

Geoprocessamento como Ferramenta no Estudo de Correlação entre a Dinâmica da Cobertura Vegetal e a Evapotranspiração

Betânia Vilas Boas Neves, Bruno Rabelo Versiani

Centro de Pesquisas Hidráulicas - UFMG

betania.neves@copasa.com.br, versiani@ehr.ufmg.br

Paulo César Horta Rodrigues

Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - CDTN

pchr@cdtn.br

Recebido: 26/07/06 – revisado: 27/02/07 – aceito: 20/08/07

RESUMO

As modificações na cobertura vegetal de uma bacia têm impactos significativos nos processos hidrológicos e na qualidade de água dessa bacia. Para tentar avaliar esse impacto, no trabalho aqui apresentado adotou-se como objeto de estudo um trecho, com área de drenagem de 109 km², da sub-bacia do ribeirão Serra Azul – Minas Gerais. O período estudado compreende os anos de 1984 a 2002. As variações no comportamento hidrológico foram representadas pela evapotranspiração: componente do ciclo hidrológico considerada mais afetada pela alteração do tipo de cobertura da superfície. Neste estudo, a evapotranspiração foi estimada a partir do método do balanço hídrico e do método FAO Penman – Monteith. O estudo da dinâmica da cobertura vegetal foi feito a partir do mapeamento de imagens de satélite Landsat / TM espaçadas, em média, de 2 em 2 anos. Utilizou-se de técnicas de geoprocessamento para o tratamento dessas imagens com a finalidade de gerar, com o software SPRING, Mapas Temáticos de Cobertura Vegetal e Uso do Solo. Por fim, procuraram-se estabelecer correlações entre as variações no comportamento hidrológico e na dinâmica da cobertura vegetal da bacia, com base no parâmetro Floresta Densa. Com as informações disponíveis não foi possível estabelecer-se uma correlação, com nível de confiança razoável, entre essas duas variáveis. Entretanto, verificou-se com este estudo a importância das atividades de preservação ambiental que vem sendo desenvolvidas nessa bacia.

Palavras-chave: evapotranspiração; desmatamento; sensoriamento remoto.

INTRODUÇÃO

O recurso hídrico é de fundamental importância para o homem e, sendo a bacia hidrográfica a unidade hidrológica principal de uma região, é necessário que sejam feitos estudos para garantir o controle da ocupação dessas bacias e a preservação desse recurso tanto em termos de quantidade como de qualidade.

O papel desempenhado pela cobertura vegetal no processo de circulação da água é uma das questões mais controversas em hidrologia. Isso se deve à complexidade dos fenômenos envolvidos nas interações da água com o meio solo-vegetação-atmosfera, ou seja, durante os processos de interceptação e evapotranspiração. As dificuldades dos experimentos, que poderiam contribuir para ampliar os conhecimentos acerca do papel hidrológico das

florestas, são tais que a abordagem do tipo caixa-preta muitas vezes é aplicada sem uma análise dos processos hidrológicos no interior da bacia.

O estudo aqui apresentado pretende contribuir para melhor compreender os efeitos da modificação da cobertura vegetal no comportamento hidrológico da bacia do ribeirão Serra Azul (109 km²), especialmente no que diz respeito à evapotranspiração. Verifica-se, portanto, a relevância do trabalho aqui apresentado, não somente para os estudos hidrológicos, mas também para os estudos ambientais maneira geral.

Primeiramente, faz-se uma breve revisão da literatura relativa à hidrologia de florestas e sobre os métodos utilizados para estimativa da evapotranspiração. Em seguida apresenta-se a técnica de geoprocessamento utilizada para depois apresentarem-se o estudo de caso, a discussão dos resultados e as conclusões.

REVISÃO DA LITERATURA

Desde a antigüidade o homem vem tentando entender qual é a função exercida pelas florestas no ciclo hidrológico e na meteorologia. Segundo histórico traçado por Andréassian (2004), Plínio foi o primeiro a fazer alusão ao papel hidrológico das florestas em seu trabalho *Natural History*, escrito no primeiro século d.C. Nesse trabalho ele afirmava que, muitas vezes, depois da derrubada de florestas, cursos d'água temporários e violentos se formavam.

Embora observações sobre o possível impacto das florestas no ciclo hidrológico sejam antigas, esse assunto passou a ser mais discutido durante o século XIX, na França. Antes da Revolução Francesa de 1789, alguns naturalistas já tinham suas opiniões, mais ou menos românticas, a respeito da influência das florestas no clima e nos escoamentos das bacias. Com a revolução e o desaparecimento da autoridade do Estado iniciou-se uma onda de desflorestamento. Isso gerou uma preocupação considerável e duradoura, pois ao desmatamento foi associado o desaparecimento de água das nascentes (Andréassian, 2004).

O fato é que a preocupação com o desflorestamento vem à tona toda vez que uma nova enchente catastrófica ou uma seca ocorre em algum lugar do mundo. Foi a série de desastres ocorridos no final do século XIX nos Alpes, onde vilas foram inundadas e ocorreram vários deslizamentos que danificaram terras agrícolas pela deposição de sedimentos, que motivou o primeiro verdadeiro estudo em bacia, conforme afirmam McCulloch e Robinson (1993). Esse estudo foi realizado na região Bernese Enmental, na Suíça, e iniciou-se em 1900 (Engler apud McCulloch e Robinson, 1993). Com base na comparação entre a resposta hidrológica de duas bacias de 0,6 km², a Sperbelgraben (99% florestada) e a Rappengraben (69% de pasto e 31% de floresta), concluiu-se que as vazões de cheia e a produção de água eram menores e as vazões de base eram maiores em Sperbelgraben (Burger apud McCulloch e Robinson, 1993). Como consequência disso, o número de ocorrências de deslizamentos de terra foi bem menor nessa bacia florestada.

Depois disso, vários estudos foram então desenvolvidos, em todo o mundo, na tentativa de se explicarem os efeitos da vegetação na geração de vazões e na evapotranspiração. Hibbert (apud Bosch e Hewlett, 1982), reviu, em 1967, os resultados de 39 experimentos em bacias espalhadas pelo mundo e chegou à conclusão de que, em geral, a redução da cobertura de florestas aumenta a produção de água

mas a resposta ao tratamento é altamente variável e imprevisível.

Em 1980, Bosch e Hewlett (1982) adicionaram 55 novos experimentos com o propósito de atualizar a revisão de Hibbert (apud Bosch e Hewlett, 1982). A adição desses novos experimentos ao conjunto de informações existentes, porém, alterou muito pouco os resultados resumidos por Hibbert (1967). Com exceção de um caso, não houve experimentos nos quais uma redução de cobertura causasse a redução da vazão ou qualquer restituição da vegetação que levasse ao aumento da produção de água pela bacia.

Para permitir certa padronização dos estudos envolvendo o papel das florestas em bacias experimentais McCulloch e Robinson (1993) sintetizaram os métodos em três tipos principais: estudos de correlação realizados entre bacias distintas, estudos em uma única bacia e estudos em bacias experimentais geminadas.

O último método, baseado no estudo de pares de bacias geminadas, foi considerado por Andréassian (2004) como o único método capaz de identificar o verdadeiro papel da cobertura de florestas. Isso porque ele possui a vantagem de evitar os dois maiores problemas inerentes aos experimentos não controlados, que são a variabilidade climática e a variabilidade das características físicas entre as bacias. O método que leva em conta uma única bacia pode ser problemático para se interpretar devido à variabilidade climática natural da bacia. Nos projetos comparando duas bacias distintas é praticamente impossível fazer distinção entre o impacto devido às alterações de uso da terra e a variabilidade natural do comportamento das bacias.

O primeiro estudo da influência das florestas no suprimento de água utilizando-se de bacias experimentais geminadas foi realizado por Bates e Henry (apud Andréassian, 2004; Bosch e Hewlett, 1982; Fritsch, 1995; McCulloch e Robinson, 1993) no período compreendido entre 1910 e 1926, nas montanhas do Colorado em Wagon Wheel Gap (E.U.A). Para realização desse estudo foram selecionadas duas bacias florestadas, próximas e com área menor que 1 km².

Recentemente, uma nova síntese de resultados publicados de estudos em bacias experimentais geminadas foi realizada por Andréassian (2004) seguindo, parcialmente, a forma clássica de apresentação definida por Bosch e Hewlett (1982). Foram adicionados os resultados publicados nos 20 anos seguintes, chegando a um total de 137 experimentos em pares de bacias, sendo 115 referentes a desmatamentos e 22 relativos ao reflorestamento.

Ao confrontar os resultados dos 137 experimentos em pares de bacias, Andréassian (2004) concluiu que o consumo de água pelas florestas é geralmente maior que o de outros tipos de vegetação. Conseqüentemente, o desflorestamento resulta no acréscimo da produção de água enquanto o reflorestamento resulta na sua diminuição. No entanto, não se sabe ao certo as consequências do envelhecimento das florestas ou da densificação da cobertura de florestas na escala da bacia.

O método em que se estuda uma única bacia normalmente tem como objeto de estudo bacias com áreas da ordem de centenas de quilômetros quadrados. No entanto, normalmente, devido ao tamanho dessas bacias, as modificações na utilização do solo afetam apenas parte de sua área. Essas partes costumam não ser bem caracterizadas, dificultando a obtenção das relações de causa e efeito (Fritsch, 1995). Existe uma maior dificuldade em se controlar o tratamento (alteração aplicada à cobertura vegetal), em se estimar a precipitação e em se medir a vazão exutória com acurácia para bacias maiores. Associado a isso, o custo de um experimento controlado é muito alto.

Todos esses fatores acima mencionados fazem com que a maior parte dos experimentos realizados em grandes bacias sejam baseados em análises de tendência no tempo, usando as séries históricas existentes (Bosch e Hewlett, 1982). Esse é o caso do trabalho aqui apresentado.

MATERIAL E MÉTODOS

O Mapa da Figura 1 mostra a localização da bacia do ribeirão Serra Azul (objeto do estudo), que pertence à Bacia Representativa de Juatuba, na bacia do Alto São Francisco, em Minas Gerais.

Estimativa da evapotranspiração

Medir a evapotranspiração não é tarefa fácil, pois os métodos costumam ser caros, exigem precisão nas medições e só são eficientes quando explorados por especialistas no assunto.

A estimativa do balanço hídrico da bacia de Serra Azul, assim como da evapotranspiração de referência (ET_0) nessa bacia, calculada a partir do método FAO Penman-Monteith, foram realizadas utilizando-se das séries históricas fornecidas pela Agência Nacional de Águas – ANA.

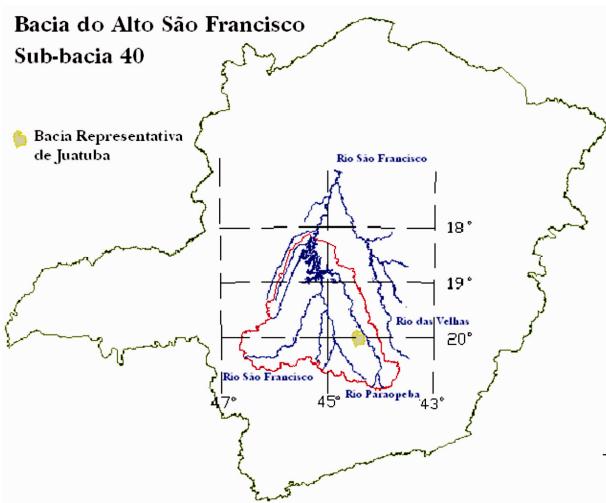


Figura 1 - Localização da Bacia Representativa de Juatuba na sub-bacia do Alto São Francisco - MG.

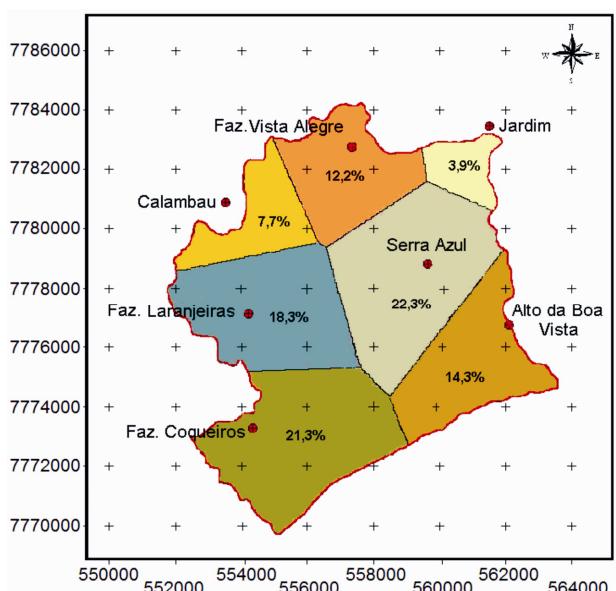


Figura 2 - Mapa de localização das estações pluviométricas na bacia do ribeirão Serra Azul com as respectivas áreas de influência na bacia.

Todas as estações escolhidas para a realização deste estudo são de responsabilidade da ANA e são operadas pela Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais - CPRM. A localização dessas estações na bacia é mostrada nas Figuras 2 e 3.

Método do Balanço Hídrico

Neste trabalho, empregou-se o método do balanço hídrico para obter, indiretamente, a evapotranspiração ocorrida na bacia do ribeirão Serra Azul. Esse método foi escolhido porque as variáveis envolvidas no balanço refletem todos os fatores que influenciam no comportamento hidrológico da bacia, sem que seja necessário explicitá-los. Entre os principais fatores encontram-se o clima, a geologia, as características topográficas e do solo, assim como a sua forma de ocupação.

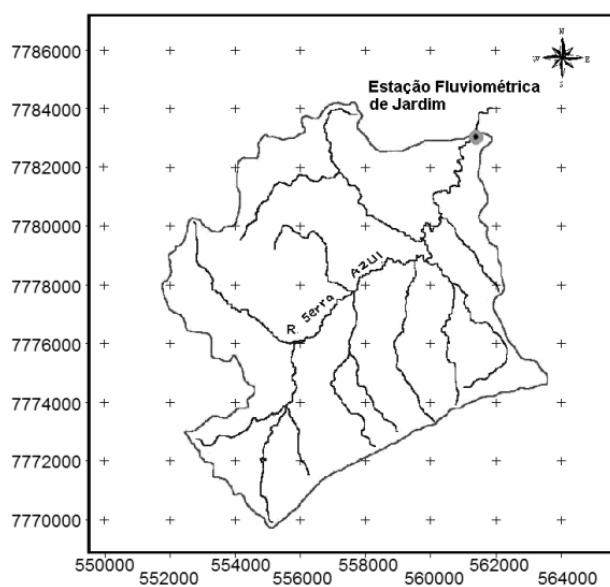


Figura 3 - Mapa da bacia do ribeirão Serra Azul com exutória na estação fluviométrica de Jardim.

A equação do balanço hídrico, usada para se estimarem as perdas de água do solo vegetado através da evapotranspiração em uma bacia, pode ser escrita como se segue

$$ET = P - Q - \Delta S \quad (1)$$

onde ET , P , Q e ΔS são, respectivamente, a evapotranspiração, a precipitação, o escoamento de base, Q_b , na seção exutória da bacia. Partindo-se dessa consideração, a variação do acúmulo de água na bacia foi

Para estimativa da variação do acúmulo de água na bacia considerou-se que, no período de estiagem, devido a não ocorrência das chuvas, existe apenas a contribuição do escoamento de base, Q_b , na seção exutória da bacia. Partindo-se dessa consideração, a variação do acúmulo de água na bacia foi

calculada sustentando-se no fato de que a depleção da água no período de estiagem do ano hidrológico tende a seguir a lei exponencial, como pode ser visto em Singh (1992).

A expressão do decaimento exponencial é dada por:

$$Q_b = Q_{b0} \cdot e^{-k(t-t_0)} \quad (2)$$

onde Q_{b0} é a vazão de base no tempo de referência $t = t_0$ e k é o coeficiente de recessão, com dimensão de tempo⁻¹.

Foram plotados os hidrogramas para os anos civis e ajustou-se um modelo exponencial à cauda de recessão de cada um deles. Desse modelo extraíram-se os parâmetros Q_{b0} e k , permitindo, via extração da tendência exponencial, a definição da Q_b do último dia do ano hidrológico.

De posse da Q_b de 30 de setembro do ano em questão e do parâmetro k e, adotando-se o modelo linear simples de representação da contribuição do lençol subterrâneo para a calha do rio representado pela Equação 3 (Singh, 1992):

$$Q_b = k \cdot Vol_b \quad (3)$$

foi possível calcular Vol_b , que nesse caso é o volume de água armazenado subterraneamente na bacia ao final do ano hidrológico. A diferença entre o Vol_b de um ano e do ano anterior resulta na variação do acúmulo de água na bacia do ano em questão.

Método FAO Penman-Monteith

O Método FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998) é um método semi-empírico que possibilita estimar a evapotranspiração potencial de uma superfície de referência bem definida utilizando-se de dados meteorológicos.

O método FAO Penman-Monteith foi escolhido porque incorpora parâmetros fisiológicos e aerodinâmicos das plantas. Esse método superou falhas dos métodos FAO Penman anteriores e oferece valores mais consistentes com dados de uso real de água pelas culturas em todo o mundo. Além disso, é recomendado por apresentar forte probabilidade em predizer corretamente a evapotranspiração de referência (ET_0) para diferentes localizações e climas e, para regiões que apresentam escassez de dados (Allen et al., 1998).

O método FAO Penman-Monteith para estimativa da ET_0 , é dado pela expressão a seguir:

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (4)$$

na qual

ET_0 = evapotranspiração da cultura de referência [mm/dia];

R_n = radiação líquida da superfície da cultura [MJ/ (m².dia)];

G = densidade de fluxo de calor do solo [MJ/ (m².dia)];

T = temperatura média diária do ar à altura de 2 m [°C];

u_2 = velocidade do vento à 2 m de altura [m/s];

e_s = pressão de vapor de saturação [kPa];

e_a = pressão de vapor real [kPa];

$(e_s - e_a)$ = déficit de pressão de vapor de saturação [kPa];

Δ = declividade da curva de pressão de vapor [kPa/°C];

γ = constante psicrométrica [kPa/°C].

No estudo aplicado à bacia do ribeirão Serra Azul, a evapotranspiração de referência (ET_0), estimada com base nos dados meteorológicos da estação Alto Boa Vista, foi comparada à evaporação medida no tanque evaporimétrico existente nessa mesma estação e à evapotranspiração estimada por meio do balanço hídrico (ET).

Geração dos mapas temáticos de cobertura vegetal e uso do solo

O Processamento Digital de Imagem - PDI é o conjunto de técnicas aplicadas às imagens de sensoriamento remoto que tem o objetivo de facilitar a extração de informação dessas imagens. Crósta (1992) aponta que, apesar da enorme capacidade do sistema visual humano de identificar padrões, ele não é capaz de processar o volume de informações existente em uma imagem. Ademais, os processos de aquisição, transmissão e visualização de imagens ocasionam vários tipos de deformações que devem ser corrigidas.

Antes de iniciar o processo de tratamento digital de imagens propriamente dito, deve ser realizado um pré-processamento. Esse pré-processamento consiste no recorte da área de interesse, no emprego de técnicas de realce da imagem (aumento do contraste), de correção geométrica e registro e, muitas vezes, emprega-se também a técnica de correção radiométrica de imagens. Todas essas técnicas objetivam a melhoria da qualidade dos

dados. Dependendo da finalidade da imagem, é necessário realizar também a correção atmosférica dessa imagem.

Entretanto, em sensoriamento remoto, o objetivo maior do processamento digital de imagens é extraer informações de ocupação do solo via categorização automática de todos pixels contidos numa cena, com base nas diferenças de níveis de cinza ou cor (classificação de imagens). Classificar significa identificar e rotular o alvo correspondente à informação espectral coletada pelo sistema sensor de determinado satélite ou equipamento (Moreira, 2003).

Assim, por meio de técnicas computacionais, o processamento digital de imagens faz com que as informações radiométricas contidas nas imagens sejam mais facilmente discrimináveis pelo analista e, consequentemente, facilita a extração de informações da imagem sobre os fenômenos ou objetos do mundo real. O objetivo final da classificação é o mapeamento, por meio do qual a imagem é convertida em um mapa temático, que neste estudo será um Mapa de Cobertura Vegetal e Uso do solo. De posse do mapa é possível que se faça geometria de mapas e cálculos diversos.

Neste estudo foram selecionadas 11 imagens Landsat para representar os anos de 1984, 1986, 1987, 1989, 1991, 1993, 1995, 1997, 1999, 2001 e 2002. As técnicas aplicadas no processamento digital dessas imagens encontram-se detalhadas a seguir. O software utilizado para aplicação dessas técnicas foi o SPRING (2001), desenvolvido pelo INPE, com seus módulos (IMPIMA, SCARTA e IPLOT).

Recorte da área de interesse

Para diminuir o tamanho do arquivo e, consequentemente, o tempo de processamento computacional, as imagens foram recortadas segundo um retângulo envolvente que continha a área de estudo.

Realce

Para melhorar a qualidade visual das imagens digitais e permitir uma melhor identificação dos seus alvos é necessário que se aplique um realce. O tipo de realce aplicado foi a ampliação do contraste linear da cena.

Correção geométrica e registro

Esse processo compreende uma transformação geométrica que relaciona as coordenadas da imagem (linha, coluna) com as coordenadas de um

sistema de referência que pode ser obtido a partir de cartas topográficas da região ou utilizando-se de coordenadas obtidas, *in locu*, por um GPS (*Global Position Systems*) (Mello et al, 2003) para diferentes pontos de controle.

Os pontos de controle devem ser pontos característicos da região, de localização conhecida e que podem ser facilmente identificados na imagem digital. O número de pontos que se deve tomar para fazer o registro depende do nível de correção da imagem que se deseja. Essa correção, também chamada de georreferenciamento, deve ser realizada para atenuar as distorções das imagens devidas à movimentação do satélite (variações na velocidade e altitude do satélite) e ao ângulo de curvatura da Terra. Existe também a distorção do pixel imageado fora do nadir, ou seja, aquele cuja visada não foi perpendicular (Moreira, 2003).

A imagem de 2002 foi georreferenciada a partir de pontos de controle definidos por feições de cobertura vegetal que não sofreram alterações ao longo dos anos. Identificar os mesmos pontos nas onze imagens selecionadas não foi tarefa simples. Feito isso, as coordenadas desses pontos foram obtidas no campo com auxílio do GPS, em coordenadas planas UTM e tendo como datum o SAD 69, ou extraídas de ortofotos da CEMIG (1990) em escala 1:10.000.

Normalização radiométrica relativa

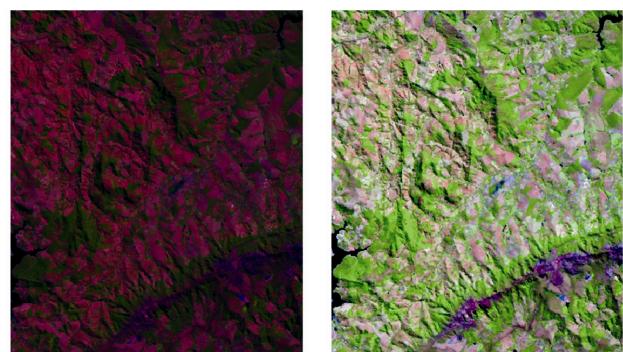
No caso do estudo aqui apresentado, que objetiva o mapeamento de áreas vegetadas, procurou-se uma composição colorida para ressaltar a vegetação. Para isso, associaram-se às bandas 3, 4 e 5 do Landsat TM as cores azul (B), verde (G) e vermelha (R), respectivamente. O resultado dessa combinação (R5, B4, G3), facilitou a separação dos diversos tipos de vegetação.

As técnicas de correção radiométrica de imagens incluem tanto as operações que visam apenas melhorar a visualização das imagens, como aquelas que visam normalizar os dados radiométricamente, de modo absoluto ou relativo.

A normalização radiométrica relativa, também chamada de retificação, foi aplicada nesse estudo. Conforme foi explicado por Moreira (2003), ela tem a função de ajustar as radiâncias contidas nas imagens, obtidas em diferentes datas pelo satélite, com o propósito de se obterem imagens com tonalidades similares, tendo como referência apenas uma das diversas passagens. Dessa forma, minimizam-se as contribuições do ambiente na refletância do alvo registrado pelo sensor. As diferenças no

comportamento espectral das imagens, identificadas no tempo e no espaço, passam a ser apenas devidas à interação entre o alvo e a energia eletromagnética nele incidente.

A Figura 4 mostra a imagem Landsat do ano de 2002 na sua forma original, ou seja, sem aplicação do realce (à esquerda) e após a normalização radiométrica relativa (à direita).



(a) Imagem 2002 sem realce **(b) Imagem 2002 ou Imagem de Referência**

Figura 4 - Imagem do Satélite Landsat TM (ano 2002) representada em composição colorida (R5, G4, B3) antes e após aplicação da normalização radiométrica relativa (retificação).

Segmentação

A segmentação de uma imagem é uma técnica que foi desenvolvida para ser aplicada antes da fase de classificação, como uma alternativa às limitações da classificação pixel a pixel. Como explicam Venturieri e Santos (1998), "essa técnica tem como abordagem agrupar pixels com características similares em termos tonais e texturais, formando regiões homogêneas, sendo essas submetidas ao processo de classificação".

Neste trabalho optou-se pela segmentação por crescimento de regiões, do SPRING. O algoritmo de segmentação por crescimento de regiões baseia-se nos pixels constituintes das regiões homogêneas definidas por um determinado critério de similaridade. O princípio básico é o agrupamento de pixels com características radiométricas semelhantes em regiões contínuas, resultantes da junção adequada de pixels vizinhos (Schoenmakers et al. apud Venturieri e Santos, 1998).

Antes de executar o segmentador por crescimento de regiões, o analista precisa indicar dois parâmetros: um limiar de similaridade e uma área. O limiar de similaridade é o valor máximo admitido para a diferença entre os tons de cinza dos pixels de um segmento, abaixo do qual duas classes são consideradas similares e agrupadas em uma região. A área define o número mínimo de pixels necessários para que uma área seja individualizada, ou seja, o tamanho mínimo que cada segmento pode possuir.

Foram feitos vários testes combinando valores de similaridade e de área. O parâmetro de área foi escolhido baseado no pequeno lago formado pelo ribeirão dos Freitas (canto inferior esquerdo da bacia de Serra Azul) que possui espelho d'água com área de aproximadamente 30.000 m². Ficou definido que essa seria a menor área na qual tinha-se interesse em individualizar. Sendo assim, o parâmetro área escolhido foi de 30 pixels que, no caso dos satélites Landsat TM – 5 e 7, corresponde a uma área de 27.000 m². A similaridade foi escolhida igual a 10 (para os tons de pixel variando de 0 a 255) com base em valores encontrados na bibliografia consultada e no conselho de especialistas da área de geoprocessamento.

Classificação

A classificação dos pixels que constituem uma imagem sensoriada remotamente envolve a associação de cada pixel da imagem a um rótulo com o objetivo de identificar e extrair informação da imagem sobre um fenômeno ou objeto do mundo real. É um problema de reconhecimento, no qual os valores numéricos associados a cada pixel são normalmente requeridos para serem identificados em termos do tipo de cobertura da superfície terrestre. Essa cobertura pode ser geográfica, geológica, a cobertura vegetal ou, até mesmo, tipos de nuvens ou classes de qualidade de água (Mather, 1987).

O método de classificação digital é dito supervisionado quando o analista possui o conhecimento da área em que se deseja trabalhar. Nesse caso, o método envolve duas fases distintas: o treinamento e a classificação propriamente dita.

Na fase de treinamento, são adquiridas as amostras que exercem a função de fornecer ao algoritmo computacional a descrição numérica dos vários tipos de cobertura do solo presentes na cena. O conhecimento prévio da área estudada permite a seleção de amostras de treinamento confiáveis.

Tendo sido treinados, os classificadores operam com base na distribuição de probabilidade

das amostras de cada classe selecionada (Adeniyi apud Venturieri e Santos, 1998). Durante a classificação da imagem cada pixel é, então, rotulado como pertencente à classe da qual sua característica espectral mais se aproxima.

O Método de classificação adotado denomina-se MAXVER. Esse método baseia-se no cálculo da distância estatística entre cada pixel e a média de níveis de cinza da classe previamente definida a partir das amostras de treinamento (Dutra et al. apud Venturieri e Santos, 1998, p.356).

A probabilidade de um dado pixel pertencer a uma das classes pré-definidas é calculada por uma função de probabilidade condicional $P(x/w_i)$, chamada verossimilhança de w_i em relação a x . Esse cálculo é realizado para o conjunto de classes que intervêm na classificação temática. A regra de decisão consiste em atribuir o pixel x à classe w_i cuja probabilidade condicional é máxima.

Pode-se dizer, portanto, que um pixel x é pertencente à classe w_i se:

$$P(x/w_1) > P(x/w_2) > \dots > P(x/w_3) \quad (5)$$

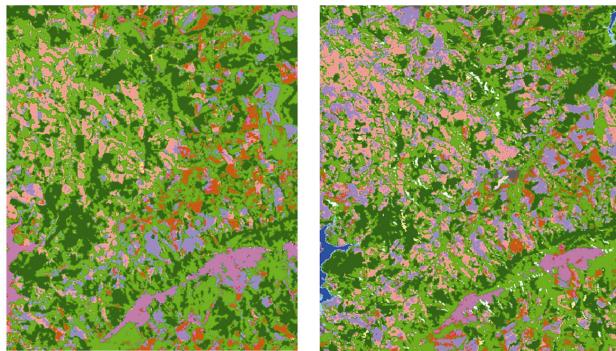
$$\text{e } P(x/w_1) > L$$

Sendo L o limiar de aceitação, que é utilizado para evitar que pixels com baixa probabilidade de pertencerem a uma determinada classe, sejam classificados nessa classe (Venturieri e Santos, 1998). No SPRING pode-se atribuir os seguintes valores para esse parâmetro: 75%, 90%, 95%, 99%, 99,9% e 100%.

Pós-classificação

A imagem resultante da classificação MAXVER normalmente apresenta um aspecto fortemente fragmentado devido à presença de pixels isolados dentro das classes. Isso ocasiona perda de uniformidade do mapa (Venturieri e Santos, 1998). Para diminuir a quantidade de pixels isolados, ou seja, fora de contexto no mapa, realizou-se a Pós-Classificação. Esse processo consiste na aplicação de um peso (P) aos pixels da imagem, que, no SPRING, pode variar de 1 a 7. Quanto menor o peso, maior o número de substituições realizadas. O peso adotado nesse trabalho para a pós-classificação das imagens foi igual a 2.

As imagens classificadas dos anos de 1989 e 2002, após a aplicação do peso 2 na pós-classificação, são apresentadas na Figura 5.



(a) Imagem classificada do ano de 1989. (b) Imagem classificada do ano de 2002.

Figura 5 - Imagens classificadas após a aplicação do peso 2 na pós-classificação.

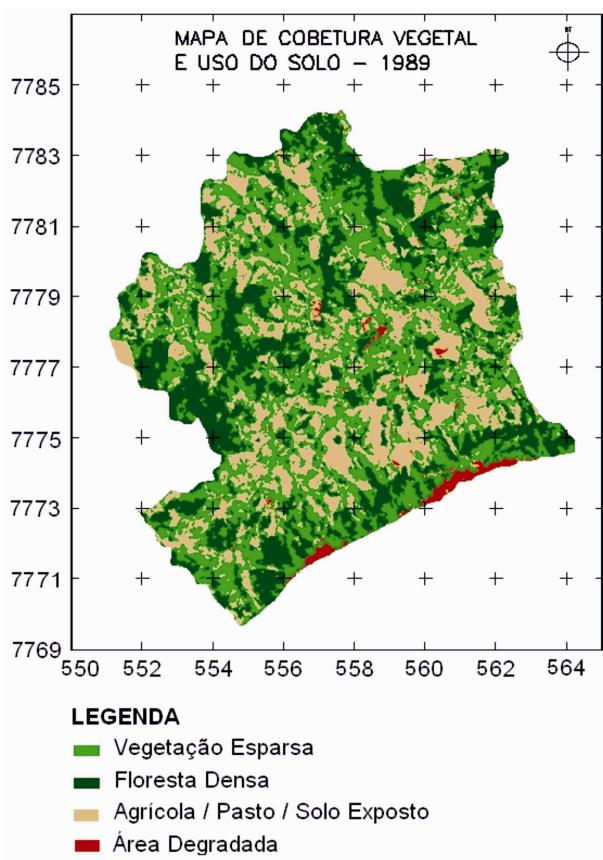


Figura 6 - Mapa temático de Cobertura Vegetal e Uso do Solo da Imagem de 1989 (L = 100% e P = 2).

Mapeamento

Completadas as classificações das imagens de 1989 e 2002 partiu-se, então, para geração dos

Mapas Temáticos de Cobertura Vegetal e Uso do Solo. O mapeamento dessas duas imagens foi feito para se ter uma quantificação da alteração ocorrida na forma de ocupação da bacia do ribeirão Serra Azul ao longo dos anos. O mapeamento permite que várias classes sejam agrupadas num mesmo tema, que será representado por uma determinada cor no mapa final, permitindo também a extração das porcentagens de área ocupadas por cada um dos temas de interesse.

Os Mapas de Cobertura Vegetal e Uso do Solo da bacia do ribeirão Serra Azul, extraídos das imagens de 1989 e 2002, são apresentados nas Figuras 6 e 7.

Foram encontradas muitas dificuldades para se gerarem esses 2 mapas. A principal dificuldade referiu-se à definição de amostras de treinamento confiáveis e, na quantidade exigida, para se obterem mapas que correspondessem à realidade de ocupação da bacia no período em que a imagem foi adquirida.

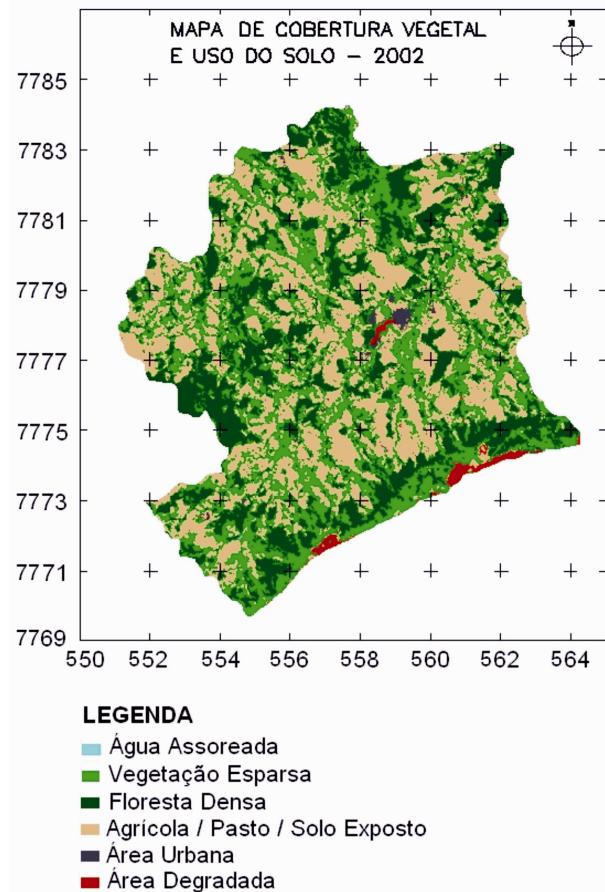


Figura 7 - Mapa temático de Cobertura Vegetal e Uso do Solo da Imagem de 2002 (L = 100% e P = 2).

Para os demais anos, não foi possível obter amostras para todas as classes identificadas, pois não foram localizados registros documentados com uma descrição detalhada do tipo de cobertura vegetal observado na bacia nesses anos. Percebeu-se, portanto, a inviabilidade de se produzir os nove mapas restantes seguindo a metodologia aplicada para as imagens de 1989 e 2002.

Visto que o principal objetivo desse trabalho era o de tentar correlacionar a variação da cobertura vegetal com a evapotranspiração ocorrida na bacia de 1984 a 2002, pensou-se que um bom parâmetro seria estimar apenas a variação da cobertura vegetal mais densa, aqui denominada Floresta Densa.

Como afirmou Cosandey (1995), comparando-se a vegetação florestal com a vegetação baixa e ainda com o solo nu, geralmente, ela apresenta um maior potencial de reserva hídrica. Além disso, conforme o mesmo autor, a interceptação e a evaporação direta da precipitação sobre a copa das árvores em ambientes florestais devem ser consideráveis.

No caso específico da Floresta Densa, o problema de aquisição das amostras para todas as imagens foi contornado porque, utilizando-se as bandas 3, 4 e 5 com o realce aplicado às imagens, e pela própria conformação da vegetação desse porte, as amostras eram de fácil identificação visual. Para a classificação propriamente dita foi necessária a utilização, também, da banda 1 (Neves, 2005).

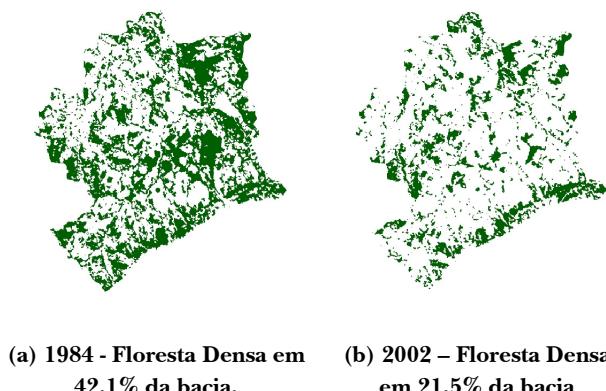


Figura 8 - Mapas de Floresta Densa extraídos por meio da classificação MAXVER com limiar de aceitação $L = 95\%$ e Pós-Classificação com peso $P = 2$.

A classificação das imagens, baseando-se apenas na classe Floresta Densa, foi, portanto, realizada para todas as onze imagens. Excetuando-se a

imagem de 1989 que teve suas amostras selecionadas com base nas ortofotos da CEMIG (1990), as amostras de Floresta Densa adquiridas com base na imagem de 2002, que se mostraram de boa qualidade, foram aproveitadas para classificar as demais imagens. Auxiliados pela estatística das amostras escolharam-se, para cada ano, aquelas que representavam bem a classe como amostras de treinamento.

Neste artigo apresenta-se apenas o resultado do mapeamento da Floresta Densa na bacia do ribeirão Serra Azul feito com base nas imagens de 1984 e 2002 (Figura 8). Os Mapas de Floresta Densa com limiar de aceitação, L , igual a 95% e peso, P , aplicado igual a 2 foram os que mais se aproximaram dos Mapas de Cobertura Vegetal e Uso do Solo ($L = 100\%$ e $P = 2$), mostrados nas Figuras 6 e 7.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O objetivo principal deste trabalho, apresentado através de um estudo de caso, foi mostrar duas técnicas distintas: primeiramente a estimativa da evapotranspiração de referência, pelo método FAO Penman-Monteith e, em seguida a técnica de geoprocessamento, por meio do Processamento Digital de Imagens. Entretanto, numa visão de conjunto deste trabalho, o geoprocessamento foi utilizado como uma ferramenta poderosa para estudo da evolução temporal da cobertura vegetal da bacia hidrográfica, tentando-se correlacioná-la à evapotranspiração estimada, no período de 1984 a 2002.

Para a estimativa da evapotranspiração de referência (equação 4), ao longo do período de estudo, foram usados os seguintes dados meteorológicos observados na estação Alto Boa-Vista: temperatura máxima e mínima diárias, temperatura do bulbo seco, temperatura do bulbo úmido, velocidade do vento a 2 m. de altura e duração real de insolação diária. Os outros dados usados na equação foram tirados de tabelas, em função da localização e altitude da estação climatológica (Neves, 2005).

Comportamento hidrológico da bacia

Aplicando-se o balanço hídrico à bacia do ribeirão Serra Azul verificou-se que a precipitação total anual dessa bacia varia em torno da média de 1476 mm. A vazão média anual estimada para a estação fluviométrica de Jardim é de $1,55 \text{ m}^3/\text{s}$, que corresponde a um deflúvio anual de 448 mm. Aten-

tando-se para o fato de que a variação do acúmulo de água nessa bacia foi, em média, nula para os anos compreendidos entre 1984 e 2002, obtém-se um balanço de 1028 mm de evapotranspiração anual na bacia, que corresponde a 70% do total precipitado.

Comparando-se as variáveis hidrológicas ao longo dos anos, constatou-se que os maiores deflúvios anuais observados na bacia do ribeirão Serra Azul coincidiram com as maiores alturas de chuva. De forma semelhante, os anos em que a precipitação foi mais baixa resultaram em deflúvios anuais menores, notadamente no ano de 2001. Como era de se esperar, essas observações indicaram que havia uma correlação direta entre a precipitação e o deflúvio anual, que pode ser equacionada por uma reta com bom coeficiente de determinação ($R^2 = 0,86$), conforme mostra a Figura 9.

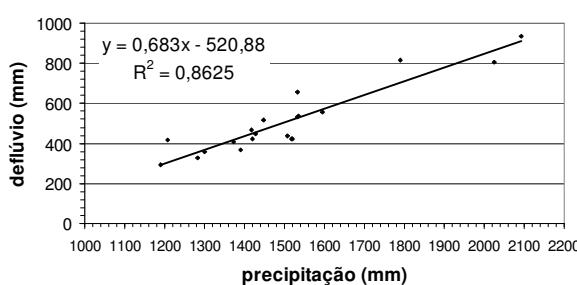


Figura 9 - Correlação entre o deflúvio e a precipitação total anual na bacia do ribeirão Serra Azul.

Verificou-se, também, que a vazão de base (Q_b) na seção exutória dessa bacia é diretamente influenciada pela chuva ocorrida no ano hidrológico correspondente, como pode ser visto na Figura 10.

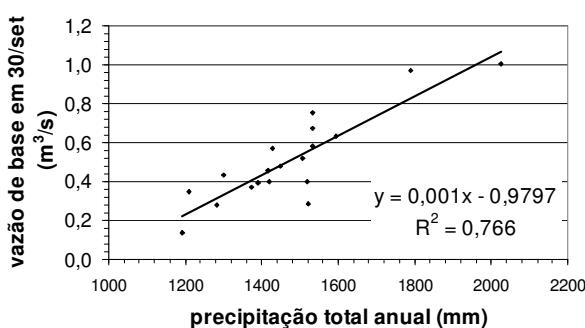


Figura 10 - Correlação entre a vazão de base do último dia do ano hidrológico (30 set) e a precipitação total anual na bacia do ribeirão Serra Azul.

Observou-se ainda que, mesmo não havendo ocorrência de chuva durante o período de estiagem, a vazão medida na exutória da bacia durante esse período sofre influência do volume precipitado no início do ano hidrológico. Outra causa para a variação dessa vazão pode estar associada à variação natural da liberação da reserva de água da bacia.

Entretanto, a tendência esperada de diminuição das vazões de base ao longo dos anos, causada pela diminuição da infiltração, não pode ser comprovada estatisticamente. Isso ocorreu, provavelmente, porque uma série com 19 anos de dados pode ser pequena para se tratar da evolução temporal de um processo tão complexo (Neves, 2005).

O tratamento dos dados meteorológicos da estação de Alto Boa Vista indicou que na bacia do ribeirão Serra Azul a temperatura média do ar oscila entre a máxima de 22 °C e a mínima de 15 °C e umidade relativa varia em torno dos 70%. A velocidade média do vento medida a dois metros do chão é de aproximadamente 0,4 m/s.

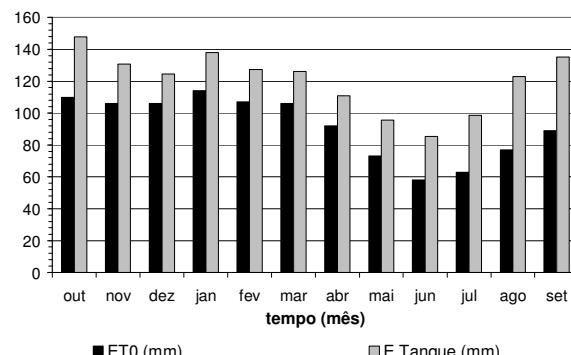


Figura 11 - Variação dos valores médios mensais da evapotranspiração de referência (ET_0) e da evaporação no tanque evapotimétrico (E_{Tanque}), obtidas a partir dos dados da Estação de Alto Boa Vista.

Examinando-se as evapotranspirações médias mensais estimadas aplicando-se o método FAO Penman-Monteith nos dados meteorológicos da estação de Alto Boa Vista (ver Figura 2) conclui-se que, apesar de não haver grandes alterações na temperatura da bacia do ribeirão Serra Azul, o período de maior evapotranspiração é justamente aquele no qual foram registradas as maiores temperaturas (período chuvoso compreendido entre outubro e março). Isso confirma a hipótese de que essa variável exerce um papel fundamental no processo de evapotranspiração. A evaporação medida no tanque evapotimétrico da estação climatológica de Alto Boa Vista também apresentou valores maiores no período

do chuvoso, como pode ser visto na Figura 11 (Nunes, 2005).

Dinâmica da cobertura vegetal

A bacia do ribeirão Serra Azul constituía-se, originalmente, de vegetação típica do cerrado, mas, ao longo das últimas décadas, os cerrados vêm dando lugar, cada vez mais, às atividades agrícolas, de pecuária, de mineração e outras.

A idéia inicial deste trabalho era de realizar o mapeamento completo de todas as onze imagens escolhidas, aproximadamente de dois em dois anos, no período compreendido entre 1984 e 2002 com a pretensão de se estabelecer as alterações na forma de ocupação da bacia do ribeirão Serra Azul. Entretanto, várias dificuldades foram encontradas, conforme mencionado anteriormente, impedindo que isso fosse realizado.

Dentro das possibilidades deste trabalho, o processo de tratamento digital das imagens permitiu que fossem realizados dois mapas completos (para os anos de 1989 e 2002), denominados Mapas de Cobertura Vegetal e Uso do Solo, e mais onze mapas (um para cada uma das imagens selecionadas) nos quais foi possível quantificar a área ocupada pela vegetação mais densa, aqui denominada Floresta Densa.

Analizando-se o Mapa Temático de Cobertura Vegetal e Uso do Solo relativo ao ano de 1989 (Figura 6) verificou-se que já havia uma porcentagem significativa de Solo Exposto / Pasto / Área Agrícola (28,26%) na bacia. As áreas vegetadas eram ocupadas, em sua maioria, por Vegetação Esparsa (43,58%) e as áreas de Floresta Densa representavam pouco mais de $\frac{1}{4}$ da bacia (26,48%). Não havia grandes corpos d'água dentro dos 109 km² pertencentes à bacia; existiam apenas alguns pântanos e pequenos lagos. A Área Urbana ainda se apresentava com características rurais não sendo, portanto, identificada nesse mapeamento. As Áreas Degradadas por mineração, no interior da bacia, ocupavam cerca de 1,8 km² (1,69%).

Partindo-se para o Mapa Temático de Cobertura Vegetal e Uso do Solo do ano 2002 (Figura 7) verificou-se que houve um aumento na porcentagem de Solo Exposto / Pasto / Área agrícola (35,58%) da bacia. As áreas vegetadas sofreram uma redução, sendo que a maior perda ocorreu na Vegetação Esparsa, que passou a ocupar 37,59% da bacia. As áreas de Floresta Densa representam, atualmente, menos de $\frac{1}{4}$ da bacia (24,63%). Não há a presença de grandes corpos d'água em seu interior; existem apenas alguns pântanos e pequenos lagos que foram

identificados no mapeamento, mas que compõem uma área muito pequena. A Área Urbana se restringe a aproximadamente 1,1 km² (1%) e, a Área Degradada por mineração no interior da bacia sofreu uma aparente redução, passando a ocupar 1,3 km² (1,15%).

Comparando-se os dois mapeamentos foi possível concluir que houve uma transferência das perdas de área de Floresta Densa, Vegetação Esparsa e Área Degradada para o tema Solo Exposto / Pasto / Área Agrícola (ver Figura 12).

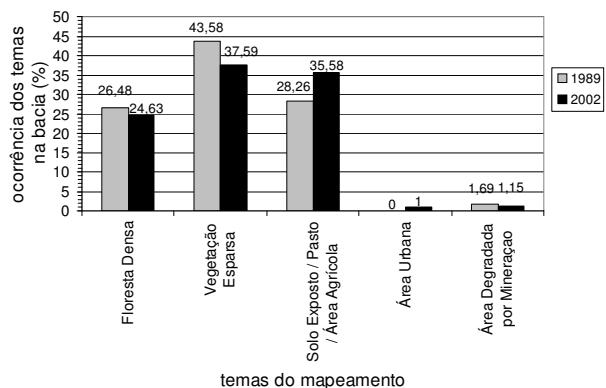


Figura 12 - Alteração na forma de ocupação da bacia do ribeirão Serra Azul detectada pelo mapeamento das imagens de 1989 e 2002.

A Figura 13 revela qual foi a alteração estimada por meio do mapeamento da área para a Floresta Densa na bacia do ribeirão Serra Azul. Analisando-se as porcentagens de áreas ocupadas pela Floresta Densa na bacia, ao longo dos anos estudados, não foi possível reconhecer um comportamento regular, mas apenas uma linha geral de tendência de sua redução.

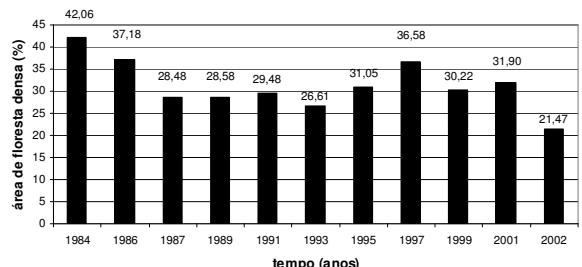


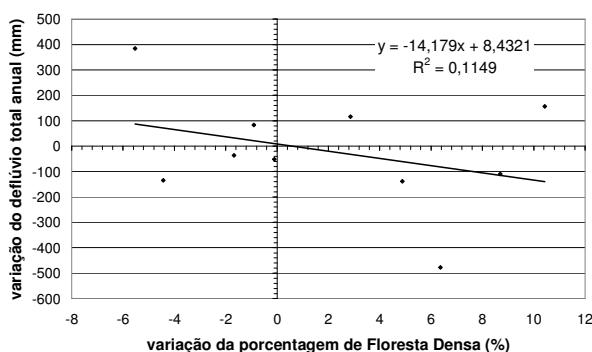
Figura 13 - Variação ao longo dos anos da porcentagem de ocorrência de Floresta Densa na bacia do ribeirão Serra Azul.

Todavia, comparando-se as áreas de Floresta Densa dos mapas específicos para essa classe e executando-se uma análise visual (qualitativa) é possível observar que a maior transformação ocorreu entre 1984 e 1987 (a área de Floresta Densa variou de 42% para 28%). Após esse período, as alterações na forma de ocupação da bacia podem ter se tornado mais estáveis devido à crescente fiscalização realizada pelos órgãos competentes.

A Figura 13 indica que houve um pico de ocorrência de Floresta Densa em 1997. Suspeita-se que esse pico tenha sido causado pelo excesso de chuva que caiu no início desse ano hidrológico, fazendo com que a vegetação se mantivesse mais vigorosa mesmo no período seco. Isso é reforçado pelo fato de que a imagem de 1997 foi adquirida em julho devido à inexistência de imagens de boa qualidade em agosto e setembro desse ano (Neves, 2005).

Estudos de correlação

A partir da revisão de estudos abordando a hidrologia de florestas, foi possível observar que esse é um tema muito polêmico no meio científico. Em alguns momentos, quando se comparam os vários estudos realizados nessa linha, a dispersão dos resultados é tão grande que chegam a ser contraditórios. Isso se deve à complexidade dos fenômenos envolvidos e à falta de investimento, principalmente no Brasil, para realização de estudos experimentais que forneçam resultados conclusivos no que diz respeito ao papel da cobertura vegetal na produção de escoamentos.



Em analogia com os estudos desenvolvidos por Bosch e Hewlett (1982) e Andréassian (2004)

procurou-se estabelecer uma correlação entre a variação da ocorrência de Floresta Densa na bacia do ribeirão Serra Azul, estimada dentro do período de 1984 a 2002, e as variações dos deflúvios totais anuais correspondentes. Entretanto, essa correlação não foi significativa, como pode ser visto na Figura 14.

A tendência de diminuição das vazões de base também não pode ser comprovada estatisticamente para o período que vai de 1984 a 2002. Além disso, a variação da porcentagem de ocupação da Floresta Densa ao longo do período estudado, na bacia do ribeirão Serra Azul, não aconteceu de forma drástica e concentrada. Sendo assim, no caso dessa bacia, não foi possível estabelecer, com base nos dados disponíveis, uma relação direta entre essas duas variáveis.

Em se tratando de evapotranspiração, mesmo tendo sido calculadas a partir de métodos completamente diferentes, a evapotranspiração do balanço (ET) e a evapotranspiração de referência (ET_0) apresentaram um comportamento muito coerente ao longo dos anos (Figura 15).

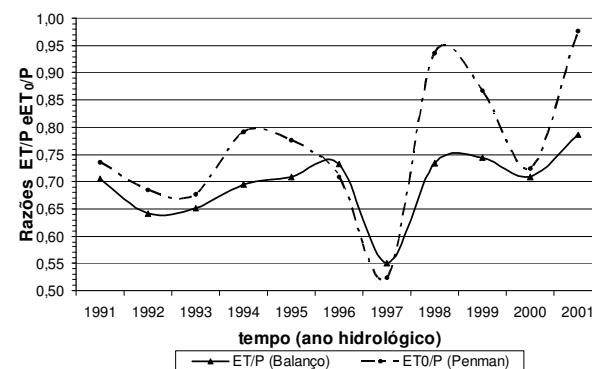


Figura 15 - Variação ao longo dos anos da evapotranspiração estimada pelo balanço hídrico (ET) e da evapotranspiração estimada pelo método FAO Penman - Monteith (ET_0), adimensionalizadas pela precipitação total ocorrida no ano (1991 - 2001).

Essa coerência resultou na correlação apresentada na Figura 16. Vale lembrar, entretanto, que a evapotranspiração de referência (ET_0) foi estimada com base apenas nos dados da estação de Alto Boa Vista, não tendo sido possível extrapolar a informação para toda a área da bacia. Essa estação era a única estação que possuía dados meteorológicos confiáveis na bacia e localiza-se no alto, próximo ao divisor de águas.

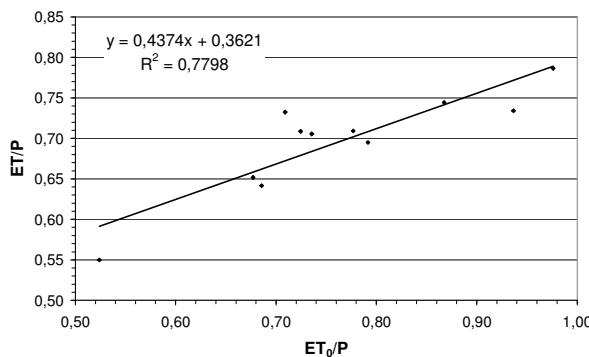


Figura 16 - Correlação entre a evapotranspiração estimada pelo balanço hídrico (ET) e a evapotranspiração estimada pelo método FAO Penman - Monteith (ET_0), admensionadas pela precipitação total ocorrida no ano (1991 - 2001).

Cosandey (1995) concluiu que, além da maior capacidade de reserva hídrica, a evapotranspiração é geralmente mais elevada em florestas que em outro tipo de cobertura vegetal. Mas não se sabe ao certo as consequências do envelhecimento ou da densificação das florestas na escala da bacia. O papel da interceptação da água pela vegetação é, no balanço, uma das questões menos resolvidas.

Baseando-se nessa afirmação procurou-se estabelecer uma correlação entre a variação da Floresta Densa, para cada dupla de imagens consecutivas, e a variação da evapotranspiração ocorrida na bacia do ribeirão Serra Azul. No caso dessa bacia, não foi possível estabelecer, com base nos dados disponíveis, uma relação direta entre essas duas variáveis, conforme mostra a Figura 17 (Neves, 2005).

CONCLUSÕES

O tratamento e a análise dos dados de precipitação e de vazão permitiram concluir que, na bacia do ribeirão Serra Azul, existe uma forte correlação entre o total anual precipitado e o deflúvio acumulado ao longo do ano hidrológico. A vazão de base, medida na exutória da bacia durante o período de estiagem, também sofre grande influência do volume precipitado no início do ano hidrológico.

Observou-se também uma forte correlação ($R^2 = 0,78$) entre a evapotranspiração estimada pelo balanço hídrico (ET) e a evapotranspiração de referência (ET_0) estimada pelo método FAO Penman – Monteith, quando essas variáveis foram admensio-

nalizadas pela precipitação ocorrida no ano correspondente, apesar de não ter sido possível estimar o valor espacial da última variável. Sugere-se que seja dada uma atenção especial às estações climatológicas, garantindo o funcionamento das existentes e ampliando a quantidade desse tipo de estação na rede hidrométrica.

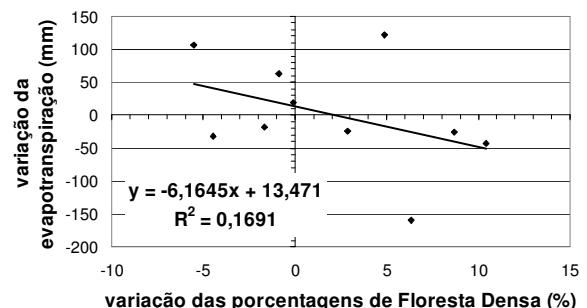


Figura 17 - Variação da evapotranspiração estimada a partir do balanço hídrico como função das variações na porcentagem da bacia ocupada por Floresta Densa.

Conforme já foi mencionado, a análise das evapotranspirações mensais estimadas pelo método FAO Penman - Monteith para a bacia do ribeirão Serra Azul indicou que, no período que vai de outubro a março, elas atingem valores mais elevados. Isso sugere que a temperatura é uma das variáveis que mais influenciam no processo de evapotranspiração.

As conclusões relacionadas ao mapeamento da bacia do ribeirão Serra Azul foram tiradas com base no processamento digital de imagens do satélite Landsat obtidas em período seco. As imagens obtidas nessa época do ano apresentam a vantagem de, normalmente, não possuírem nuvens sobre as áreas de interesse. Todavia, as alterações nas respostas dos alvos à energia eletromagnética neles incidente, devidas ao solo seco e às baixas temperaturas características dessa época do ano, devem ser consideradas durante a análise dessas imagens.

A comparação entre os Mapas de Cobertura Vegetal e Uso do solo dos anos de 1989 e 2002 indicou que, nesse período, a diminuição da Floresta Densa na bacia do ribeirão Serra Azul foi irrelevante (apenas 2% de perda). Comparando-se os Mapas de Floresta Densa constatou-se que a maior perda ocorreu entre os anos de 1984 e 1987, quando a área ocupada por esse tipo de vegetação diminuiu de 15 km², ou seja, 14% da área da bacia. Nesse mesmo

período, verificou-se uma diminuição simultânea, tanto na vazão de base quanto na vazão total anual e, um consequente aumento da evapotranspiração estimada pelo balanço hídrico. Nos demais períodos, não foi possível identificar correlações entre as alterações na cobertura vegetal e as alterações das variáveis hidrológicas estudadas.

A área da bacia ocupada por Vegetação Esparsa em 1989 chegava a quase 50% e passou, em 2002, a 38%. As áreas degradadas por atividade mineradora já representavam uma parcela muito pequena da bacia e ainda registraram uma perda que pode ser explicada por um maior controle dessa atividade. Observou-se que houve uma transferência de área de todas as demais classes temáticas, nas quais foram registradas perdas de área, para áreas de Cultivo Agrícola, Solo Exposto ou Pasto.

A desaceleração verificada no desmatamento da bacia do ribeirão Serra Azul se deve, provavelmente, às atividades de preservação desenvolvidas, principalmente após a implantação do reservatório de Serra Azul pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais - COPASA. Observando-se as imagens, verifica-se que houve forte regeneração da vegetação na área da reserva, localizada no entorno desse reservatório.

Acredita-se que o tamanho da bacia do ribeirão Serra Azul possa ter contribuído para impedir o estabelecimento de uma boa correlação entre as alterações na cobertura vegetal e o comportamento hidrológico da bacia. Talvez, se o estudo fosse feito em uma bacia menor e, consequentemente, mais homogênea, as correlações estabelecidas seriam melhores.

Além disso, acredita-se que, para se estudar o efeito do desmatamento (ou reflorestamento) no comportamento hidrológico, seria melhor que essa bacia tivesse sofrido uma alteração drástica na cobertura vegetal para que os efeitos pudessem ser notados em um prazo menor, visto que o período de 19 anos pode ter sido curto para se estabelecer uma correlação entre os fenômenos estudados neste trabalho.

Deve-se ressaltar, também, a importância de realização de visitas a campo para o melhor conhecimento do objeto de estudo. Especificamente quando se deseja realizar um mapeamento, a visita a campo é importante para disponibilizar um maior número de amostras que representem bem as classes temáticas escolhidas e, principalmente, para validar o mapeamento resultante.

Após todo o estudo realizado e a análise estatística dos dados, utilizada para correlacionar as variações na porcentagem de Floresta Densa com as

alterações no comportamento hidrológico da bacia do ribeirão Serra Azul, concluiu-se que esse tipo de cobertura vegetal não foi capaz, sozinho, de explicar as alterações observadas. O fato é que existem muitas variáveis que, além da cobertura vegetal, podem interferir no comportamento hidrológico de uma bacia. O número de arranjos entre as diferentes condições de clima, geologia, topografia, solo e outros fatores é tão grande que dificulta a obtenção de uma real estimativa desses impactos sobre as variáveis hidrológicas e sobre a qualidade da água. Esse fato, associado à escassez de dados disponíveis, dificulta enormemente o estabelecimento das relações de causa e efeito. Ainda assim, sugere-se que sejam feitos estudos de análise multivariada entre as diversas variáveis envolvidas no processo hidrológico, visando uma melhor compreensão do papel dessas variáveis no fluxo de volumes de água da superfície terrestre.

AGRADECIMENTOS

À CAPES e ao CNPq pelas bolsas de Mestrado, ao INPE pelo fornecimento das imagens de satélite Landsat TM e à ANA e CPRM pelo fornecimento dos dados hidrológicos.

REFERÊNCIAS

- ADENIYI, P. O. *Digital analysis of multitemporal Landsat data for land-use/land-cover classification in semi-arid área of Nigéria*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 51, n. 11, p. 1761-1774, 1985.
- ALLEN, Richard G.; PEREIRA, Luis S.; RAES, Dirk; SMITH, Martin. *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) - Irrigation and drainage, 56, 1998. Não paginado.
- ANDRÉASSIAN, Vazken. *Waters and forests: from historical controversy to scientific debate*. Journal of Hydrology, v. 291, p. 1-27, 2004.
- BATES, C. G.; HENRY, A. J. Forest and streamflow experiment at Wagon Wheel Gap, Colorado. Monthly Weather Review Supplement, v. 30, p. 1-79, 1928.
- BOSCH, J. M.; HEWLETT, J. D. *A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration*. Journal of Hydrology, v. 55, p. 3-23, 1982.

- BURGER, H. *Einfluss des Waldes auf den Stand der Gewässer. II. Mitteilung. Der Wasserhaushalt im Sperbel - und Rappengraben von 1915/16 bis 1926/27.* Mitt. Eidg. Anst. Forstl. Versuchswes, 18: p. 311-416, 1934.
- COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS - CEMIG. *Levantamento Aerofotogramétrico.* Minas Gerais, 1990. Ortofoto. 1:10.000. Folhas (IGARAPÉ): 42-03-05; 42-03-06; 42-03-09; 42-03-10; 42-03-13.
- COSANDEY, C. *La forêt réduit-elle l'écoulement annuel?* Annales de géographie, n. 581-582, p. 7-25, 1995.
- CRÓSTA, Álvaro Penteado. *Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto.* Campinas: IG/UNICAMP, 1992. 170 p.
- DUTRA, L. V.; SOUZA, R. C. M.; MITSUO II, F.A.; MOREIRA, J. C. *Análise automática de imagens multiespectrais.* São José dos Campos: INPE, 1981. 40 p.
- ENGLER, A. *Untersuchungen über den Einfluß des Waldes auf den stand der Gewässer.* Kommissionsverlag Beer, Zürich, 1919, 626 p.
- FRITSCH, J. M. *Occupation des sols et régimes hydrologiques: les enseignements de bassins versants guyanais.* Annales de Géographie, n. 581-582, p. 26-63, 1995.
- HIBERT, A. R. *Forest treatment effects on water yield.* In: W. E. Sopper and H. W. Lull (Editors), Int. Symp. For. Hydrol., Pergamon, Oxford, 813 p., 1967.
- MATHER, Paul M. *Computer processing of remotely-sensed images: an introduction.* 1. ed. New York: John Wiley & Sons Inc, 1987. 352 p.
- McCULLOCH, James S. G.; ROBINSON, Mark. *History of forest hydrology.* Journal of Hydrology, v. 150, p. 189-216, 1993.
- MELLO, Eliana Maria Kalil; MOREIRA, José Carlos; SANTOS, João Roberto dos; SHIMABUKURO, Yosio Edemir; DUARTE, Valdete; SOUZA, Íris de Marcelhas; BARBOSA, Cláudio Clemente; SOUZA, Ricardo Cartaxo Modesto de; PAIVA, João Argemiro de Carvalho. *Técnicas de modelo de mistura espectral, segmentação e classificação de imagens TM-Landsat para o mapeamento do desflorestamento da Amazônia.* In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, XI, 2003, Belo Horizonte. Anais... São José dos Campos: INPE, 2003. p. 2807-2814.
- MOREIRA, Maurício Alves. *Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação.* 2 ed. Viçosa: UFV, 2003. 307 p.
- NEVES, Betânia Vilas Boas. *Geoprocessamento como ferramenta no estudo de correlação entre a dinâmica da cobertura vegetal e a evapotranspiração na bacia do ribeirão Serra Azul – MG.* Dissertação apresentada ao programa de pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 211 p.
- SHOENMAKERS, R. P. H. M.; WILKILSON, G. G.; SHOAUTEN, T.E. *Segmentation of remotely-sensed images: a redefinition for operacional applications.* In: INTERNACIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS'91), 1991, Espoo. Proceedings... (S.l.:s.n.), v.1, p. 1087-1090.
- SHUTTLEWORTH, W. James. *Evaporation.* In: MAIDMENT, David R. (Ed.) *Handbook of Hydrology.* New York: Mc Graw-Hill, 1992. cap. 4, p. 4.1-4.53.
- SINGH, Vijay P. *Elementary Hydrology.* New Jersey: Prentice-Hall, 1992. cap. 9, p. 269-327.
- SPRING: software livre. Versão 4.0. São José dos Campos: INPE, 2001.
- VENTURIERI, Adriano; SANTOS, João Roberto dos. *Técnicas de classificação de imagens para análise de cobertura vegetal.* In: ASSAD, Eduardo Delgado; SANO, Edson Eyji. (Ed.) *Sistemas de Informações Geográficas: aplicação na agricultura.* 2. ed. rev. e aum. Brasília: Embrapa - SPI / Embrapa - CPAC, 1998. cap. 18, p. 351-371.

Geoprocessing as a Tool in the Study of Correlation Between the Dynamics of Plant Cover and Evapotranspiration

ABSTRACT

Changes in the plant cover of a watershed have significant impacts on the hydrologic processes and river water quality of the drained area. Attempting to evaluate this impact, this paper presents a case study referring to a 109 km² drainage area, corresponding to the Serra Azul river in Minas Gerais. The study period is from 1984 to 2002. The variations in the hydrologic behavior were represented by the evapotranspiration: the water cycle component considered most affected by change in land surface cover. In this study evapotranspiration was estimated by the annual water balance and by the FAO – Penman – Monteith method. The study of plant cover dynamics was performed based on Landsat/TM mapping images, at 2-year intervals on average. In order to treat these images, geoprocessing methods were used to generate Thematic Maps of Vegetation and Land Use, by utilizing the SPRING software. Finally, it was attempted to establish correlations between the changes in the hydrologic behavior and the vegetation dynamics of the watershed, based on the Dense Forest parameter. With the available information, the correlations found were poor, within a reasonable confidence level. However, this study emphasizes the importance of environ-

Geoprocessamento como Ferramenta no Estudo de Correlação entre a Dinâmica da Cobertura Vegetal e a Evapotranspiração

mental preservation activities that are developed in the study area.

Key-words: evapotranspiration, deforestation, remote sensing.