verificaram uma forte correlação entre o aumento da vazão e o período de derretimento da neve. Sendo assim, os pesquisadores atribuíram a variabilidade anual do incremento da vazão à precipitação e não mais ao tempo e rebrota da vegetação.

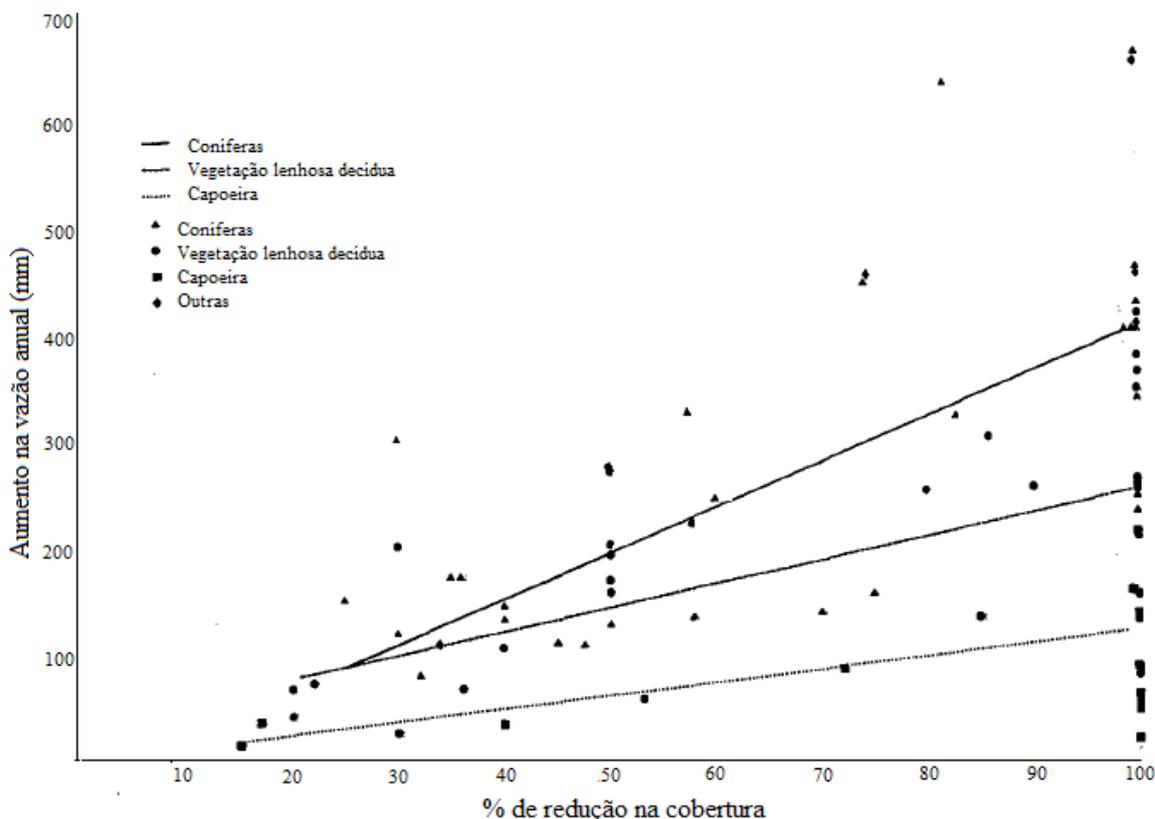


Figura 4 – Aumento na vazão anual em função das mudanças na cobertura da terra. Fonte: Adaptado de Bosch e Hewlett (1982).

Além da análise do escoamento superficial, Bell et al (1990) e Ruprecht et al (1991) avaliaram as alterações no nível do lençol freático em função de mudanças no uso da terra, utilizando bacias pareadas em pequenas bacias no sudoeste da Austrália. Bell et al (1990) estudaram a resposta da bacia ao reflorestamento em região agrícolas. Alterações significativas de redução nos níveis do lençol freático só foram sentidas em regiões com grandes áreas reflorestadas, superior a 15%. Ruprecht et al (1991) avaliaram a resposta hidrológica da bacia em relação a supressão de 75% de uma floresta de eucalipto. Os pesquisadores verificaram que nos 3 anos seguinte ao corte ocorreu um aumento significativo da vazão (de 6% para 20% da precipitação média anual de longo período) e que a vazão de base no inverno aumentou quatro vezes, sendo esse o principal motivo do aumento da vazão do rio no período de julho a agosto. Além disso, os autores constataram que o rio

passou da condição de efêmero para perene. De acordo com Ruprecht et al (1991), o aumento no nível do lençol freático promoveu um novo equilíbrio para o sistema e que isso pode indicar que a vazão do rio não sofreria mais alterações.

Nas proximidades do lago Chiemsee, nos alpes alemães no sul da Baviera, quatro bacias foram monitoradas para entender os efeitos do seu uso na agricultura e no reflorestamento (Robinson et al, 1991). Nesse trabalho, os autores constataram que a drenagem agrícola promovia um aumento na vazão e uma redução na perda por evapotranspiração, além das vazões de pico e das vazões baixas estarem maiores. No entanto, esses efeitos foram compensados pelos provocados pela prática da silvicultura, ou seja, pelo reflorestamento. Essa prática promoveu um aumento de 480 mm por ano na evapotranspiração; uma redução na ordem de 40% na vazão média anual; uma redução relativa maior nas vazões baixas, com uma redução de cerca de 60% na Q_{70} ; uma atenuação nas vazões de pico, principalmente em pequenos eventos; além disso, uma redução nos níveis de água no solo e, por analogia, na recarga dos aquíferos (Robinson et al, 1991).

Uma nova revisão sobre trabalhos envolvendo bacias hidrográficas pareadas foi feita por Stednick (1996), que considerou 95 bacias localizadas nos EUA. O autor percebeu uma variabilidade nos resultados, que atribuiu como consequência do local onde foi realizada a alteração da vegetação nas bacias, ao tipo de corte efetuado, ao tipo de vegetação ou a erros de medições. Como a metodologia das bacias pareadas está intimamente relacionada a uma análise de regressão, Stednick evidencia a necessidade de separar os estudos em regiões hidrológicas, ou seja, por padrões de precipitação e de regimes de vazões, pois a adição de novos trabalhos não teria melhorado o modelo global de análise. Devido a essas variabilidades temporais, Stednick sugere que a análise do ecossistema bacia deve ser, necessariamente, realizada a longo prazo.

Um estudo sobre os efeitos da prática de silvicultura nas vazões baixas foi realizado por Johnson (1998). Nesse trabalho, o autor evidencia que os efeitos sobre as vazões baixas são sistematicamente dependentes da fase do ciclo florestal, com aumentos resultantes da drenagem e do corte da floresta e uma diminuição que acompanha o crescimento da floresta. Para Johnson, esses efeitos são mais sentidos quando ocorre mudanças no uso da terra em mais de 25% da bacia, mas que em períodos secos isso não ocorre, pois as vazões são sustentadas pelo fluxo subterrâneo.

Beschta et al (2000) verificaram aumento nas vazões de pico, sendo que essas eram função de sua magnitude e do seu tempo de retorno, sendo que, para eventos de pico com recorrência de 1 ano os aumentos foram de 13 a 16%, enquanto que para os de 5 anos os aumentos foram de 6 a 9%.

Em relação ao tratamento de reflorestamento, de acordo com Zhang et al (2007), algumas generalizações podem ser feitas, como: (i) em relação ao escoamento superficial - o escoamento médio anual irá diminuir com a substituição de gramíneas por florestas, essa redução depende das características das plantas e é proporcional a área arborizada (em pequenas bacias, áreas menos que

20% não produzem alterações); (ii) em relação aos aquíferos - a recarga de aquíferos é menor em áreas de florestas do que em áreas com pastagens ou gramíneas; (iii) em relação ao escoamento subterrâneo - a taxa de resposta do escoamento subterrâneo é menor que do escoamento superficial, sendo que a resposta da descarga estará décadas atrás da redução na recarga; (iv) o maior impacto sobre o escoamento superficial absoluto ocorre em regiões com alta pluviometria, no entanto a maior redução proporcional ocorre em regiões com baixa pluviometria ou em períodos de baixa vazão; (v) o número de dias sem ou com baixa vazão aumenta com o reflorestamento; (vi) os efeitos das reduções no escoamento diferem dos 5 primeiros anos, em que as reduções são menores, para o intervalo de 10 a 20 anos, em que essas reduções são mais significativas, além disso, depois dos 30 anos a taxa de crescimento da vegetação diminui e ocorre um ligeiro aumento na quantidade de água; (vii) supressões de parte da floresta provocam um aumento na quantidade de água.

As generalizações apontadas por Zhang et al (2007) para o reflorestamento permite uma visão geral dos efeitos das florestas na bacia hidrográfica, no entanto devem ser consideradas algumas particularidades em relação as florestas nativas e as florestas exóticas. Little et al (2009) estudaram as alterações no escoamento superficial quando a mata nativa decídua era substituída por uma vegetação exótica. Esse estudo foi realizado em duas bacias hidrográficas no Chile, ambas com área superior a 250 km². Os autores verificaram uma redução do escoamento superficial em resposta ao aumento das florestas exóticas em detrimento das nativas.

Ainda em 2009, Locatelli e Vignolia realizaram uma meta-análise em vinte estudos de bacias hidrográficas tropicais com vegetação nativa, com reflorestamento e não florestadas, sendo que nove desses estudos foram desenvolvidos na Ásia, oito na África e três na América Latina. As variáveis analisadas foram vazão total anual, chuva efetiva e escoamento de base. Os autores concluíram, através da análise, que ocorre uma redução da vazão total ou da vazão de base em áreas reflorestadas ou de mata nativa em relação a regiões não florestadas. Os estudos ficaram restritos a regiões de clima úmido, com reflorestamento apenas com espécies exóticas de eucalipto e de pinus e com florestas de várzea naturais.

Em países como a Grécia onde ocorrem grandes períodos com baixa pluviometria, Ganatsios et al (2010) sugerem que alguns tratamentos como podas e cortes na vegetação reduziriam a interceptação e aumentariam a quantidade de água disponível. Com experimentos práticos os autores obtiveram aumentos de 13,2 mm, na bacia em que foram realizadas podas na vegetação, e 42,8 mm, para o corte raso das árvores. Sendo assim, os mesmos recomendam práticas de silviculturismo para aumentar a disponibilidade de água, no entanto que as mesmas sejam feitas com a análise de todos os demais impactos relativos à atividade.

No Brasil, de acordo com Lima (2010), até a algum tempo atrás não havia resultados obtidos em bacias experimentais, sendo necessário o uso dos resultados obtidos em outros países e,

consequentemente, em outras condições. No entanto, nos últimos anos o Programa de Monitoramento Ambiental em Microbacias (PROMAB), do IPEF (Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais), em parceria com empresas florestais brasileiras tem acumulado dados de balanço hídrico de bacias experimentais (Lima, 2010). Para Lima (2010), a análise global desses resultados acumulados no Brasil assemelha-se a dos resultados da literatura mundial.

Para Zimer et al (1991) algumas questões envolvendo o uso da terra não podem ser resolvidos experimentalmente, como por exemplo, as consequências a longo prazo da cultura intensiva de florestas, que levaria algumas centenas de anos para ser respondida. Para isso faz-se necessário e adequado o uso da modelagem hidrológica. O uso da modelagem hidrológica imitando a metodologia das bacias pareadas, segundo Andréassian (2004) é necessário para viabilizar o estudo de grandes bacias hidrográficas, uma vez que a metodologia das bacias pareadas é restrita a pequenas áreas. A aplicação de modelos no estudo de alterações no uso da terra e nas mudanças climáticas pode ser encontrada em diversos trabalhos (Farley et al, 2005; Trancoso et al, 2009; Chu et al, 2010; Delgado et al, 2010; Stehr et al, 2010; Zhang e Hiscock, 2011; Biemelt et al, 2010; Murray et al, 2011; Notelbaert et al, 2011).

3 - CONCLUSÃO

As questões que envolvem alterações da vegetação devem ser analisadas com muita cautela. Para Zhang et al (2007) a melhor maneira de tomar decisões em relação ao planejamento e gestão das bacias é a compreensão dos processos envolvidos no balanço hídrico e a capacidade de prever com confiabilidade os prováveis resultados das alterações e suas consequências.

De uma maneira geral, os estudos envolvendo bacias experimentais, muitos apresentados neste trabalho, tinham por objetivo investigar situações como: aumentar a produção de água; diminuir as inundações; proteger as bacias hidrográficas de erosões; reabilitar áreas atingidas por incêndios, por mineração, por pastoreio ou por descasos; além de pesquisas dedicadas a entender os processos hidrológicos e as relações entre solo, água e plantas (Hornbeck e Swank, 1992).

Pelos estudos apresentados, pode-se perceber que o desmatamento, ou seja, reduções de áreas florestais produzem um aumento nas vazões baixas, nas vazões de cheia e de seu pico, assim como nas vazões subterrâneas. No entanto esse aumento é mais sentido na vazão total anual da bacia. O oposto ocorre em situações de reflorestamento, em que ocorrem reduções das vazões, principalmente por haver uma maior perda por evapotranspiração.

As alterações no regime hidrológico são variáveis em magnitude e em duração, pois não dependem apenas do tipo de tratamento que as bacias foram submetidas, mas também de suas condições climáticas e pedológicas (Andréassian, 2004), das condições topográficas, das mudanças

espaciais, do estágio de crescimento da vegetação (Hotta et al, 2010), do tipo de solo e de vegetação, da escala da bacia e das alterações, da substituição ou não de coberturas permanentes, entre outros fatores que alteram os processos envolvidos no balanço hídrico e, conseqüentemente, a vazão na bacia.

Os resultados apresentados são conclusivos em relação à consequência que cada tipo de alteração da vegetação provoca, ou seja, desmatamento produz um aumento da vazão enquanto o reflorestamento uma diminuição. No entanto, mais estudos são necessários para elucidar as variabilidades encontradas em função da magnitude das mudanças e obter relações com as demais variáveis envolvidas.

O conhecimento e o entendimento de como as mudanças na vegetação afetam a bacia devem e podem ajudar na gestão dos recursos florestais, vislumbrando as necessidades atuais e futuras em relação à quantidade e a qualidade das águas. Sendo assim, a gestão dos recursos florestais deve ser realizada de modo integrado a gestão dos recursos hídricos e deve considerar os fatores sociais, econômicos e ambientais envolvidos.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa concedida.

BIBLIOGRAFIA

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. (1998). *“Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements”*. FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. 300p.

ANDRÉASSIAN, V. (2004). *“Water and forests: from historical controversy to scientific debate.”* Journal of Hydrology. v.291. pp. 1-27.

ARNOLD, J.G.; SRINIVASAN, R.S.; MUTTIAH, R.S.; WILLIAMS, J.R. (1998). *“Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development”*. Journal of the American Water Resources Association. v.34, n.1, pp. 73-89.

BATES, C.G.; HENRY, A.J. (1928). *“Forest and stream-flow experiment at Wagon Wheel Gap, Colorado.”* U. S. Weather Bureau, Monthly Weather Review. Sup. n° 30. Relatório Final. 79 p.

BESCHTA, R.L.; PYLES, M.R.; SKAUGSET, A.E.; SURFLEET C.G. (2000). *“Peakflow responses to forest practices in the western cascades of Oregon, USA”*. Journal of Hydrology. v.233. pp.102-120.

BELL, R.W.; SCHOFIELD, N.J.; LOH, I.O.; BARI, M.A. (1990) *“Groundwater response to reforestation in the darling range of western Australia”*. Journal of Hydrology. v.119. pp. 179-200.

- BEST, A. ZHANG, L, McMAHON, T; WESTERN, A.; VERTESSY, R. (2003) “A critical review of paired catchment studies with reference to seasonal flows and climatic variability”. Ed. Murray-Darling Basin Commission. 56p.
- BIEMELT, D. ;SCHAPP, A.;GRÜNEWALD, U. (2011). “Hydrological observation and modelling relationship for the determination of water budget in Lusatian post-mining landscape”. Physics and Chemistry of the Earth.v. 36. pp. 3–18.
- BOSCH, J.M.; HEWLETT, J.D. (1982). “A review of catchment experiment to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration.” Journal of Hydrology. v.55. pp. 3-23.
- BRASIL. Decreto nº 23.793, de 23 de janeiro de 1934. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Poder Executivo, Brasília, DF, 21 maç. 1935.
- BRASIL. Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Poder Executivo, Brasília, DF, 16 set. 1965.
- CALDER, I.R. (1993). “Hydrologic effects of land-use change”. In. D.R. Maidment (Editor) Handbook of Hydrology. McGraw-Hill, New York, Cap. 13. 50 p.
- CALDER, I.R. (1998). “Water-resource and land-use issues.” SWIM Paper 3. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute. 33p.
- CHU, H.J.; LIN, Y.P.; HUANG, C.W.; HSU, C.Y.; CHEN, H.Y. (2010). “Modelling the hydrologic effects of dynamic land-use change using a distributed hydrologic model and a spatial land-use allocation model”. Hydrological Processes. v.24. pp. 2538–2554.
- DELGADO, J.; LLORENS, P.; NORD, G.; CALDER, I.R.; GALLART, F. (2010) “Modelling the hydrological response of a Mediterranean medium-sized headwater basin subject to land cover change: The Cardener River basin (NE Spain)”. Journal of Hydrology. v. 383. pp.125–134.
- DUNN, P.H.; BARRO, S.C.; WELLS II, W.G.; POTH, M.A.; WOHLGEMUNTH, P.M.; COLVER, C.G. (1988). “The San Dimas Experimental Forest: 50 years of research”. USDA Forest Service General Technical Report PSW-104. 54 p.
- FARLEY, K.A.; JOBBA, E.G.; G.Y.; JACKSON, R.B. (2005). “Effects of afforestation on water yield: a global synthesis with implications for policy” Global Change Biology. v.11, pp. 1565–1576.
- FOREST RESEARCH. (2011). “Forest hydrology”. Disponível em: <<http://www.forestresearch.gov.uk/>>. Acesso em: Maio de 2011.
- GANATSIOSA, H.P.; TSIORASB, P.A.; PAVLIDIS, T. (2010). “Water yield changes as a result of silvicultural treatments in an oak ecosystem”. Forest Ecology and Management. v. 260. pp. 1367–1374.
- HARMEL, R.D.; SMITH, P.K. (2007). “Consideration of measurement uncertainty in the evaluation of goodness-of-fit in hydrologic and water quality modeling”. Journal of Hydrology. v. 337. pp. 326–336.

- HEWLETT, J.D. (1982). *“Principles of forest hydrology”*. The University of Georgia Press. 183 p.
- HEWLETT, J.D.; LULL, H.W.; REINHART, K.G. (1969). *“In defense of experimental watershed”*. Water Resources Research. v.5, n.1, pp. 306-316.
- HIBBERT, A.R. (1967). *“Forest treatment effects on water yield”*. W.E. Sopper and H.W. Lull (editors), Int. Symp. For. Hydrol., Pergamon, Oxford, 813p.
- HORNBECK, J.W.; SWANK, W.T. (1992). *“Watershed ecosystem analysis as a basis for multiple-use management of eastern forests”*. Ecological Applications, v.2, n.3, pp. 238-247.
- HOTTA, N.; TANAKA, N.; SAWANO, S.; KURAJI, K.; SHIRAKI, K.; SUZUKI, M. (2010). *“Changes in groundwater level dynamics after low-impact forest harvesting in steep, small watersheds”* Journal of Hydrology. v. 385. pp. 120–131.
- JOHNSON, R. (1998) *“The forest cycle and low river flows: a review of UK and international studies”*. Forest Ecology and Management. v. 109. pp.1-7.
- LIMA, W. P. (2010). *“A silvicultura e a água : ciencia, dogmas, desafios”*. Prochnow, M. (coord.). Rio de Janeiro : Instituto BioAtlantica. v.01. 64 p.
- LIN, Y.P.; WU, P.J.; HONG, N.M.. (2008). *“The effects of changing the resolution of land-use modeling on simulations of land-use patterns and hydrology for a watershed land-use planning assessment in Wu-Tu, Taiwan”*. Landscape and Urban Planning. v.87. pp. 54–66.
- LITTLE, C.; LARA, A.; MCPHEE, J.; URRUTIA, R. (2009). *“Revealing the impact of forest exotic plantations on water yield in large scale watersheds in South-Central Chile”*. Journal of Hydrology. v. 374. pp.162–170.
- LOCATELLI, B.; VIGNOLA, R. (2009). *“Managing watershed services of tropical forests and plantations: Can meta-analyses help?”* Forest Ecology and Management. v. 258. pp, 1864–1870.
- MURRAY, S. J.; FOSTER, P. N.; PRENTICE, I. C. (2011). *“Evaluation of global continental hydrology as simulated by the Land-surface Processes and eXchanges Dynamic Global Vegetation Model”*. Hydrology Earth System Science. v. 15. pp.91–105.
- NOTEBAERT, B.; VERSTRAETEN, G.; WARD, P.; RENSSSEN, H.; ROMPAEY, A.V. (2011) *“Modeling the sensitivity of sediment and water runoff dynamics to Holocene climate and land use changes at the catchment scale”*. Geomorphology. v. 126. pp. 18–31.
- PRADO, T.B.G. (2006). *“Evolução do uso das terras e produção de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Jundiá-Mirim”*. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical e Subtropical do Instituto Agronômico, Campinas. 72 p.
- RAUCH, F.A. (1821). *“Annales Européenes et de Fructification Générale”*, Paris.
- ROBINSON, M.; GANNON, B.; SCHUCH, M. (1991). *“A comparison of the hydrology of moorland under natural conditions, agricultural use and forestry”*. Hydrological Sciences Journal, v.36, n.6, pp. 565-577.

- RUPRECHT, J.K.; SCHOFIELD, N.J.; CROMBIE, D.S.; VERTESSY, R.A.; STONEMAN, G.L.(1991). "Early hydrological response to intense forest thinning in southwestern Australia". Journal of Hydrology. v.127. pp. 261-277.
- SEDNICK, J.D. (1996). "Monitoring the effects of timber harvest on annual water yield". Journal of Hydrology. v.176. pp.79-95.
- STEHR, A.; AGUAYO, M.; LINK, O.; PARRA, O.; ROMERO, F.; ALCAYAGA, H. (2010). "Modelling the hydrologic response of a mesoscale Andean watershed to changes in land use patterns for environmental planning". Hydrology and Earth System Sciences. v.14. pp. 1963-1977.
- SURELL, A. (1872). "Etude sur les torrents des Hautes-Alpes". Ed. Dunod. Décima edição. v.2. Paris. 386 p.
- SWANK, W. T.; CROSSLEY JR., D. A. (1988). "Forest hydrology and ecology at Coweeta". Springer-Verlag, New York, New York, USA.
- TRANCOSO, R. ET AL. (2009) "Deforestation and conservation in major watersheds of the Brazilian Amazon". Environmental Conservation. v. 36. n.4. pp. 277-288.
- TROENDLE, C.A.; KING, R.M. (1985). "The effect of timber harvest on the fool creek watershed, 30 yiers later". Water Resources Research. v.21, n.12, pp. 1915-1922.
- TUCCI, E.M.; CLARKE, R.T. (1996). "Impacto das mudanças ambientais nas vazões dos rios: bacia incremental de Itaipu". Relatório Técnico. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. UFRGS.
- TUCCI, E.M.; CLARKE, R.T. (1997). "Impacto das mudanças ambientais nas vazões dos rios: revisão". Revista Brasileira de Recursos Hídricos. v.2. n.1. pp. 135-152.
- ZHANG, H.; HISCOCK, K.M. (2010). "Modelling the impact of forest cover on groundwater resources: A case study of the Sherwood Sandstone aquifer in the East Midlands, UK" Journal of Hydrology. v. 392. pp. 136–149.
- ZHANG, L.; VERTESSY, R.; WALKER, G.; GILFEDDER, M.; HAIRSINE, P. (2007) "Afforestation in a catchment context: understanding the impacts on water yield and salinity". Industry report 1/07, eWater CRC, Melbourne, Australia.