	Geo.br 1 (2005) Luiz de A. P. Bacellar 1-39	ISSN1519-5708 http//:www.degeo.ufop.br/geobr

O papel das florestas no regime hidrológico de bacias hidrográficas

Luiz de A. P. Bacellar

Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto

Campus Morro do Cruzeiro S/N, Cep:35400-000, Ouro Preto, Minas Gerais,Brasil
e-mail: bacellar@degeo.ufop.br

Resumo

A preservação das florestas é fundamental para um adequado e equilibrado funcionamento dos ecossistemas e para a manutenção da diversidade biológica. As florestas também exercem funções significativas no controle da erosão, da desertificação, da qualidade da água e do seqüestro do carbono atmosférico, além de constituírem espaço para desenvolvimento de atividades sociais, ambientais e econômicas. Por outro lado, ainda pairam muitas dúvidas quanto ao papel das florestas na produção de água para os rios em quantidade e qualidade. Tradicionalmente, a floresta é vista como eficaz para estabilizar e manter as vazões nos rios, sendo este um dos motivos pelo quais a revegetação é prática repetidamente recomendada na recuperação de bacias hidrográficas. Contudo, algumas das funções hidrológicas normalmente atribuídas às florestas, como o de aumentar a disponibilidade de água nos rios, são questionáveis e desprovidas do devido embasamento técnico-científico. Nesta linha, há na literatura especializada um grande acervo de dados, resultantes de monitoramento sistemático de bacias hidrográficas por todo o mundo, utilizando-se três metodologias, com destaque para a das "bacias pareadas". Estes dados mostram que as vazões anuais e o fluxo de base decrescem com o reflorestamento e crescem com o desmatamento. Este comportamento advém do fato da vegetação de maior porte possuir maior capacidade de evapotranspiração que as de menor porte, como as gramíneas, arbustos e grande parte das culturas agrícolas. Assim, apesar das florestas favorecerem a infiltração, parte considerável da

água infiltrada retornará a atmosfera via transpiração, aproveitando-se de seu sistema radicular mais desenvolvido. Os fluxos de chuva e os picos de cheia tendem a aumentar com o desmatamento, sobretudo quando este é feito sem critérios técnicos, resultando na compactação do solo. As enchentes maiores exibem boa correlação com os eventos chuvosos mais intensos, com longo intervalo de recorrência. As florestas tendem a melhorar a qualidade da água, ao reduzir o volume de sedimentos disponíveis por erosão e movimentos de massa. Também atuam favoravelmente para controlar a disponibilidade de alguns elementos químicos, como o nitrato. Os estudos com bacias pareadas constituem uma excelente ferramenta de análise dos impactos do uso e ocupação no regime hidrológico de bacias, apesar dos questionamentos quanto à validade da extrapolação dos dados para bacias maiores ou sob distintas condições ambientais, especialmente em áreas tropicais. Infelizmente, o Brasil ainda é relativamente carente deste tipo de estudos, fundamentais para a recuperação de bacias degradadas e para um gerenciamento mais eficaz dos recursos hídricos.

Palavras Chave: hidrologia florestal; bacias hidrográficas; evapotranspiração; manejo de bacias; bacias pareadas

Abstract

Forest conservation is necessary for a well-balanced ecosystem and for the conservation of the biologic diversity. Forest is a good way to control erosion, desertification, water quality and carbon sequester, among others. It constitutes room for the development of socio-economical and environmental activities. On the other hand, there are a lot of questions about the role of the forests in yielding water with quantity and quality. As forest is traditionally seen as an efficient way to maintain and to yield water to rivers, it is usually recommended for basin recovering. Some of the forest hydrological roles (increase river water yield) are questionable and lack technical and scientific background. However, a lot of scientific data are available in the literature that were obtained through systematical monitoring of basins throughout the world. The monitoring works follow three methodologies, especially the paired basins one. These data usually show that annual water

yield and base flow decrease and increase with the afforestation and deforestation, respectively. This behavior is due to the high evapotranspirative capacity of tress, when compared to the grasses, bushes and large part of agricultural cultures. Forests favor infiltration, but great part of the infiltrated water will be eliminated by transpiration, due to the well developed root system of trees. The rain peaks and rain flow volume tend to increase with the deforestation, especially when this is done without technical criteria, leading to soil compaction. The bigger floods are well correlated with high recurrence rain events. Forests tend to increase water quality, reducing the amount of sediment that come from erosion and mass movements. Forests tend also to reduce the amount of chemical elements, such as nitrate. The paired basin studies are a good method to analyze land use impacts on the hydrological regime, but there are still some questions, such as: is it possible to extrapolate the data to larger scales or to basins in areas of different environmental characteristics, especially the tropical ones? Unhappily, this kind of study, that is important to the recovering of degraded areas and hydrologic resources management, is relatively scarce in Brazil.

Key-words: forest hydrology; hydrographic basin; evapotranspiration; basin management; paired basins.

Introdução

Inicialmente, convém definir o que se entende por floresta, que seriam áreas relativamente extensas, cobertas de vegetação lenhosa de porte, composta por espécies nativas ou exóticas, e de ocorrência natural ou resultante de reflorestamento.

Há grandes controvérsias quanto ao impacto exercido pelas florestas no regime hidrológico dos rios. Certos autores argumentam que as florestas seriam eficazes para controlar cheias, manter vazões nos períodos de estiagem, fornecer água de boa qualidade e, até mesmo, para aumentar a precipitação local (Calder 1998). Contudo, nas últimas décadas, dados sistemáticos de monitoramento têm evidenciado que o desmatamento pode aumentar as vazões nos

ISSN1519-5708
http//:www.degeo.ufop.br/geobr

períodos de estiagem e até mesmo as vazões médias anuais (Bosch e Hewllet 1982, McCulloch e Robinson 1993). Tais controvérsias se devem à complexidade do tema, pois as variáveis que controlam o comportamento hidrológico numa bacia são muitas e freqüentemente interdependentes. Outro fator relevante é que os dados adquiridos em bacias com características contrastantes ou com metodologias distintas são muitas vezes indevidamente comparados, levando-se a conclusões errôneas. Outras vezes, ignora-se que eventuais mudanças históricas no regime hidrológico dos rios não decorrem necessariamente de alterações da cobertura vegetal e sim de variações climáticas naturais ou até mesmo de mudanças morfológicas da bacia, de origem neotectônica.

Para muitos especialistas em hidrologia florestal (Andrréassian 2004), algumas das funções da vegetação no regime hidrológico são repetidas com base unicamente em mitos e tradições, sem qualquer respaldo de dados científicos. Desta forma, neste trabalho pretende-se elaborar uma minuciosa revisão da literatura para contribuir com este debate e para substanciar questões relativas à preservação e revitalização de bacias hidrográficas em ambiente tropical.

1 - Princípios de Hidrologia Florestal

Apenas parte da precipitação (precipitação efetiva) numa bacia atinge a superfície do solo, pois uma fração considerável da mesma será retida na copa das árvores ou na serrapilheira. A evapotranspiração real engloba a transpiração e a evaporação (pelas plantas, serrapilheira e solo). A precipitação efetiva pode ficar temporariamente armazenada no perfil do solo, retornar por evapotranspiração para a atmosfera ou, então, escoar, compondo a vazão dos rios da bacia (Q). O escoamento se dá pela superfície (FS -fluxo superficial), por subsuperficie (FSS - fluxos subsuperficiais ou interfluxos) ou como fluxo subterrâneo (FSub), depois de recarregar o lençol freático (Figura 1).

Toda a água da precipitação efetiva não evapotranspirada acabará escoando por uma destas três rotas de fluxo. O fluxo superficial e os subsuperficiais mais rápidos (*quickflows*, senso Smakhtin 2001)

ISSN1519-5708
http//:www.degeo.ufop.br/geobr

compõem nos hidrogramas o fluxo de chuva (também denominado fluxo de cheia ou escoamento superficial direto) dos rios. Por outro lado, os fluxos subsuperficiais mais lentos e o fluxo subterrâneo compõem o fluxo de base (escoamento básico) dos rios. A separação da vazão ou fluxo total (Q) de um rio em fluxos de chuva e de base é tradicionalmente feita por análise de séries de dados hidrológicos e hidroquímicos (Smakhtin 2001), permitindo maior compreensão das possíveis rotas de escoamento numa bacia.

Há dois mecanismos de geração de fluxo superficial em bacias hidrográficas (Figura 1), o fluxo superficial hortoniano (FSH) e o fluxo superficial de saturação (FSSat). O FSH se dá quando a intensidade da chuva é maior que a capacidade de infiltração do solo e o FSSat quando o solo é saturado pela ascensão do lençol freático até a superfície. Neste caso, a infiltração torna-se impossível e toda a precipitação sobre esta porção saturada escoa lateralmente. Dá-se o nome de fluxo superficial de saturação a soma deste escoamento com eventuais águas de exfiltração do lençol freático. Até a década de 60, acreditava-se que o FSH seria a componente fundamental na geração de escoamento superficial (Lima 2004), mas hoje se sabe que é raro em bacias hidrográficas florestadas, só se desenvolvendo plenamente onde há afloramentos rochosos ou solo com baixa taxa de infiltração (solo compactado ou hidrofóbico). Nas bacias florestadas predomina o FSSat, sobretudo nos setores topograficamente rebaixados, onde o lençol freático tende a ser mais raso. Nestes locais, o lençol é capaz de alcançar a superfície após alguns eventos acumulados de chuva, iniciando-se a geração de FSSat. Estas áreas com ocorrência de FSSat tendem a se expandir com a continuidade da chuva, motivo pelo qual são denominadas áreas de contribuição variável (Hewlett 1982).

ISSN1519-5708
http//:www.degeo.ufop.br/geobr

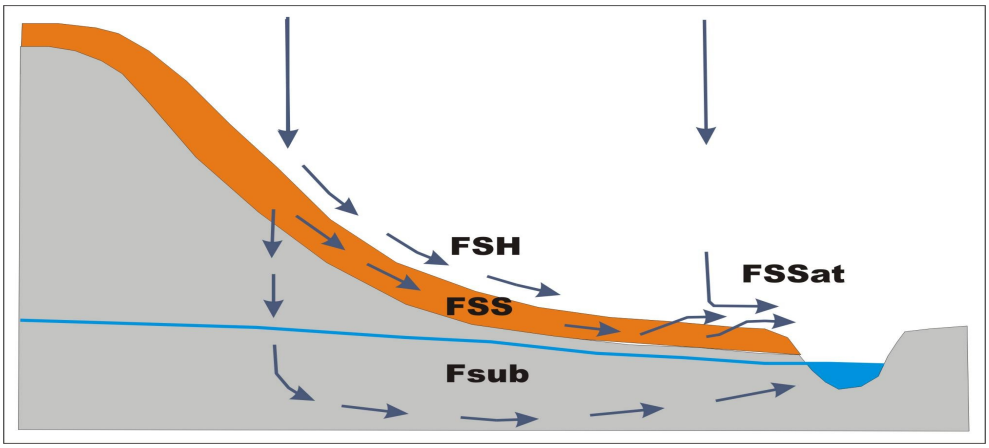

Figura 1: Seção com as possíveis rotas de escoamento geradas em bacias. FSH = fluxo superficial hortoniano; FSSat = fluxo superficial de saturação; FSS = fluxo subsuperficial; FSub = fluxo subterrâneo (Dunne e Leopold 1978)

2 - Metodologias Empregadas em Hidrologia Florestal

Há três tipos principais de procedimentos metodológicos para avaliações comparativas do regime hidrológico de bacias hidrográficas (McCulloch e Robinson 1993):

a. Estudos de correlação - o comportamento hidrológico é comparado entre diferentes bacias, que se diferenciam apenas no atributo de interesse, no caso, a vegetação. Como na prática isto é quase impossível, há a opção de monitorar diversas bacias simultaneamente, averiguando-se as possíveis variações de condições naturais (geologia, geomorfologia, solos e clima). Os dados hidrológicos obtidos são então analisados estatisticamente através de equações regressões múltiplas, obtendo-se, como produto final, equações empíricas que relacionam as vazões com as variáveis independentes (ex.: Lacey e Grayson 1998);

b. Estudos de bacia única - o comportamento hidrológico de um rio de uma bacia é estabelecido após alguns anos de monitoramento. Posteriormente, a bacia é tratada (p.ex.: desmatada ou reflorestada) e continua-se o monitoramento por alguns anos até

estabelecer a influência do tratamento no regime hidrológico.

c. Bacias pareadas (*paired basins*) - indiscutivelmente, a melhor metodologia de avaliação do impacto das formas de uso e ocupação no regime hidrológico é a das bacias pareadas, aplicável em bacias com características muito similares. É sempre preferível que as bacias pareadas se localizem o mais próximo possível, de forma a exibir características semelhantes quanto aos aspectos físicos, clima, tipo de vegetação e formas de uso e ocupação. Convém monitorar as bacias pareadas por vários anos para caracterizar adequadamente seu comportamento (período de calibração). Completada a fase de calibração, uma das bacias é modificada (bacia tratada), enquanto a outra permanece inalterada (bacia de referência ou de controle). A análise estatística por regressão linear dos dados de vazão das bacias de controle e tratada possibilita determinar o impacto do tratamento. Para tanto, comparam-se os dados reais com os obtidos com a equação de regressão caso não houvesse tratamento (Best *et al.* 2003). Há também outras formas de análise de dados, como a construção de curvas de duração de fluxo, que permitem analisar não só os fluxos anuais, como também as variações sazonais (Best *et al.* 2003).

1.Revisão dos Estudos

De acordo com Andrréassian (2004), no século XIX já havia controvérsias quanto ao papel desempenhado pelas florestas no regime hidrológico: por um lado existiam os partidários de uma visão mais científica, com argumentos embasados em dados hidrológicos e meteorológicos; por outro, havia os denominados *florestais*, com visão mítica e romântica da floresta. Estes propagavam que as florestas exerciam as seguintes influências no regime hidrológico dos rios (Lima 1993, Calder 1998): redução do fluxo de chuva; aumento do fluxo de base; aumento da precipitação local; e melhoria da qualidade da água.

Segundo Andrréassian (2004), os primeiros estudos científicos se iniciaram com Belgrand, ao monitorar, entre 1850 e 1852, três bacias hidrográficas com distintos graus de ocupação por floresta, que o levaram a concluir que: "... a opinião comum de que as florestas tornam o

suprimento de água para as nascentes e córregos mais regular não encontra respaldo em qualquer evidência observável".

O primeiro trabalho de comparação sistemática de bacias foi efetuado em 1919 por Engler na região de Emmental, na Suíça (Whitehead e Robinson 1993). O primeiro estudo com bacias pareadas foi implementado por Bates e Henry (1928, apud Andrréasian 2004), no famoso experimento de Wagon Wheel Gap, nas montanhas do Colorado (EUA), entre 1910 e 1926. Neste experimento, fez-se pela primeira vez tratamentos (desmatamentos e reflorestamentos) previamente programados e o êxito foi tamanho, que a partir de então houve uma profusão de estudos com bacias pareadas por todo mundo. Tais experimentos permitiram dirimir muitos dos mitos que envolviam o papel das florestas nos rios. Mesmo assim, ainda hoje é comum a propagação de muitos daqueles antigos mitos - até mesmo em meios técnicos e organismos governamentais -, muitas vezes sem qualquer respaldo de dados científicos mais rigorosos (Lima 1993, Calder 1998, Andrréassian 2004).

Em vista disto, a seguir serão apresentadas as principais evidências encontradas por especialistas em hidrologia florestal, que via de regra se utilizam de experimentos de longo prazo em bacias pareadas.

O primeiro autor a sumarizar os dados de campo foi Hibbert (1967), que concluiu ao analisar os resultados de 39 experimentos com bacias por todo mundo:

- a redução da cobertura florestal aumenta a vazão anual (Q);
- o reflorestamento em terras esparsamente vegetadas diminui a vazão anual (Q);
- a resposta aos tratamentos são algo imprevisíveis e, via de regra, impossíveis de serem feitas.

Bosch e Hewlett (1982) atualizaram o trabalho de Hibbert, acrescentando novos resultados, num total de 94 experimentos, a maioria com bacias pareadas. Segundo estes autores, os dados adicionais corroboraram as duas primeiras conclusões de Hibbert, mas refutaram a terceira, uma vez que seria possível prever de forma aproximada a resposta hidrológica dos tratamentos efetuados. Ou seja, conhecendo-se o percentual de área desmatada e o tipo de

vegetação envolvida, poder-se-ia estimar o aumento das vazões (Figura 2).

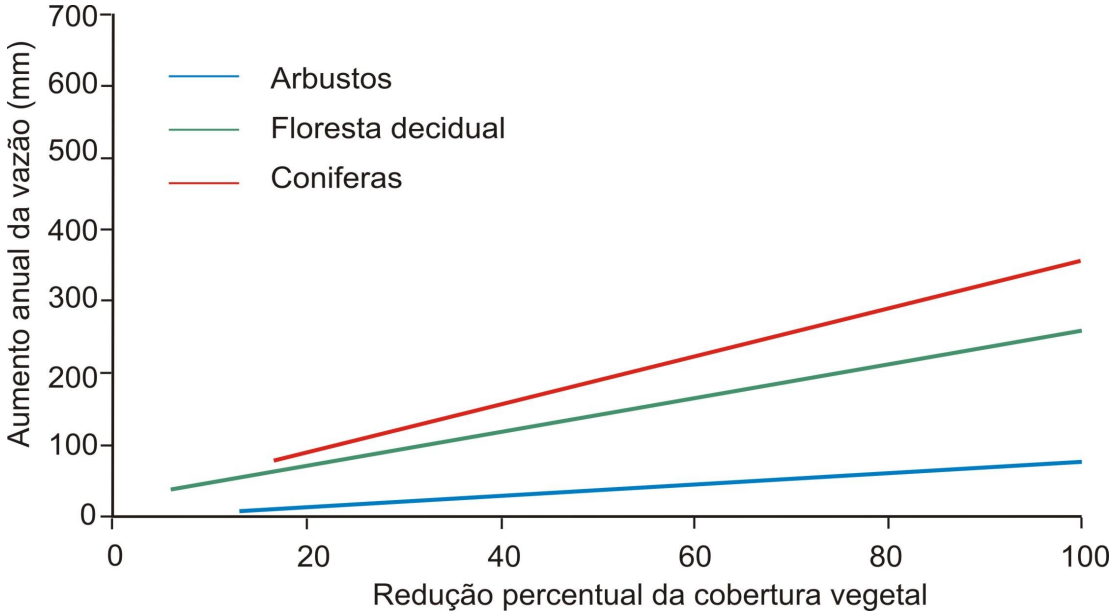

Figura 2: Resultado de 94 experiências de monitoramento de bacias (Bosch e Hewlett 1982). Notar que o impacto na vazão é maior com coníferas e menor com vegetação arbustiva.

Outros trabalhos subseqüentes de revisão (Bruijnzeel 1990, McCulloch e Robinson 1993, Sahin e Hall 1996, Batchelor *et al.* 1998, Best *et al.*. 2003, Andrréassian 2004, Brown *et al.* 2005) confirmam de forma geral as conclusões de Bosch e Hewlett (1982), embora existam situações pontuais anômalas, normalmente justificadas por características locais das bacias ou então por peculiaridades quanto à forma de tratamento (Buinjnzeel 1990, Andrréassian 2004).

A natureza dinâmica e transitória e as inter-relações dos processos hidrológicos na natureza constituem, seguramente, um complicador para a geração de modelos preditivos do comportamento. Por tais razões, nas últimas décadas nota-se uma

proliferação de estudos com o objetivo de compreender como os tratamentos afetam em termos físicos a magnitude e a freqüência dos processos hidrológicos numa bacia. Estes estudos envolvem o emprego de dados hidroquímicos, traçadores e datações (Araguás-Araguás *et al.* 1993, McGlynn *et al.* 2002), que são usualmente empregados para avaliar e quantificar as eventuais alterações no regime hidrológico em decorrência de tratamentos nas bacias. Tais informações possibilitam compreender melhor as relações de causa e efeito de cada componente do ciclo hidrológico, facilitando a explicação de eventuais comportamentos anômalos.

Assim, dada a complexidade do tema, no presente trabalho optou-se por analisar de forma sintética as interferências da floresta em cada componente do ciclo hidrológico, de forma a facilitar a compreensão do efeito final.

4.1 - Pluviosidade

A crença de que as florestas teriam o poder de atrair chuva e, assim, aumentar as vazões encontra muitos adeptos (p.ex.: Molchanov 1960), com o argumento de que a grande capacidade evapotranspirativa da vegetação aumentaria a umidade atmosférica e, conseqüentemente, as precipitações locais. Simulações matemáticas e dados de campo corroboram esta possibilidade para o caso de extensas coberturas vegetais, como a floresta Amazônica (Bruijnzeel 1990, Calder 1998), mas para coberturas menores e descontínuas este fator é o mais das vezes insignificante, já que grande parte da água das chuvas provém da evaporação nos oceanos.

Dados antigos que suportavam a hipótese de aumento da chuva em áreas com floresta certamente desconsideravam o efeito da turbulência atmosférica, menos significativo nas clareiras onde são instalados os pluviômetros, que tenderiam, assim, registrar maior volume de chuva (Hewlett 1982, Lima 1993). Mesmo os eventuais aumentos de precipitação local devido ao efeito orográfico exercido por árvores muito altas teriam efeito desprezível no regime hidrológico (Zhang *et al.* 99), não resultando num aumento das vazões, pois a maior infiltração seria compensada pela maior capacidade evapotranspirativa das florestas (Bruinjzeel e Critchley 1994, Calder 1998), como será discutido a seguir.

ISSN1519-5708
http//:www.degeo.ufop.br/geobr

4.2 - Interceptação

A interceptação da precipitação pela vegetação é difícil de mensurar, por ser função do potencial de evaporação, da capacidade de armazenamento de água - fatores dependentes da área ocupada pela copa e das características das folhas (Zhang *et al.* 1999, Best *et al.* 2003) - e das características da chuva (intensidade e duração). As árvores interceptam mais que outros tipos de vegetação de menor porte, como gramíneas e grande parte das culturas agrícolas, por possuírem maior rugosidade aerodinâmica e índice de área foliar superior (Ruprecht e Schofield 1989, Lima 1993, Zhang *et al.* 1999, Best *et al.* 2003). Porém, os dados de interceptação disponíveis na literatura são extremamente variáveis, até para um mesmo gênero de vegetação (Coelho Netto 1994).

Cabe lembrar que a interceptação pela vegetação é normalmente uma componente menor do ciclo hidrológico, em especial quando se compara com a transpiração. As florestas tropicais, por exemplo, interceptam em média apenas 13 % da precipitação anual (Bruijnzeel 1990).

4.3 - Infiltração

Solos sob florestas se caracterizam por expressiva camada de resíduos vegetais (serrapilheira) e por um horizonte A rico em matéria orgânica. A matéria orgânica é comprovadamente eficiente para manter os agregados do solo, preservando sua porosidade (Bertoni e Lombardi Netto 1993). Portanto, solos sob floresta normalmente apresentam significativa porosidade, especialmente macroporosidade, proporcionada por raízes mortas e cavidades de animais. Os macroporos são importantes por facilitar a infiltração e a recarga da água, sobretudo em solos argilosos, que de outra forma seriam pouco permeáveis. Portanto, a capacidade de infiltração normalmente é muito mais expressiva em áreas sob florestas (Cheng *et al.* 2002, Best *et al.* 2003) que em pastagens e culturas agrícolas. Mapa (1995) demonstrou que latossolos compactados de áreas agrícolas e pastagens exibem, após alguns anos de implantação de reflorestamento, um rápido desenvolvimento de macro e microporosidade, em virtude da maior incorporação de matéria orgânica. A matéria orgânica mantém estáveis os macroporos, além de possuir caráter

hidrofílico, favorecendo a retenção de água nos microporos (Mapa 1995).

Contudo, é preciso evitar generalizações, pois em certas situações o resultado pode ser o oposto, com o desmatamento proporcionando a redução ou eliminação dos predadores naturais da fauna construtora de macroporos. As formigas saúvas, por exemplo, se proliferam em áreas de mata Atlântica substituídas por pastagens. Neste caso, mesmo se o solo encontrar-se degradado, o sistema de cavidades interconectadas, típico destes insetos, elevará substancialmente sua capacidade de infiltração (Deus 1991)

A capacidade de infiltração é grande quanto o solo encontra-se seco, devido à ação das forças capilares, e diminui progressivamente com o umedecimento (Selby 1993). Solos sob floresta mostram-se em média menos umedecidos (Sharma *et al.* 1987), em face do maior potencial de transpiração das árvores de grande porte (Figura 3). Conseqüentemente, a taxa média de infiltração tende a ser maior nas florestas, pelo efeito combinado de maior permeabilidade e menor umidade antecedente (Best *et al.* 2003).

Com o desmatamento sob condições ideais, ou seja, evitando-se ao máximo a compactação superficial (Bruinjzeel 1990), a capacidade de infiltração do solo tende a diminuir progressivamente com a perda da matéria orgânica e com o maior grau de umidade. Contudo, o desmatamento normalmente foge destas condições ideais, e onde o solo é muito compactado (ex.: trilhas e carreadores) há redução drástica da infiltração, elevando-se o fluxo superficial hortoniano (Figura 1) e provocando, eventualmente, erosão superficial. Em áreas com solos argilosos, a compactação do solo pode ser tamanha, que cerca de 70 % da precipitação passa a escoar como fluxo superficial (Bruinjzeel e Critchley 1994). Portanto, o desmatamento tende a elevar o fluxo de chuva nos rios. Como será discutido a seguir, ao reduzir a transpiração, o desmatamento normalmente resulta na subida do lençol freático, que chega a atingir a superfície nas áreas topograficamente mais baixas, proporcionando um aumento das áreas superficialmente saturadas (Ruprecehet e Schoefield 1989) e elevando,

ISSN1519-5708
http//:www.degeo.ufop.br/geobr

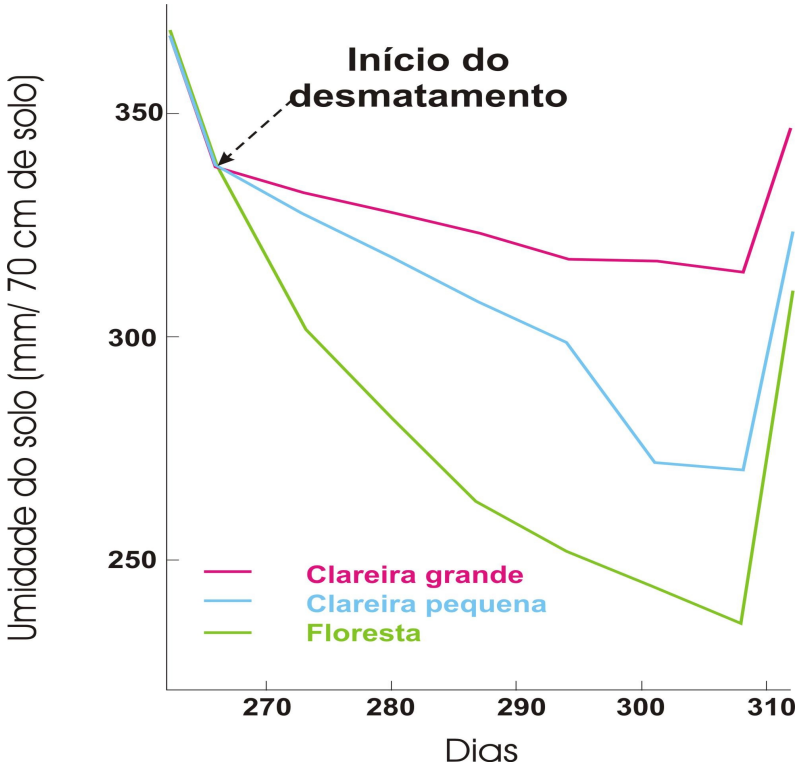

Figura 3: Comparação da umidade média de solos sob floresta e sob áreas desmatadas durante a estação seca, Costa Rica (Parker 1985, *apud* Bruinjzeel e Critchley 1994). Após o desmatamento, quanto maior a clareira, mais úmido o perfil do solo.

assim, o volume do fluxo superficial de saturação.

Sabe-se que as queimadas são capazes de prejudicar a capacidade de infiltração do solo ao destruir sua matéria orgânica. Em alguns casos, as queimadas produzem um horizonte superficial no solo repelente à água (comportamento hidrofóbico), favorecendo o fluxo superficial e a erosão. Para Scott (1993), solos sob eucaliptais são normalmente hidrofóbicos e tal comportamento tende a crescer com a temperatura do incêndio. Apesar de sua relevância, a questão dos solos hidrofóbicos é ainda pouco estudada no Brasil.

É importante ressaltar que, embora a infiltração seja muito elevada sob florestas,

ISSN1519-5708
http//:www.degeo.ufop.br/geobr

apenas parte da água infiltrada, normalmente não superior a 10% do total precipitado, irá recarregar os aqüíferos (Zhang 1999), já que grande parte retornará à atmosfera via transpiração. Portanto, como será discutido no próximo item, não obstante a redução das taxas de infiltração em áreas desmatadas, a recarga dos aqüíferos pode aumentar, em conseqüência da menor transpiração.

4.4 - Evapotranspiração

A evapotranspiração é a componente mais importante do ciclo hidrológico, pois sua magnitude normalmente supera em muito a de outros componentes, como recarga, escoamento superficial e variação da umidade do solo (Best *et al.* 2003). Na Amazônia central, por exemplo, Leopoldo *et al.* (1995) demonstram que 97% do total precipitado é armazenado temporariamente, não escoando pela superfície, e que cerca de 67,6 % do precipitado é então evapotranspirado (Tabela 1). Portanto, quanto maior a capacidade evapotranspirativa numa bacia, menor será a vazão anual.

Tabela 1: Balanço hídrico da bacia de Barro Blanco, Amazônia (Leopoldo *et al.,* 1995).

Parâmetro	Quantidade	%
Precipitação	2209,0	100.0
Armazenamento	2143,4	97.0
Infiltração	1894,2	85.7
Retenção de Água no Solo	1243,8	56.3
Variação no Armazenamento	± 41,6	1.9
Evapotranspiração Real	1493,1	67.6
Transpiração Real	1243,8	56.3
Interceptação	249,3	11.3
Fluxo de chuva	65,5	3.0
Fluxo de base	650,4	29.4

A evapotranspiração é uma propriedade de difícil mensuração, variando com o tipo e idade da vegetação, com a profundidade e disponibilidade hídrica do solo e com o clima e estação do ano (Molchanov 1960, Lima 2004). O clima afeta o potencial evapotranspirativo ao facilitar tanto a evaporação como a transpiração. Quanto maior a radiação solar líquida, expressada principalmente pelo albedo, maior a transpiração. Quanto maiores os processos de advecção e mais turbulento o fluxo atmosférico, também maior é a evapotranspiração. A evapotranspiração é igualmente influenciada pela intensidade e duração dos eventos chuvosos (Zhang *et al.* 99).

As características das plantas também são importantes, especialmente a área foliar e a profundidade das raízes, ambas diretamente proporcionais à evapotranspiração. A transpiração das plantas ocorre pelos estômatos, que são pequenos poros localizados na folha, que de resto exibe superfície praticamente impermeável à água. As plantas possuem a capacidade de controlar a transpiração através da abertura dos estômatos, mas este controle ainda não é compreendido na sua totalidade, já que é afetado por variados fatores fisiológicos e ambientais, tais como a luminosidade, o déficit de vapor de água na atmosfera e a sucção no interior da folha (Lima 1993 e 2004). Os estômatos permanecem fechados à noite e mostram, em muitas espécies, abertura máxima à tarde (Lima 1993). Por tal razão, nas bacias de cabeceiras de drenagem com vegetação abundante e bem desenvolvida, as vazões dos cursos d'água à noite são via de regra maiores que de dia, com vazões mínimas registradas no período da tarde (Hewlett 1982, Nyholm *et al.* 2003, Valente e Gomes 2005, Costa 2005), o que pode ser creditado à maior evapotranspiração, especialmente pela vegetação ripária. Pelos mesmos motivos, a variação diária de vazões é máxima em dias ensolarados e mínima nos nublados (Nyholm *et al.* 2003).

Por fim, a evapotranspiração depende da disponibilidade de água para a planta no perfil do solo. Solos de textura grossa possuem baixa capacidade de retenção de água (Zhang *et al.* 99), pois drenam rapidamente. Os melhores solos para desenvolvimento vegetal são os de

textura intermediária, pois os de textura fina, pouco permeáveis, dificultam a infiltração e a oxigenação das raízes.

Em climas áridos, a evapotranspiração é regulada principalmente pela água disponível, que é função da precipitação e da capacidade de armazenamento no perfil de solo. Por outro lado, nos climas úmidos a evapotranspiração é mais influenciada pela energia, reflexo das condições de radiação líquida (albedo) e da advecção (Zhang *et al.* 1999).

A evapotranspiração nas florestas é normalmente superior à da vegetação de menor porte (Figura 4): nas estações úmidas, em função do aumento do transporte de vapor de água devido à superfície aerodinamicamente mais rugosa de suas copas; e nas secas, devido ao sistema radicular maior e melhor desenvolvido (Calder 1998). A diferença entre a evapotranspiração de áreas com gramíneas e floresta cresce com o índice pluviométrico (Figura 4).

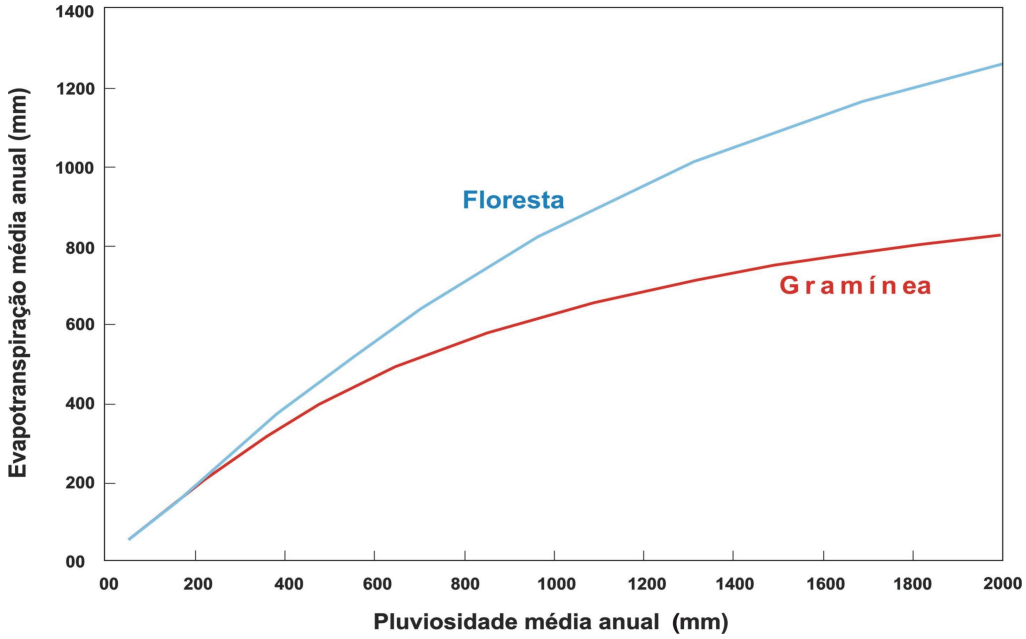

Figura 4: Relação entre a precipitação média anual e a evapotranspiração para áreas com gramíneas e floresta (Zhang *et al.* 1999).

O sistema radicular depende do tipo de vegetação e das condições ambientais (Schenk e Jackson 2005). Algumas plantas apresentam sistema radicular superficial; outras com raízes mais profundas, o que aumenta a disponibilidade hídrica no perfil do solo (Figura 5). Normalmente, o sistema radicular de árvores de grande porte se concentra nos primeiros metros, sendo incomum ultrapassar10 metros de profundidade (Lima 1993), embora haja registros de raízes com mais de 18 m. (Carbon *et al.*, *apud* Peck e Williamson 1987). Canadell *et al.* (1996 *apud* Zhang *et al.* 1999), por outro lado, afirmam que o sistema radicular máximo de árvores e de herbáceas gira em torno de respectivamente 7 m. e 2,6 m., diferença que significa um excesso de água disponível para as primeiras de até 1500 mm/ano, no caso de solos argilosos. Assim, gramíneas e arbustos muitas vezes secam no período de estiagem, enquanto as árvores continuam se desenvolvendo plenamente, mantendo as folhas verdes. Outros fatores locais igualmente ditam o desenvolvimento do sistema radicular, como o clima, a profundidade do lençol freático e o grau de compactação do solo (Lima 1993, Schenk e Jackson 2005). De fato, horizontes de solo compactados inibem o desenvolvimento das raízes e a presença de lençol freático próximo à superfície limita o aprofundamento das raízes da maioria das espécies (com exceção das higrófilas), que necessitam de um meio airado para se desenvolver. Climas que fornecem um bom suprimento de água ao solo favorecem o desenvolvimento de raízes mais superficiais (Awe *et al.* 1976, *apud* Lima 1993). Por fim, deve-se ainda ressaltar que as modernas técnicas de cultivo, que se valem de um bom preparo do terreno para facilitar a penetração das raízes e de fertilizantes para acelerar o crescimento, tendem a aumentar o potencial de evapotranspiração de culturas agrícolas (Smith e Scott 1982).

As espécies vegetais desenvolvem diversos mecanismos para sobreviver em condições de déficit hídrico, como raízes profundas, um eficiente controle estomático e a perda sazonal das folhas (Lima 1993). Assim, qualquer processo que reduza a quantidade de folhas em uma floresta – como o ataque por insetos herbívoros ou a ação de desfoliantes químicos (Hornbeck *et al.*

ISSN1519-5708
http//:www.degeo.ufop.br/geobr

1993) – fará com que a transpiração decresça. Como exemplo, uma simples redução da população de aves na Austrália proporcionou o crescimento da população de insetos consumidores de folhas de eucaliptos, resultando na elevação das vazões dos rios (Cornish e Vertessy 2001).

Ainda pairam muitas dúvidas acerca do papel da idade da vegetação na evapotraspiração, embora se saiba que o consumo de água normalmente é maior na fase de crescimento, quando o metabolismo

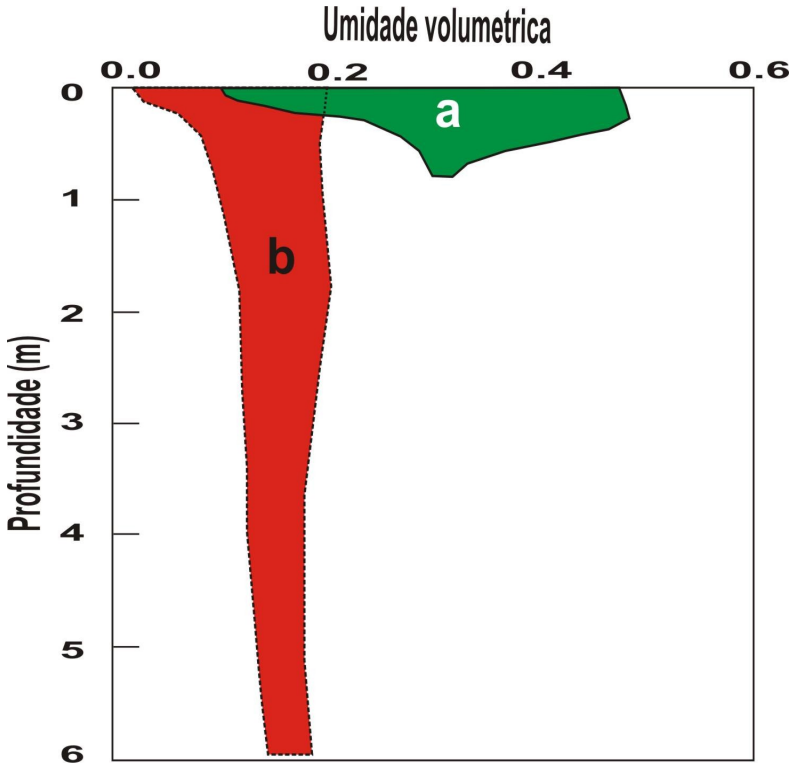

Figura 5: Perfis típicos ilustrando a variação anual da umidade de solos da Austrália: (a) Pastagem irrigada em solos argilosos; (b) Latossolos em área com floresta primária de Eucalipto. O solo sob a pastagem exibe maior capacidade de retenção de água que o do eucalipto. Contudo, como as raízes do eucalipto são mais profundas, a disponibilidade de água (360 mm/ano) é maior que no solo sob gramíneas (137 mm/ano). Extraído de Greacen e William (1983, *apud* Zhang et al., 1999).

vegetal é mais vigoroso. Assim, espécies de rápido desenvolvimento, como os eucaliptos, consomem mais água que espécies de crescimento mais lento (Lima 1993; Zhang *et al.* 1999).

No Hemisfério Sul, sobretudo em eucaliptais, observa-se o aumento inicial das vazões anuais dos rios (Q) no período entre 1 e 3 anos após o desmatamento, e uma posterior diminuição progressiva que perdura por 15-20 anos com a regeneração da vegetação (Figura 6). Somente depois de 40 a 50 anos, quando as plantas já estão maduras, percebe-se uma recuperação da vazão. Tais variações de vazão são creditadas à maior evapotranspiração na fase de crescimento e à posterior queda com o amadurecimento (Kuczera 1987, Vertessy *et al.* 1995 e 2001, Roberts *et al.* 2001). Jayasuriya *et al.* (1993) constataram que há tendência dos eucaliptais reduzirem a evapotranspiração até idades mais longevas, o que explicaria o progressivo aumento de vazão de bacias com este tipo de vegetação natural na Austrália. Segundo estes autores, a capacidade evapotranspirativa de árvores de 230 anos de idade é de 190 mm/ano a menos que de árvores com 50 anos. O padrão de diminuição da capacidade de transpiração com a idade aparentemente se reproduz em outros tipos de vegetação. Por exemplo, Scott e Lesch (1997) relatam casos de rios na África do Sul que tiveram sua vazão progressivamente diminuída até secar 12 após o reflorestamento de suas bacias com *Pinus*.

É igualmente importante saber qual espécie está sendo introduzida num determinado reflorestamento, pois apenas o gênero Eucalyptus consta de mais de 600 espécies descritas (Lima 1993), adaptadas às mais diversas condições de clima e de solo. Estas espécies apresentam significativas variações na taxa de evapotranspiração, da ordem de 30 %, mesmo quando cultivadas sob idênticas condições ambientais (Calder 1998). Lima (1996) transcreve dados computados para plantações de eucalipto, que apontam para variações da taxa de transpiração de 1,0 l/d por árvore adulta no inverno até 37 l/d por árvore com idades entre 2 a 3 anos no verão.

Pelo exposto, um reflorestamento por uma dada espécie vegetal pode ser

inofensivo numa certa região, mas impactante em outra. Por exemplo, a Mata Atlântica num trecho do Espírito Santo apresentou uma evapotranspiração de 1.350 mm/ano, em área de precipitação média anual de 1375 mm (Almeida e Soares 2003),

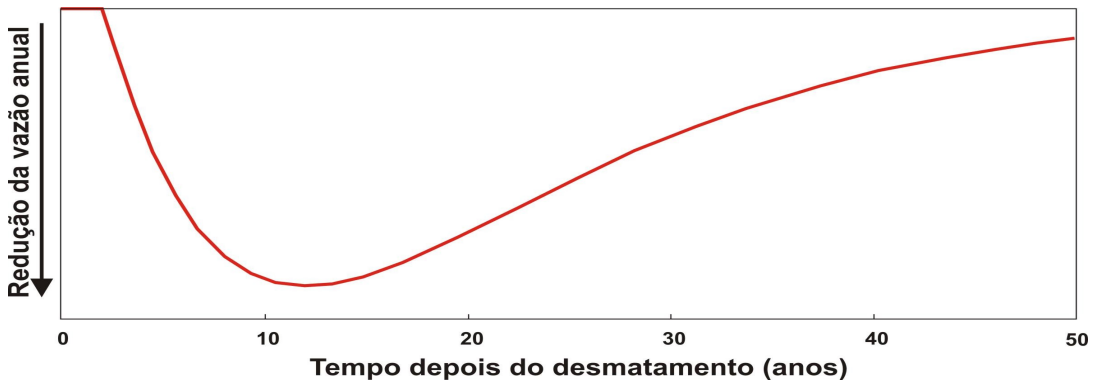

Figura 6: Variação do consumo de água com o tempo para eucaliptos. O aumento inicial de vazão imediatamente após o corte não está representado (Kuczera 1987).

e de apenas 696 mm/ano num trecho na Serra do Mar, em São Paulo, onde a precipitação é de 2319 mm (Fujieda et al. 1997). Portanto, num mesmo bioma, a taxa de evapotranspiração é função de inúmeras variáveis. Até a orientação da encosta é importante, já que a evapotranspiração depende da insolação, maior no Hemisfério Sul naquelas voltadas para norte. A posição na encosta é de mesma forma relevante, já que as árvores situadas nos fundos de vale, onde o lençol freático é mais raso - como nas matas ciliares – tendem a evapotranspirar mais que as situadas a meia ou alta encosta. Por todas estas razões, para se determinar o impacto nos recursos hídricos, é fundamental saber quais espécies de vegetação são introduzidas ou extraídas e sob quais condições ambientais. Plantações de eucalipto podem evapotranspirar equivalentemente à igual porção de Mata Atlântica (Almeida e Soares 2003), mas muito mais que outro tipo de vegetação naturalmente adaptada para consumir menos

ISSN1519-5708
http//:www.degeo.ufop.br/geobr

água, como a presente na caatinga ou no cerrado (Figura 7).

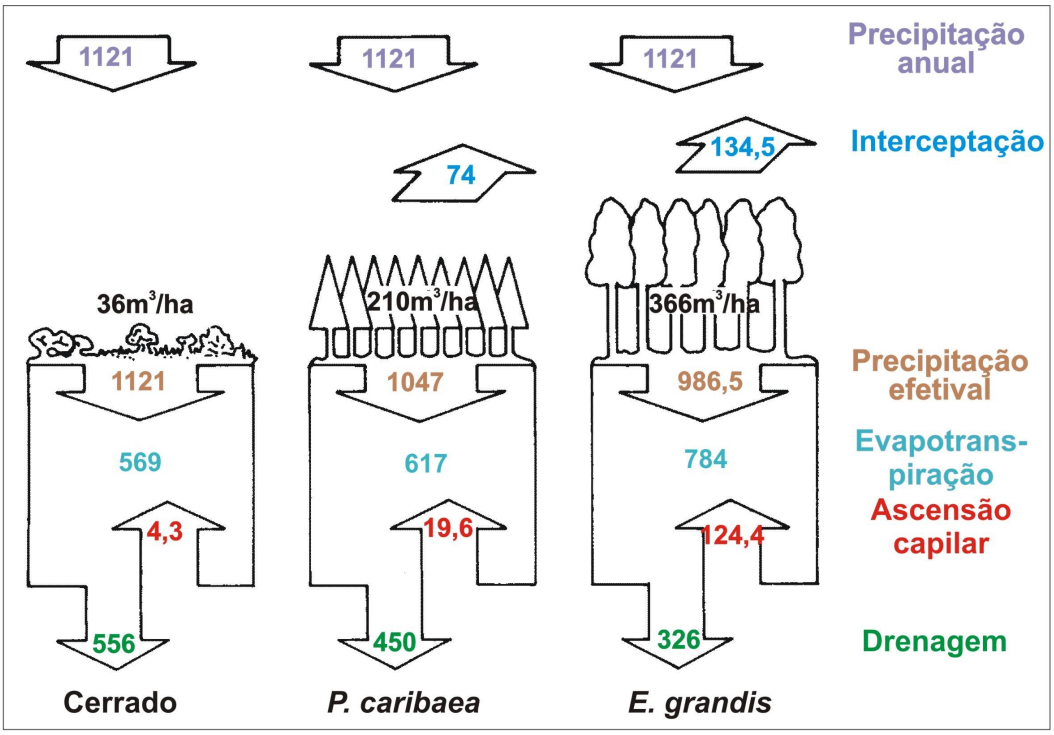

Figura 7: Balanço hídrico ilustrando as diferenças de evapotranspiração entre a vegetação natural (cerrado) e reflorestamentos por *Pinus* e eucaliptos. Estado de Minas Gerais (Lima 1993).

Resumindo, a elevada capacidade de infiltração de água nas florestas é largamente superada pelo maior potencial evapotranspirativo, que atinge 1415 mm em média, no caso de florestas tropicais sem déficit hídrico (Bruijnzeel 1990). Portanto, o desmatamento tende a aumentar o volume de água disponível nas bacias hidrográficas, elevando os fluxos anuais dos rios. Há exceções a esta regra, como na situação de desmatamento de florestas que incorporam parte significativa da precipitação na forma

de condensação de neblina (Ingwersen 1985) ou quando florestas muito antigas são substituídas por novas (Calder 1998). Como será discutido a seguir, dependendo como se faz o tratamento numa bacia, as modificações dos fluxos anuais se manifestam por modificações do fluxo de base ou fluxo de chuva.

4.5 – **Vazão Anual**

De acordo com a Figura 8, a vazão média anual dos rios cresce (de forma não linear) com a pluviosidade (Zhang *et al.* 1999). É também consenso na literatura (Bosch e Hewlett 1982, Whitehead e Robinson 1993, Best *el al*. 1999, Andrréassian 2004), que a introdução e a retirada da vegetação arbórea numa bacia levam, respectivamente, à diminuição ou ao incremento das vazões médias anuais (Figuras 9 e 10).

É importante conhecer o período de tempo desde o último tratamento na bacia, pois se, subseqüentemente a um desmatamento, a regeneração for permitida, a vazão decrescerá progressivamente (Figura 10). Em longo prazo, a vazão pode se tornar até menor que a do período pré-desmatamento (Jayasuriya *et al.* 1993), já que a vegetação em crescimento tende a evapotranspirar mais que a anterior, mais senil.

A variação dos fluxos médios anuais é função do tipo de vegetação, sendo mais expressiva nas de porte arbóreo (Figura 8) que em arbustos, gramíneas e a maioria das culturas agrícolas. Porém, como salientam Bosch e Hewlett (1982) e Cornish (1993), a alteração dos fluxos totais só é facilmente perceptível a partir de cerca de 20 % de desmatamento ou reflorestamento (Figuras 2 e 9).

Outros fatores que afetam a evapotranspiração, discutidos no item anterior, terão, obviamente, reflexos diretos no volume de fluxo anual.

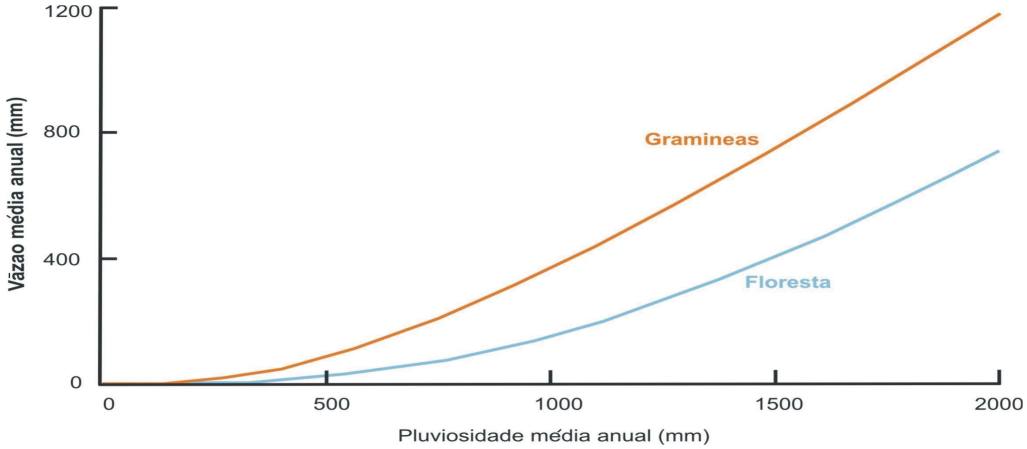

Figura 8: Relação entre a pluviosidade e a vazão média anual para áreas com gramíneas e florestas (Zhang *et al.* 1999). Quanto maior a pluviosidade anual, maior a diferença na vazão.

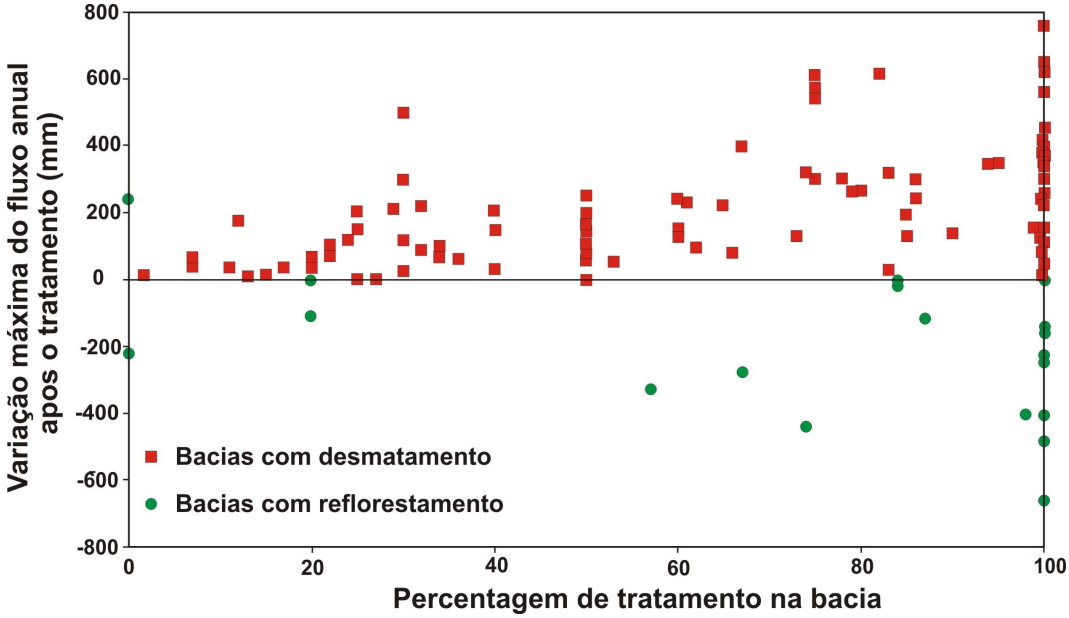

Figura 9: Dados de monitoramento disponíveis de tratamentos (desmatamento e reflorestamento) em bacias (Andrréassian 2004). Quanto maior a área tratada maior o efeito na vazão anual.

ISSN1519-5708
http//:www.degeo.ufop.br/geobr

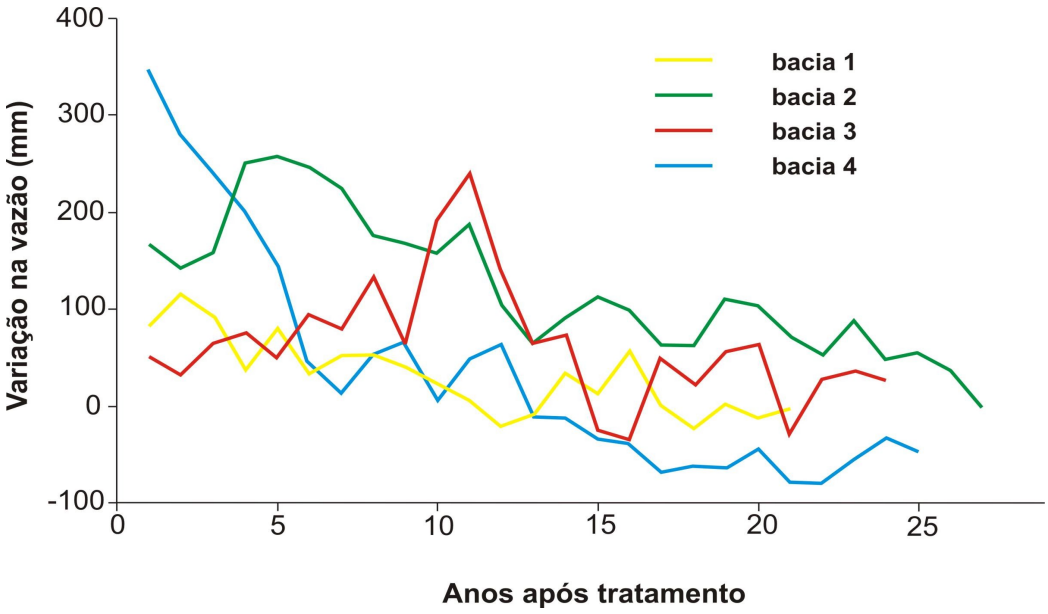

Figura 10: Variação da vazão anual em função de diversos tratamentos silviculturais efetuados em bacias pareadas dos EUA. Bacia 1: 100% de desmatamento no ano zero; Bacia 2: Desmatamento parcial no ano zero e no ano 4 e lançamento de herbicida entre 5-7 anos; Bacia 3: Desmatamento parcial nos anos zero, 4-5 e 8-9 e aplicação parcial de herbicida no ano 7 e total no ano 10: Bacia 4: Desmatamento total no ano zero e herbicida em toda bacia entre 2-4 anos. Dados de Hornbeck *et al.* 1993. Verifica-se que o desmatamento ou a aplicação de herbicidas resultam no aumento de vazões.

4.6 - Fluxo de Base

O desmatamento geralmente proporciona um aumento significativo do fluxo de base anual (Hornbeck *et al.* 1993; Bruinjzeel e Critchley 1994; Best *et al.* 2003; Silverstein *et al.* 2003), alcançando, para florestas tropicais, valores da ordem de 110 a 825 mm/ano (Bruijnzeel 1990).

Como já discutido, o desmatamento proporciona um incremento da precipitação efetiva. Contudo, como observaram Sharma *et al.* (1987), há também uma significativa

diminuição da evapotranspiração, deixando o perfil do solo mais úmido (Figuras 3 e 5), não obstante um certo aumento da temperatura e da demanda evaporativa na superfície pela ausência do dossel e da serrapilheira. (Hewlett 1982). Na mesma linha, Peck e Williamson (1987) provaram, com monitoramento piezométrico, que a substituição de florestas nativas por culturas agrícolas ou pastagens resultou numa significativa ascensão do lençol freático, com taxas de até 2,6 m/ano (Figura 11). Segundo estes autores, tal comportamento foi provocado unicamente pelo desmatamento, que aumentou a taxa de recarga entre 65 e 110 mm/ano. Em certas bacias do oeste australiano, a substituição da vegetação nativa por culturas e pastagens elevou o lençol freático e, conseqüentemente, incrementou o fluxo básico, perenizando rios anteriormente sazonais (Silverstein *et al.* 2003). A ascensão do lençol freático nas áreas desmatadas pode ser de tal magnitude a ponto de inviabilizar a regeneração da floresta após o corte, obrigando a adoção de drenagem do solo (Pothier *et al.* 2003).

Ocasionalmente, o efeito do desmatamento pode ser o oposto, como nos casos em que a condensação de neblina é uma componente importante da precipitação (Ingwersen 1985). Nas bacias de cabeceira com relevo mais íngreme, a floresta auxilia na retenção da delgada camada de solo, responsável pela manutenção do fluxo de base por mais tempo (Mathys *et al.* 1996). Neste caso, o desmatamento pode desencadear a erosão e os movimentos de massa, resultando, em longo prazo, na redução do fluxo de base. Também quando há intensa compactação do solo durante o desmatamento, o fluxo superficial hortoniano torna-se importante e o fluxo de base permanece inalterado ou decresce (Bruinjzeel e Critchley 1994, Cheng *et al.* 2002). Contudo, deve-se lembrar que o efeito da compactação é reversível, já que a porosidade de solos degradados pode ser

ISSN1519-5708
http//:www.degeo.ufop.br/geobr

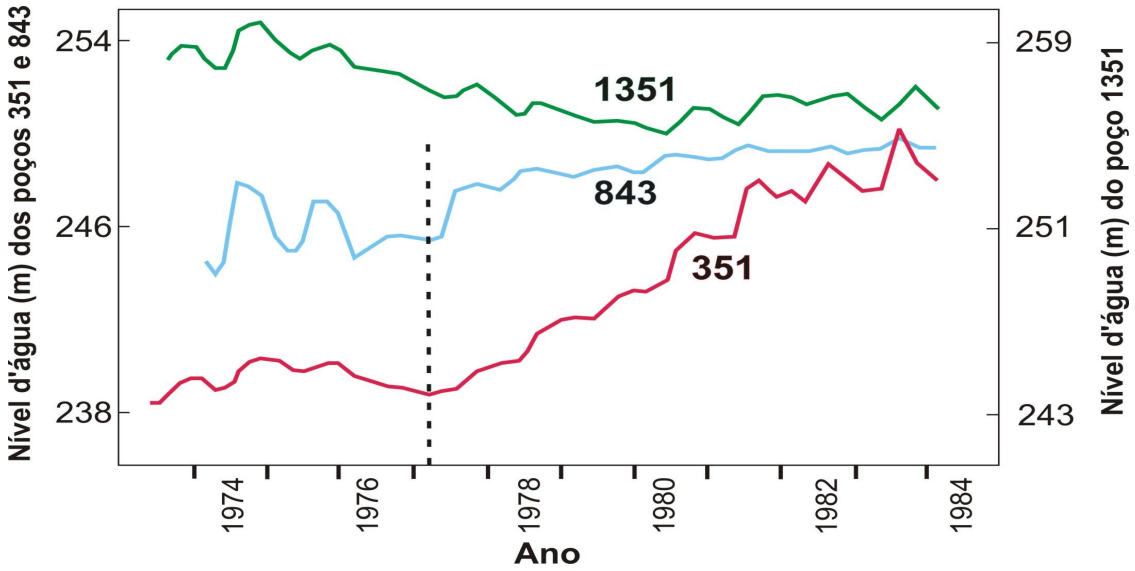

Figura 11: Influência do desmatamento no nível do lençol freático. A bacia 1351 não foi desmatada (bacia de referência). As bacias 843 e 351 foram desmatadas no início de 1977 (linha tracejada) e a partir de então observou-se uma significativa ascensão do lençol freático. Extraído de Peck e Williamson 1987.

rapidamente recuperada no caso de replantio ou regeneração natural (e.g. Mapa 1995).

A conversão de um tipo florestal para outro que consuma mais água normalmente influencia significativamente o fluxo de base. Smith e Scott (1992) e Sikka *et al.* (2003) demonstraram que a substituição de gramíneas e arbustos por *Pinus* e eucalipto reduziu o fluxo de base e o de chuva (Figura 12).

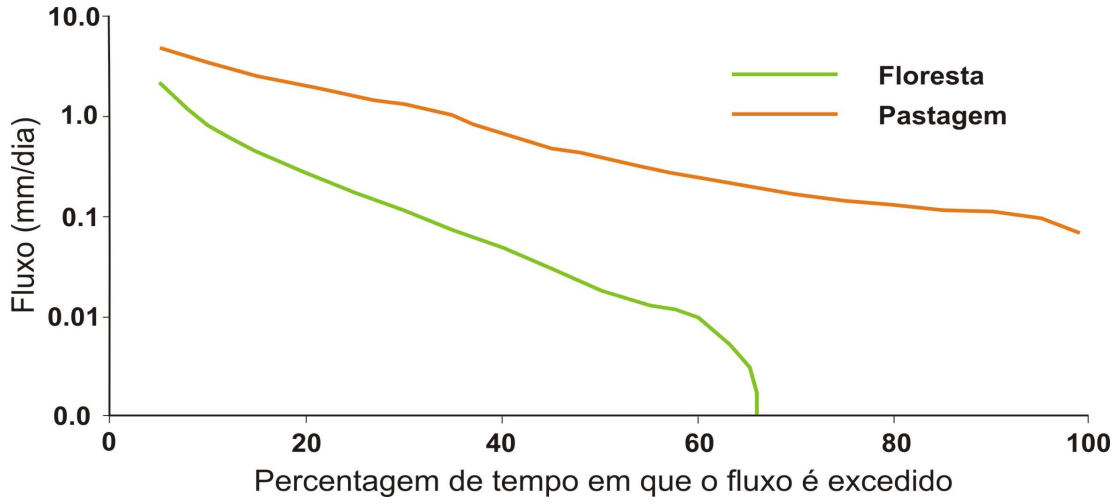

Figura 12: Monitoramento da bacia de Wights, Austrália. Curvas de duração de fluxo entre 1974 e 1976, quando a bacia era ocupada por florestas e entre 1983 - 1985, quando a bacia era coberta por pastagens. A precipitação média nestes dois períodos foi semelhante. Extraído de Best *et al.* 2003. A substituição da floresta por pastagens resultou num aumento das vazões mínimas e máximas.

4.7 - Fluxo de Chuva

O desmatamento geralmente eleva os picos de cheia e, em menor proporção o fluxo de chuva (Silverstein *et al.* 2003), efeito oposto do reflorestamento (Calder 1998). No entanto, esta relação nem sempre é significativa e clara (Bruinjzeel e Critchley 1994), uma vez que o fluxo de chuva médio anual é afetado por eventos climáticos excepcionais e pela forma de execução dos diversos tipos de tratamento (Calder 1998; Cheng *et al.* 2002). Enchentes catastróficas são ditadas principalmente por eventos climáticos extremos, com grande período de recorrência (Cheng *et al.* 2002, Sikka *et al.* 2003), ao passo que as cheias mais freqüentes sofrem maior influência do tratamento na bacia. Porém, como já comentado, a metodologia empregada no tratamento é importante. Por exemplo, quando o desmatamento é bem executado, de acordo com recomendações técnicas, seu efeito no fluxo de chuva médio anual pode ser fortemente atenuado (Bruinjzeel e Critchley 1994).

ISSN1519-5708
http//:www.degeo.ufop.br/geobr

Com o desmatamento, o lençol freático tende a subir (Figura 11) e a zona não saturada do solo torna-se em média mais úmida (Figura 3), fatores que elevam a possibilidade de geração de fluxos subsuperficiais (Bruinjzeel e Critchley 1994). Tais fluxos comumente são rápidos - pois se aproveitam dos macroporos dos horizontes superficiais do solo - constituindo então parte do fluxo de chuva dos rios (McGlynn *et al.* 2002). Os fluxos subsuperficiais também facilitam a geração de fluxos superficiais de saturação (FSSat), comuns e intensos em grande parte das bacias florestadas (Bruinjzeel 1990, Lima 1993), especialmente quando o perfil de solo é delgado (Ferderer 1973, Cornish e Vertessy 2001). Nesta perspectiva, Silverstein et al. (2003) comprovaram que o desmatamento de uma bacia do oeste da Austrália aumentou em cerca de 9% sua área permanentemente saturada, incrementando significativamente a geração de fluxos superficiais de saturação (Figura 13), e conseqüentemente, o volume do fluxo de cheia.

5 - Qualidade da Água

Até recentemente, a questão da qualidade da água não era tratada com igual atenção que a da quantidade e assumia-se que as florestas exerciam função natural de depuração da água. Esta percepção é antiga e vem em grande parte do fato de que em oposição às áreas desmatadas - ocupadas por estradas e culturas agrícolas, etc. - nas florestas normalmente não há esgotos, pesticidas e a erosão é significativamente menor (Calder 1998).

Porém, a vegetação de modo geral melhora a qualidade da água (e.g. Vital *et al.*, 1999). É fato já sobejamente conhecido de que florestas bem formadas regulam a temperatura dos rios e reduzem o volume do escoamento superficial, controlando a erosão e, conseqüentemente, a produção de carga sólida nos rios. A serrapilheira nas florestas dificulta a erosão por salpicamento (Selby 1993). Contudo, em oposição ao comumente propagado, as gotas de chuva que caem das copas das árvores muito altas podem ser maiores que sob áreas desmatadas, aumentando o efeito da erosão por salpicamento (Calder 1998).

ISSN1519-5708
http//:www.degeo.ufop.br/geobr

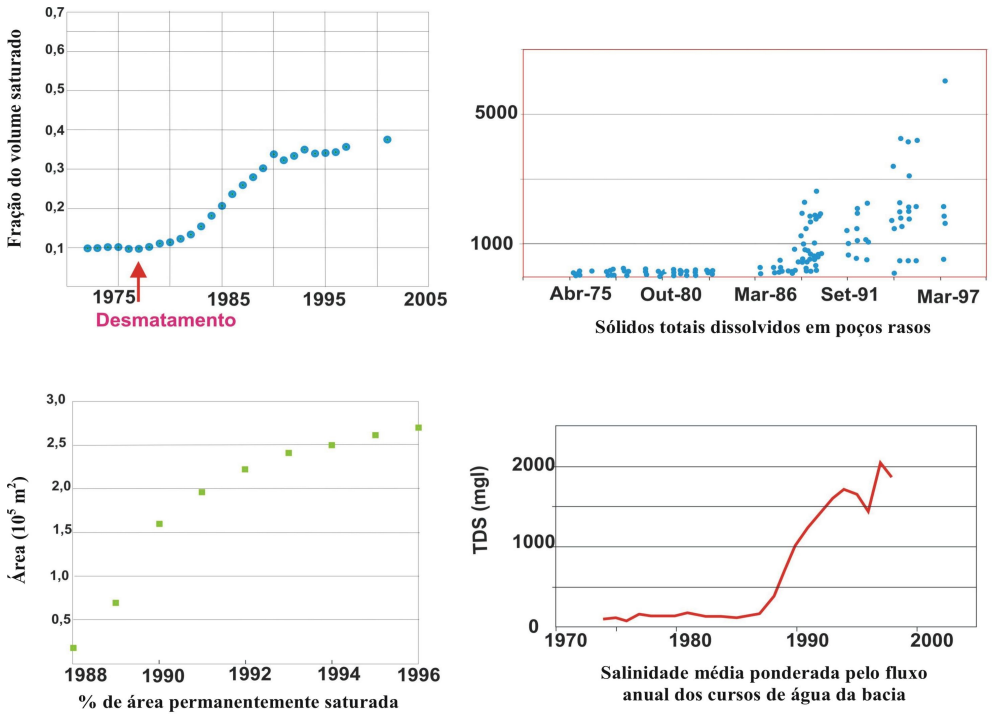

Figura 13: Conseqüência do desmatamento de floresta primária na Austrália (Silverstein *et al.* 2003). O desmatamento resultou no aumento da saturação do solo e das áreas permanentemente saturadas, provocando a salinização das águas dos rios.

Portanto, mais uma vez fica claro que o efeito da vegetação é altamente dependente de particularidades locais. Os movimentos de massa pouco profundos também são mais raros sob florestas bem formadas, devido à ancoragem exercida pelas raízes (Bruijnzeel 1990, Cheng *et al.* 2002).

A concentração de elementos químicos dissolvidos nas águas dos rios de bacias totalmente florestadas é normalmente baixa, especialmente na fase inicial de sucessão vegetal, quando a perda de elementos químicos por lixiviação é mínima, devido a grande adsorção dos mesmos pelas raízes (Chalés e Richards 1983, *apud* Lima 1993). Porém,

desmatamentos e incêndios podem romper o tênue ciclo de nutrientes existentes em algumas florestas (Bruijnzeel 1990). O desmatamento não controlado aumenta o volume de água que atinge e é retida no perfil do solo (Figura 3), favorecendo a lixiviação e uma maior exportação de elementos químicos para os rios. Vital *et al.* (1999) observaram um ligeiro aumento da turbidez e condutividade (ligeiro aumento nos nitratos, potássio, cálcio, magnésio e ferro) da água de rio até um ano após o corte de uma plantação de eucaliptos. Porém, com o replantio ou regeneração, a concentração química tende a cair novamente.

Uma situação exemplar do poder depurativo da vegetação é o da mata ciliar, que é comprovadamente eficiente para reter o nitrato de origem antrópica e, assim, evitar a contaminação dos rios. De fato, o ambiente redutor comumente encontrado nos solos sob a mata ciliar favorece a denitrificação das águas dos fluxos subterrâneos e subsuperficiais que descem encosta abaixo (Angier *et al.* 2005). Por tal razão, têm-se empregado matas ciliares para controle da contaminação por nitrato em zonas rurais. No entanto, mais uma vez, deve-se sempre se precaver de possíveis peculiaridades locais, que podem tornar o processo de denitrificação menos efetivo, mesmo quando há vegetação ciliar bem formada (Angier *et al.* 2005).

Em certas situações, a qualidade da água pode decair pela ativação de processos secundários. Este é o caso da região com florestas primárias do oeste da Austrália, com clima do tipo Mediterrâneo (Silverstein *et al.* 2003). A substituição da floresta, com raízes mais profundas, por culturas e pastagens provocou a ascensão do lençol freático, pois as novas plantas não conseguiam absorver o mesmo volume de água que as anteriores. A subida do lençol proporcionou um grande aumento do fluxo de base, que elevou substancialmente a salinidade dos córregos, que ascendeu dos 100 mg/l para mais de 500 mg/l em média (Figura 13). Este fato se deu pela solubilização dos solos com alta salinidade, pois na floresta primária a pluviosidade media anual é inferior à evapotranspiração real. O sal disponível, sobretudo na zona de raízes, é solubilizado pelo lençol freático ascendente e levado até o rio ou acumulado na superfície do solo, onde o lençol é raso. Portanto, a expansão agrícola e pecuária nesta região resultou na salinização de

córregos e de reservatórios numa área de 2,5 milhões de hectares, com fortes impactos sócio-econômicos e ambientais (Silverstein *et al.* 2003).

2.Discussão dos Resultados e Principais Conclusões

A preservação das florestas é fundamental para um adequado e equilibrado funcionamento dos ecossistemas e na manutenção da diversidade biológica. Elas também exercem funções significativas no controle da erosão, da desertificação, da qualidade da água e do seqüestro do carbono atmosférico. Também constituem espaço para desenvolvimento de atividades sociais, ambientais e econômicas.

Por outro lado, ainda pairam muitas dúvidas quanto ao papel das florestas na produção de água para os rios. Tradicionalmente, a floresta é vista como grandemente eficaz para estabilizar e manter as vazões nos rios, motivo pelo qual a revegetação é prática repetidamente sugerida na recuperação e revitalização de bacias hidrográficas. Contudo, esta função hidrológica é questionável e desprovida do devido embasamento técnico e científico.

Neste sentido, há na literatura especializada um extenso acervo de dados científicos, resultantes de monitoramento sistemático de bacias hidrográficas por todo o mundo, que permitem as seguintes conclusões, sumarizadas na Tabela 2:

- Grande parte da água precipitada retorna à atmosfera sob a forma de evapotranspiração, sobretudo por transpiração. A evapotranspiração é especialmente influenciada pelo clima e pelo tipo de vegetação;
- As árvores evapotranspiram mais que a vegetação de menor porte, como gramíneas, arbustos e boa parte das culturas agrícolas, devido principalmente ao sistema radicular mais profundo e melhor desenvolvido. Por tal razão, o perfil de solo tende a ser em média menos úmido sob florestas;
- A vegetação de porte incorpora grande quantidade de matéria orgânica ao solo, que favorece a formação de micro e macroporosidade e, em conseqüência, a infiltração;
- Portanto, embora a infiltração seja maior sob florestas, a recarga aos aqüíferos

ISSN1519-5708
http//:www.degeo.ufop.br/geobr

normalmente é menor, pois a taxa de transpiração é muito mais significativa;

- A presença de florestas tende a causar redução das vazões médias anuais e do fluxo de base em decorrência do aumento da evapotranspiração;
- O desmatamento causa um efeito contrário; todavia, quando o desmatamento é feito sem preceitos técnicos, o fluxo de base anual pode se reduzir, devido ao decréscimo da infiltração em conseqüência da compactação e hidrofobia do solo. Contudo, o efeito da compactação tende a desaparecer rapidamente com a regeneração natural;
- Em florestas que recebem muita precipitação por condensação de neblina e nas localizadas em regiões montanhosas, o fluxo total e de base pode diminuir com o desmatamento; o mesmo ocorre quando florestas antigas, com diminuta capacidade evapotranspirativa, quando substituídas por novas, com maior capacidade;
- O fluxo de chuva e os picos de cheia tendem a crescer com o desmatamento, seja pelo aumento do fluxo superficial hortoniano (FSH), quando o desmatamento é executado sem critérios técnicos, seja pelo aumento do fluxo superficial de saturação (FSSat), quando bem executado; No entanto, esta relação nem sempre é clara, pois os fluxos de chuva e os picos de cheia são muito afetados por eventos de chuva de grande intensidade, com longo tempo de recorrência;
- A floresta atua no sentido de conter a erosão hídrica e os movimentos de massa rasos. Em conseqüência, a floresta diminui a carga sedimentar nos rios e regula a temperatura de suas águas;
- A floresta ciliar pode sob certas circunstâncias auxiliar na contenção e eliminação de alguns elementos ou substâncias químicas, que de outra sorte atingiriam os rios, como o nitrato.

ISSN1519-5708
http//:www.degeo.ufop.br/geobr

Tabela 2: Influência da Vegetação nas componentes do ciclo hidrológico (Cheng *et al.* 2002).

Componente	Magnitudes relativas
Infiltração	Floresta > Gramíneas > Área desmatada > Área degradada
Evapotranspiração	Floresta > Gramíneas > Área desmatada
Umidade do Solo	Área desmatada > Gramínea > Floresta
Vazão anual	Área degradada > Área Desmatada > Gramíneas > Floresta
Fluxo de chuva	Área degradada > Área Desmatada > Gramíneas > Floresta
Pico de cheia	Área degradada > Área Desmatada > Gramíneas > Floresta
Fluxo de base	Área Desmatada > Gramíneas > Floresta > Área degradada

Contudo, em algumas situações, a floresta chega a exercer uma função totalmente inesperada no comportamento hidrológico dos rios (Bruijnzeel 1990). Os motivos para isto acontecer são muitos, como:

- É importante saber em que parte da bacia se encontra a vegetação (Silverstein *et al.* 2003). Setores topograficamente mais baixos, próximos ao lençol freático – como nas zonas ripárias, pântanos e nascentes - apresentam maior disponibilidade de água para as plantas transpirarem. A substituição de plantas destes setores, com raízes rasas, por outras com raízes profundas pode levar até a secagem das drenagens (Smith e Scott 1982). Como estes setores são mais propícios à geração de fluxo superficial por saturação (FSSat), freqüente em bacias florestadas, a vegetação deve ser aí preservada se pretende-se reduzir o risco de cheias (Bruinjzeel e Critchley 1994).
- No Hemisfério Sul, encostas voltadas para norte recebem maior insolação, fator que favorece a evapotranspiração. Portanto, o impacto de uma revegetação ou desmatamento numa bacia será diferente conforme efetuado em encostas voltadas para norte ou sul;
- É fundamental saber quais espécies de vegetação envolvidas e quais as técnicas empregadas em determinado tratamento, pois diminutas modificações afetam significativamente os processos atuantes, com repercussão na hidrologia e na biodiversidade local (Maestre e Cortina 2004);

- A maioria dos estudos com bacias pareadas se refere a estudos de desmatamento ou de regeneração (Best *et al.* 2003). São raros os estudos com mais de 5 anos de monitoramento e também os com reflorestamento, como os apresentados por Scott e Lesch (1993);
- É preciso uniformizar as metodologias de análise dos dados, pois a maior parte dos estudos desconsidera as variações sazonais de vazão e, quando sim, de forma apenas qualitativa (Best *et al.* 2003, Brown *et al.* 2005).
- É sempre importante conhecer os processos responsáveis por determinado comportamento hidrológico. Por exemplo, como discutido no item 2, o escoamento de chuva em bacias florestadas normalmente tem duas origens: o fluxo superficial de saturação e, secundariamente, de fluxos subsuperficiais rasos, já que o fluxo hortoniano é relativamente raro (Bruijnzeel 1990). A maior parte dos experimentos carece de uma melhor caracterização dos processos em termos físicos, o que pode ser feito com a ajuda de dados hidroquímicos, datações, traçadores e modelagem matemática (Bonnel 1993; McGlynn *et al.* 2002).
- O efeito da escala é ainda pouco conhecido, pois se desconhece até quando é possível extrapolar os dados obtidos em pequenas para grandes bacias hidrográficas (Brown *et al.* 2005), visto que há diferenças marcantes entre as mesmas. Bacias grandes apresentam clima e características físicas e ambientais mais heterogêneos. Estes fatores e o maior tempo de concentração do escoamento superficial dificultam a correlação do comportamento hidrológico com o clima (Costa 2005). No caso das pequenas bacias, é difícil estabelecer com precisão seus limites e sua resposta hidrológica é muito dependente das formas de uso e ocupação (Costa 2005);
- Ainda são escassos os estudos referentes à hidrologia florestal no ambiente tropical (Bruijnzeel 1990, Bonnel 1993, Cheng *et al.* 2002). No Brasil, estes estudos são ainda mais raros e quando existentes, são resultantes de experimentos pontuais e de curta

duração. Deve-se tomar muito cuidado com extrapolações de dados obtidos em regiões temperadas, embora os resultados disponíveis no Brasil (ex. Vital *et al.* 1999) sejam coerentes com os encontrados nestas regiões.

6 - Referências Bibliográficas

Almeida A. C., Soares J. V. 2003. Comparação entre o uso de água em plantações de Eucalyptus grandis e floresta ombrófila densa (Mata Atlântica) na costa leste do Brasil. *Ver. Arvore*, **27** (2): 159-170.

Andrréassian V. 2004. Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*, **291**: 1-27.

Angier J.T., McCarty G.W., Prestegaard K. L. 2005 Hydrology of first-order riparian zone and stream mid-Atlantic coastal plain, Maryland. *Journal of Hydrology,* **309**: 149-166

Araguás-Araguás L., Rozanski K, Plata Bedmar A., Vital A.R.T., Tancredi A.C., Franken W. 1993. *Downward movement of soil moisture in the central Amazon region traced by means of hydrogen isotopes*. Vienna, International Agency of Atomic Energy, 24p. (Intern. Report).

Batchelor C., Cain J., Farquharson F., Roberts J. 1998. *Improving water utilization from a catchment perspective*. Sri Lanka, International Water Management Institute (Paper).

Bertoni J., Lombardi Neto F. 1993 . *Conservação do solo.* Ícone 3aed. Ed. São Paulo, 355 p.

Best A., Zhang, L., McMahom T., Western, A, Vertessy R. 2003. *A critical review of paired catchment studies with reference to seasonal flow and climatic variability*. Australia, CSIRO Land and Water Technical. MDBC Publication 56 p. (Technical Report 25/03).

Bonell M. 1993. Progress in the understanding of runoff generation dynamics in forests. *Journal of Hydrology*, **150**: 217-275.

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 catchement studies for

determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology*. **310**: 28-61.

Bruinjzeel L.A. 1990. *Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion: a state of knowledge review*. UNESCO. 230 p. (Technical report)

Bruinjzeel L.A., Critchley W.R.S. 1994. *Environmental impacts of logging moist tropical forest*. UNESCO, IHP Humid Tropic Programme Séries (n^0 7)

Calder I.R. 1998. *Water-resources and Land-Use issues Sri Lanka.* Sri Lanka International Water Management Institute. 33 p.(Technical Report).

Cheng J.D., Lin L.L., Lu H. S. 2002. Influence of forests on water flows from headwater watersheds in Taiwan. *Forest Ecology and Management*, **165**: 11-28.

Coelho Netto A.L.1994 . Hidrologia de encosta na interface com a geomorfologia. In: Guerra, A.J T, Cunha, S.B. (eds.), *Geomorfologia – Uma atualização de base e conceitos*, 2 ed., Rio de Janeiro, Bertrand, 93-148.

Cornish P.M. 1993. The effects of logging and forest regeneration on water yields in a moist eucalypt forest in New South Wales, Australia. *Journal of Hydrology*, **150**:301-322.

Cornish P.M., Vertessy R.A. 2001. Forest age-induced changes in evaporation and water yield in an eucalypt forest. *Journal of Hydrology*, **242**: 43-63.

Costa F. M. 2005 . *Análise por métodos hidrológicos e hidroquímicos de fatores condicionantes do potencial hídrico de bacias hidrográficas – estudo de casos no Quadrilátero Ferrífero (MG).* DEGEO/EM. UFOP, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado, 146 p

Deus C. E. 1991 . *O papel da formiga saúva (Gênero ATTA) na hidrologia e erosão dos solos em ambiente de pastagem, Bananal, SP*. Instituto de Geociências. UFRJ, Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, 236 p.

Dunne, T, Leopold L. 1978 . *Water environmental planning*. San Francisco. Freeman & Company, 818p.

Federer C.A. 1973. Forest transpiration greatly speeds streamflow recession. *Water Resources Research*, **9** (6): 1599-1604.

Fujieda M., Kudoh T., Cicco V., Calvarcho J.L. 1997. Hydrological processes at two subtropical forest catchments: the Serra do

Mar, São Paulo, Brazil. *Journal of Hydrology*, ***196***: 26-26.

Hewlett. J. D. 1982 . *Principles of Forest Hydrology.* Athens, The University of Georgia Press., 183 p.

Hibbert A. R. 1967. Forest treatment effects on water yield. In: International Symposium Forest Hydrology, Pergamon, Oxford, *Proceedings*, 527-543

Hornbeck J.W., Adams M.B., Corbett E.S., Verry E.S., Lynch J. A. 1993. Long-term impacts of forest treatments on water yield: a summary for northeastern USA. *Journal of Hydrology*, **150**:323-344.

Ingwersen J.B. 1985. Fog drip, water yield, and timber harvesting in the Bull Run municipal watershed, Oregon. *Water Resources Bulletin*, **21**: 469-473.

Jayasuriya M.D.A., Dunn G., Benyon R., O'Shaughnessy P.J. 1993. Some factors affecting water yield from mountain ash (Eucalyptus reignans) dominated forests in south-east Australia. *Journal of Hydrology*, **150**(2-1): 345-367.

Kuczera G. 1987. Prediction of water yield reductions following a bushfire in ash-mixed species eucalypit forest. *Journal of Hydrology*, **94**: 215-236.

Lacey G.C., Grayson R.B. 1998 . Relating baseflow to catchment properties in south-estern Australia. *Journal of Hydrology*, **204**: 231-250.

Lepoldo P.R., Franken W.K., Villa Nova N.A. 1995. Real evapotranspiration and transpiration through a tropical rain forest in central Amazônia as estimated by the water balance method. *Forest Ecology and Management,* **73**: 185-195.

Lima W.P. 1993. *Impacto ambiental do eucalipto*. São Paulo, EDUSP, 302 p.

Lima W. P. 2004. *Manejo de Micro-bacias Hidrográficas*. USP. Piracicaba disponível no site: http://lcf.esalq.usp.br/lhf/

Maestre F.T., Cortina J. 2004. Are Pinus halepensis plantations useful as a restoration tool in semiarid Mediterranean areas? *Forest Ecology and Management*, **198**: 303-317.

Mapa R.B. 1995. Effects of reforestation using Tectona grandis on infiltration and soil water retention curve. *Forest Ecology and Management*, **77**: 119-125.

Mathys N., Meunier M., Brochot S. 1996. *The forest effect on floods in small mountainous catchments: some results from experimental catchments of Draix, France*.

Paris. UNESCO.123-138 (Technical document in Hydrology n.14).

McCulloch J.S.G., Robinson M. 1993. History of forest hydrology. *Journal of Hydrology*, **150**: 189-216.

McGlynn B.L., McDonnel J. J., Brammer D. D. 2002 . A review of the evolving conceptual model of hillslope flowpaths at Mamai catchments, New Zealand, *Journal of Hydrology*, **257**: 1-26.

Molchanov A.A. 1960. *The hydrological role of forests*. Jerusalem, Translated from Russian. Israel Program for Scientific Translations, 407p..

Nyholm T., Rasmussen K.R., Christensen S. 2003. Estimation of stream flow depletion and uncertainty from discharge measurements in a small alluvial stream. *Journal of Hydrology,* **274**: 129-144.

Peck A.J., Williamson, D.R. 1987. Effects of forest clearing on groundwater. *Journal of Hydrology*, **94**: 47-65.

Pothier D., Prévost M., Auger I. 2003. Using the shelterwood method to mitigate water table rise after forest harvesting. *Forest Ecology and Management*, **179**: 573-583.

Roberts S., Vertessy R.A., Grayson R.B. 2001. Transpiration from Eucaliptus sieberi (L. Johnson) forests of different age. *Forest Ecology and Management*, **143**: 153-161.

Ruprecht J.K., Schofield N.J. 1989. Analysis of streamflow generation following deforestation in Southwest Western Australia. *Journal of Hydrology,* **105** (1/2): 1-17.

Sahin V., Hall, M.J. 1996. The effects of afforestation and deforestation on water yields. *Journal of Hydrology*, **178** : 293-309.

Schenk, H. J., Jackson, R.B. 2005 . Mapping the global distribution of deep roots in relation to climate and soil characteristics. *Geoderma* **136** (2): 129-140.

Scott D.F., Lesch W. 1997. Streamflow responses to afforestation with Eucalyptus grandis and Pinus patula and to felling in the Mokobulaan experimental catchments, South Africa. *Journal of Hidrology*, **199**: 360-377.

Scott D.F. 1993. The hydrological effects of fire in South African mountain catchments. *Journal of Hydrology*, **150**: 409-432.

Selby M.J. 1993 . *Hillslope Materials and Processes*. Oxford University Press, 451p.

Sharma M.L., Barron R.J.W., Williamson D.R. 1987. Soil water dynamics of lateritic

catchments as affected by forest clearing for pasture. *Journal of Hydrology*, **94**: 29-46.

Sikka A.K., Samra J.S., Sharda V. N., Samraj P., Lakshmanan V. 2003. Low flow and high flow responses to convert natural grassland into bluegum (Eucalyptus globules) in Nilgiris watersheds of South India, Journal of Hydrology, **270** (1-2): 12-26

Silbestein R., Adhitya A., Dabrowski C. 2003. *Changes in flood flows, saturated areas and salinity associated with forest clearing for agriculture.* Australia, Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology. 30 p.(Technical report 03/01).

Smakhtin V.U. 2001 . Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology*. **240**: 147-186.

Smith R.E., Scott D.F. 1992. The effects of afforestation on low flows in various regions of South Africa. ***Water SA***, **18** (3): 185-194.

Valente O. F., Gomes M, A. 2005 . *Conservação de nascentes – Hidrologia e Manejo de bacias hidrográficas de cabeceiras*. Viçosa, Ed. Aprenda Fácil, 210 p.

Vertessy R.A., Benyon R.G., O'Sullivan S.K., Gribben P.R. 1995. Relationships between stem diameter, sapwood area, leaf area and transpiration in a young mountain ash forest. *Tree Physiology,* **15**: 559-567

Vertessy R.A., Watson F., O'Sullivan S.K 2001. Factors determining relations between stand age and catchment water balance in mountain ash forest. *Forest Ecology and Management*, **143**: 13-26.

Vital, A.R.T., Lima W.P., Camargo, F.R.A. 1999. Efeitos do corte raso de plantação de Eucalyptus sobre o balanço hídrico, a qualidade da água e as perdas de solo e de nutrientes em uma microbacia do Vale do Paraíba, S.P. *Scientia Florestales*, **55**: 5-16.

Zhang L., Dawes W.R., Walker, G.R. 1999. *Predicting the effect of vegetation changes on catchment average water balance.* Australia, Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology. 42 p. (Technical Report 99/12).

Whitehead P.G., Robinson M. 1993. Experimental basin studies - an international and historical perspective of forest impacts. *Journal of Hydrology*, **145**: 217-230.