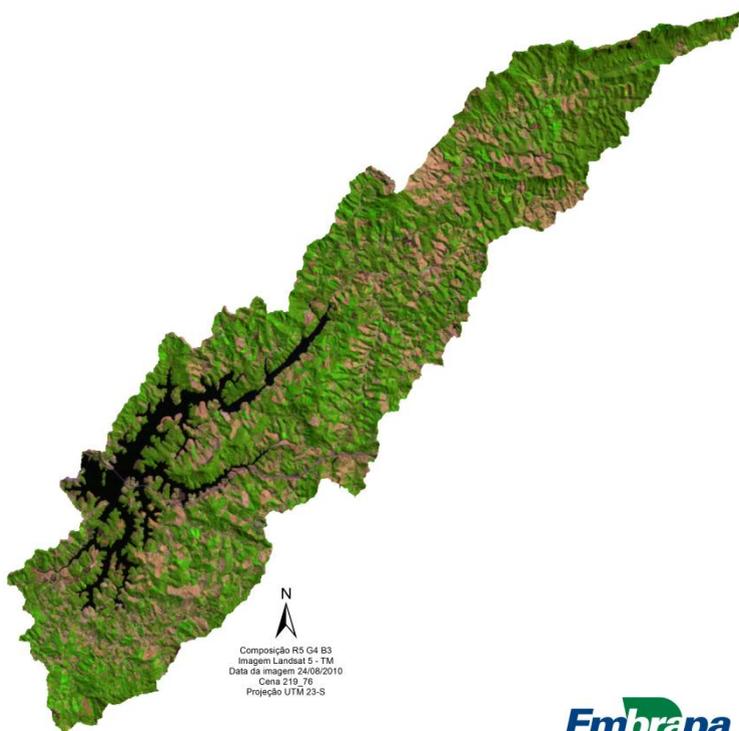


**Zoneamento das sub-bacias
hidrográficas do Sistema
Cantareira utilizando SIG e
imagens orbitais: o caso da
bacia do Reservatório Atibainha**



ISSN 1806-3322
Dezembro, 2011

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Monitoramento por Satélite
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 18

Zoneamento das sub-bacias hidrográficas do Sistema Cantareira utilizando SIG e imagens orbitais: o caso da bacia do Reservatório Atibainha

Nilton de Jesus
Marcos César Ferreira
André Luiz dos Santos Furtado
Saulo de Oliveira Folharini

Embrapa Monitoramento por Satélite
Campinas, SP
2011

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Monitoramento por Satélite

Av. Soldado Passarinho, 303 – Fazenda Chapadão

CEP 13070-115 Campinas, SP

Telefone: (19) 3211-6200

Fax: (19) 3211-6222

www.cnpm.embrapa.br

sac@cnpm.embrapa.br

Comitê Local de Publicações

Presidente: *Cristina Criscuolo*

Secretária-Executiva: *Shirley Soares da Silva*

Membros: *Bibiana Teixeira de Almeida, Daniel de Castro Victoria, Davi de Oliveira Custódio, Graziella Galinari, Luciane Dourado e Vera Viana dos Santos*

Supervisor editorial: *Cristina Criscuolo*

Revisor de texto: *Bibiana Teixeira de Almeida*

Normalização bibliográfica: *Vera Viana dos Santos*

Diagramação eletrônica: *Shirley Soares da Silva*

1ª edição

1ª impressão (2011): versão digital.

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Monitoramento por Satélite

Jesus, Nilton de

Zoneamento das sub-bacias hidrográficas do Sistema Cantareira utilizando SIG e imagens orbitais: o caso da bacia do Reservatório Atibainha / Nilton de Jesus, Marcos César Ferreira, André Luiz dos Santos Furtado, Saulo de Oliveira Folharini. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2011.

31 p.: il. (Embrapa Monitoramento por Satélite. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 18). ISSN 1806-3322.

1. Análise ambiental. 2. Fisiografia. 3. Geoprocessamento. 4. Morfometria. 5. Modelo digital de elevação. 6. Recurso hídrico. I. Ferreira, Marcos César. II. Furtado, André Luiz dos Santos. III. Folharini, Saulo de Oliveira. IV. Embrapa. Centro Nacional de Pesquisa e Monitoramento por Satélite (Campinas, SP). V. Título. VI. Série.

CDD 621.3678

© Embrapa, 2011

Sumário

Resumo	4
Abstract	5
Introdução	6
Material e Métodos	7
Resultados e Discussão	17
Conclusões	26
Referências	27

Zoneamento das sub-bacias hidrográficas do Sistema Cantareira utilizando SIG e imagens orbitais: o caso da bacia do Reservatório Atibainha

Nilton de Jesus¹

Marcos César Ferreira²

André Luiz dos Santos Furtado³

Saulo de Oliveira Folharini⁴

Resumo

A bacia do Reservatório Atibainha faz parte de um conjunto de quatro represas interligadas por túneis e canais (Sistema Cantareira). A área caracteriza-se por sua beleza natural, formada por serras cobertas por remanescentes da Mata Atlântica, além de constituir a principal fonte produtora de água para a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). Após a implementação e subsequente duplicação da Rodovia Fernão Dias, a região tornou-se suscetível a impactos ambientais intermitentes ou contínuos. Em consequência, instituições públicas, privadas e a comunidade trabalham com o objetivo de estabelecer um planejamento que contemple tanto a conservação ambiental como o desenvolvimento econômico adequado. Esta pesquisa visa fornecer informações técnico-científicas para a conservação da bacia do Reservatório Atibainha, por meio da aplicação de metodologia na identificação de características físicas homogêneas. Com este propósito, foram utilizados parâmetros morfométricos e o índice de vegetação em conjunto com técnicas utilizadas em sensoriamento remoto e sistemas de informação geográfica.

Termos para indexação: Análise ambiental, geografia física, geoprocessamento, morfometria, modelo digital de elevação, recursos hídricos.

¹ Geógrafo, Doutor em Ciências, Análise Ambiental e Dinâmica Territorial, IGE/UNICAMP, Bolsista de Pós Doutorado pelo CAPES na Embrapa Monitoramento por Satélite, niljebr@yahoo.com.br

² Geógrafo, Doutor em Geografia Física, Professor do Depto. de Geografia, IGE/UNICAMP, macferre@ige.unicamp.br

³ Biólogo, Doutor em Ecologia Aplicada, pesquisador da Embrapa Monitoramento por Satélite, andre@embrapa.br

⁴ Geógrafo, Bolsista do CNPq na Embrapa Monitoramento por Satélite, saulofolharini@yahoo.com.br

Zoning of Cantareira water supply system's watersheds using GIS and satellite images: the case of the Atibainha Reservoir basin

Abstract

The Atibainha Reservoir basin is part of a group of four reservoirs interlinked by tunnels and channels (Cantareira System). The area is characterized by its natural beauty, formed by mountains covered by Atlantic Forest remainders, and also constitutes the main water supply to the São Paulo Metropolitan Region (RMSP). Due to the construction and later to the duplication of the Fernão Dias road, the region has become susceptible to intermittent or continuous environmental impacts. Thus, public and private institutions and the communities concerned are working with the goal of producing a planning that contemplates both environmental conservation and suitable economical development. This research intends to contribute to the conservation of the Atibainha Reservoir with technical and scientific information by means of the application of a methodology to identify homogeneous physical characteristics. For this purpose, morphometric parameters and the vegetation index were used supported by techniques used in remote sensing and by geographical information systems (GIS).

Index terms: Environmental analysis, physical geography, geoprocessing, morphometry, digital elevation model, hydric resources.

Introdução

Nas últimas décadas, as pressões antrópicas exercidas sobre os recursos naturais têm desencadeado processos responsáveis pelo desequilíbrio na dinâmica de diferentes tipos de geossistemas. Esta problemática, geradora de constante preocupação pela comunidade científica e pela sociedade como um todo, tem mostrado a necessidade da realização de diagnósticos e prognósticos que orientem de maneira adequada o planejamento ambiental, de forma a minimizar estes impactos.

Entre as estratégias utilizadas para o monitoramento de bacias hidrográficas, destaca-se a regionalização hidrológica, que, a partir de características físico-geográficas de sub-bacias, como a litologia, solos, cobertura vegetal e a morfometria, possibilita a definição de regiões hidrográficas homogêneas (ACREMAN; SINCLAIR, 1986; FERREIRA, 1996; ALLENDE et al., 2009). Isso possibilita uma gestão de baixo custo da rede de drenagem e fomenta uma base de dados necessária para a modelagem hidrológica ou para a avaliação dos efeitos do uso da terra (CHIANG et al., 2002; TUCCI et al., 1995).

A partir dessas condições é possível diagnosticar o potencial de fragilidade a que estão sujeitas as bacias hidrográficas e, por conseguinte, realizar zoneamentos capazes de identificar bacias que necessitem de intervenções emergenciais a fim de serem minimizadas as modificações no funcionamento do geossistema.

Este procedimento de diagnóstico pode ser realizado com precisão por meio de técnicas de análise espacial empregadas em sistemas de informação geográfica (SIG) utilizando-se como fontes de dados imagens orbitais e modelos digitais de elevação (MDE). Atualmente a morfometria clássica cede lugar para a

moderna geomorfometria, que se encontra em sintonia com a cartografia e a tecnologia de SIGs e suporta ampla variedade de análises numéricas com base em topografia digital expressa pelo MDE (PIKE et al., 2008).

Neste contexto, o objetivo deste estudo foi a elaboração de um zoneamento das 99 sub-bacias formadoras da bacia do Reservatório Atibainha a partir do parâmetro morfométrico fator topográfico (*Ft*) extraído do modelo digital de elevação e do índice de vegetação médio (*Ivm*) gerado a partir da imagem do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI). Para destacar as áreas de mananciais, optou-se por selecionar apenas as sub-bacias de segunda e terceira ordens, que correspondem às zonas 1 (produção) e 2 (transferência) do sistema fluvial (SCHUMM, 1977).

Material e Métodos

Área de estudo

A bacia do Reservatório Atibainha está posicionada na cabeceira oriental da Bacia do Rio Piracicaba, abrange uma área de 314,5 km² na província geomorfológica do Planalto Atlântico e faz divisa com a Bacia do Paraíba do Sul a leste (Figura 1). Trata-se do principal manancial pertencente ao Sistema Cantareira, responsável pelo fornecimento de água para a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). A bacia é um dos principais mananciais da Bacia do Rio Piracicaba, da qual dependem importantes municípios do Estado de São Paulo, entre estes Campinas.

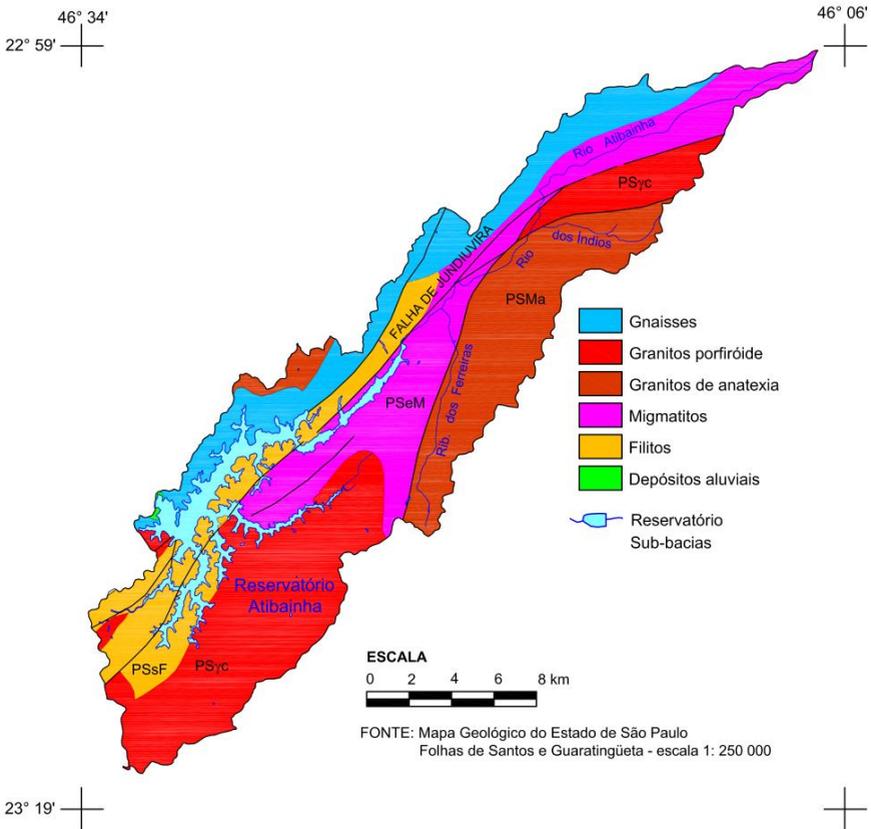


Figura 2. Mapa geológico.

A norte-nordeste, observa-se a presença de gnaisses do Arqueano (JANASI, 1986), e em setores de leste-nordeste e sul-sudoeste ocorrem os corpos granitoides do tipo granito-gnáissico e porfíroide, respectivamente (HASUI et al., 1981). Na região, verifica-se a presença de Latossolos associados a Cambissolos ou a Argissolos (Figura 3).

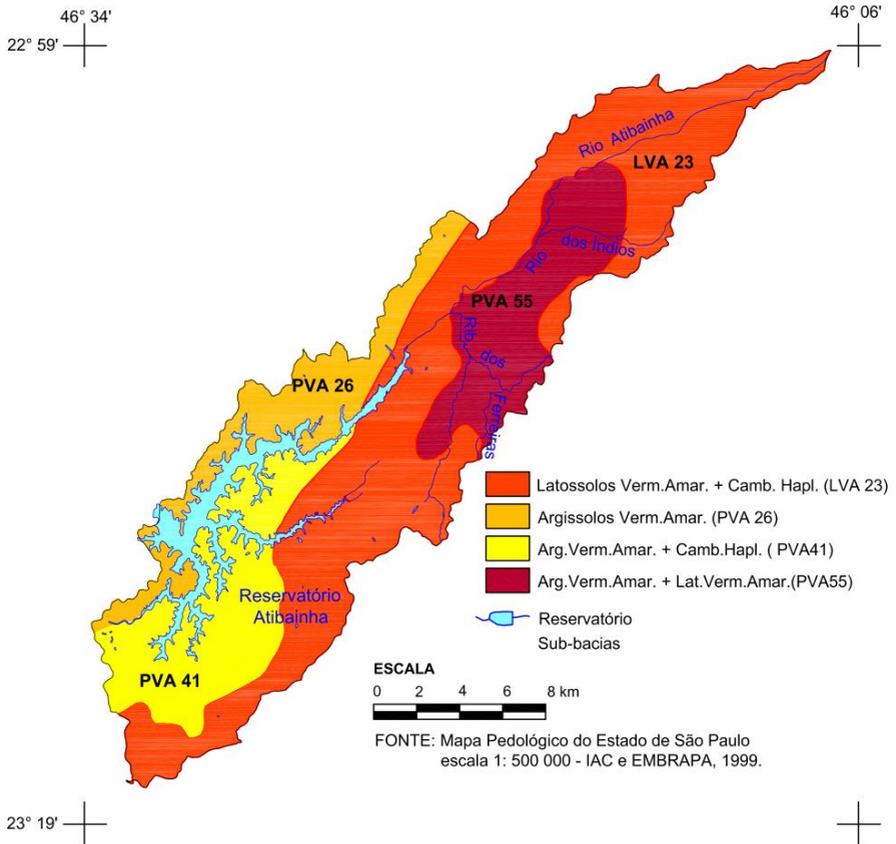


Figura 3. Mapa pedológico.

A alta declividade associada aos Cambissolos e o caráter mais arenoso dos Argissolos qualificam a região como de alta suscetibilidade à erosão, impondo severas limitações ao uso agrícola, florestal ou mesmo pastoril (OLIVEIRA, 1999).

A precipitação é elevada, especialmente a nordeste, onde os valores atingem de 1.600 mm a 1.700 mm anuais, fenômeno atribuído ao fator orográfico imposto pelo relevo do Planalto Atlântico e pela conseqüente ascensão das correntes de ar provenientes do Leste no verão e do Sul no inverno. A região é caracterizada pela ocorrência de clima tropical com estação seca definida (MENARDI JÚNIOR, 2000).

A floresta ombrófila densa que originalmente ocupava toda a bacia foi substituída por pastagens, silvicultura e vegetação secundária nos mais variados estágios de desenvolvimento. A floresta ombrófila densa pode ainda ser encontrada com maior ocorrência a nordeste (Serra da Mantiqueira) e a sudoeste (Serra da Cantareira) da bacia do Reservatório Atibainha (Figura 1).

Para o processamento das imagens orbitais, a geração do MDE e a extração dos limites topográficos das 99 sub-bacias foi empregado o software Idrisi Taiga 16. Os dados obtidos foram organizadas no banco de dados espaciais Database Workshop para a geração dos mapas, que posteriormente foram finalizados no ArcGIS 10 (Figura 4).

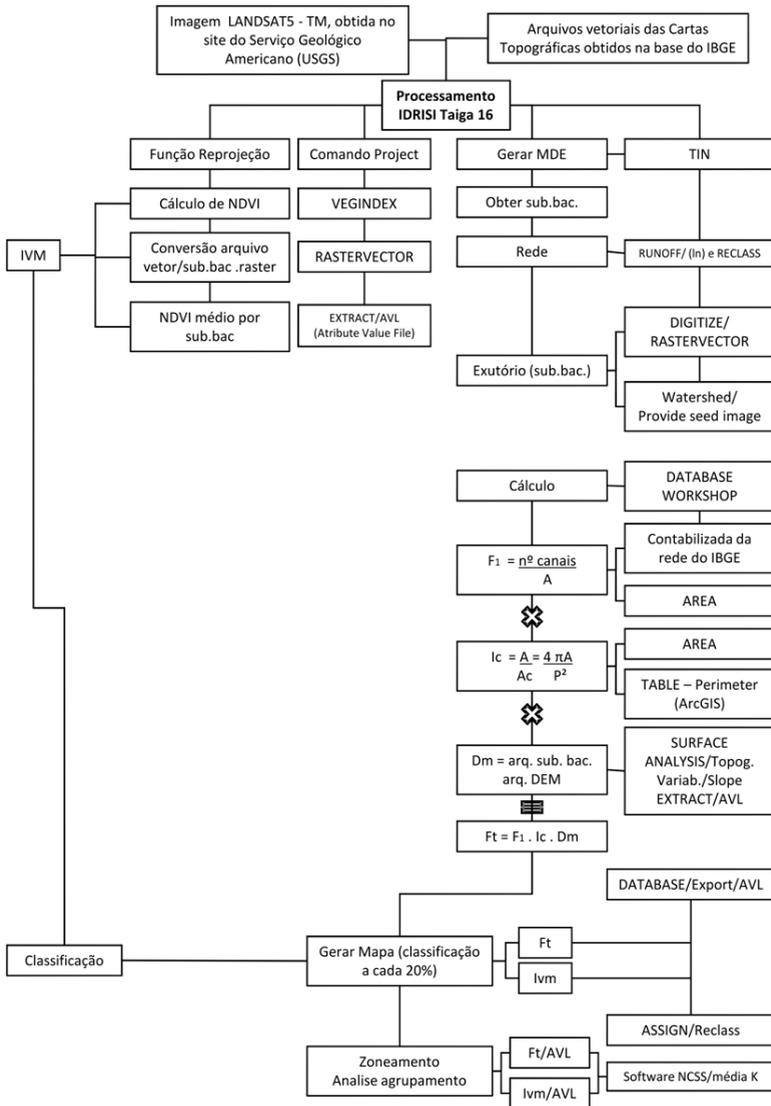


Figura 4. Fluxograma dos procedimentos.

Cálculo do fator topográfico (F_t)

Para a definição do fator topográfico (F_t) foi necessária a produção do MDE a partir dos arquivos digitais das curvas de nível e da rede de drenagem correspondentes às cartas topográficas de Camanducaia, Extrema, Itaquaquecetuba, Igaratá e Piracaia na escala 1:50.000 disponibilizadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2011).

A partir do MDE, foi possível delimitar de modo automatizado os divisores topográficos das 99 sub-bacias da área de estudo. De acordo com Jesus (2009), é possível a retirada desses limites sem a perda da acurácia em comparação a arquivos de cartas topográficas, o que não ocorre com a extração da rede de drenagem, que necessita de uma análise espacial criteriosa para a definição de um limiar de área (*threshold*) variável a condicionantes fisiográficas. Assim, a rede de drenagem gerada somente orientou a definição dos exutórios das 99 sub-bacias. O melhor método para definir o limite de uma bacia no SIG Idrisi Taiga 16 é vetorizar uma linha (aproximadamente 10 *pixels*) partindo-se do exutório e seguindo o canal de drenagem a montante da referida bacia.

O número de canais de 1ª ordem (n_1) foi calculado a partir dos arquivos da rede hidrográfica do IBGE.

O cálculo da área da bacia (A) foi obtido do arquivo *raster* das sub-bacias, e o perímetro da bacia (P) foi estimado no ArcGIS 10, uma vez que o SIG Idrisi Taiga 16 superestimou estes valores.

Para o cálculo do fator topográfico (F_t) foi utilizada a relação algébrica proposta por Morisawa (1962) modificada para:

$$F_t = F_1 \cdot I_c \cdot D_m,$$

onde F_1 é a frequência de canais de primeira ordem, I_c é o índice de circularidade e D_m é a declividade média que substitui a taxa de relevo (Rh) na fórmula original.

De acordo com Christofletti e Perez Filho (1975), o procedimento para o cálculo do parâmetro Rh acarreta, por vezes, diversas decisões subjetivas, principalmente quando o rio é sinuoso ou, ainda, quando a bacia de drenagem tem formato incomum. Com o intuito de evitar os problemas apontados, foi gerado o índice de declividade média (D_m), que considera em seu cálculo os valores de declividade de todos os *pixels* da sub-bacia considerada. O MDE foi utilizado para o cálculo da declividade por porcentagem e a subsequente extração dos valores médios de declividade por sub-bacias.

Para o cálculo da frequência de canais de primeira ordem F_1 , foi adotado o sistema de ordenação de canais de Strahler (1952) com a seguinte relação:

$$F_1 = n_1 / A, \quad (2)$$

onde F_1 é frequência de canais de primeira ordem, n_1 é o número de canais de primeira ordem e A é a área da sub-bacia hidrográfica.

A relação algébrica mais comumente utilizada na literatura para o cálculo do índice de circularidade (I_c) foi proposta por Miller (1953) da seguinte forma:

$$Ic = A / Ac,$$

onde Ic é o índice de circularidade, A é a área da sub-bacia e Ac é a área do círculo com perímetro igual ao da sub-bacia. O valor máximo do Ic é igual a 1,0, sendo que quanto mais próximo ele estiver da unidade, mais próximo da forma circular estará a bacia hidrográfica.

Cálculo do índice de vegetação médio (Ivm) por sub-bacia

Foram utilizadas imagens do satélite Landsat-5/TM de 24/8/2010, disponibilizadas pelo U.S. Geological Survey, que têm correção geométrica, radiométrica e georreferenciamento pelo MDE GLS2000 para UTM/WGS84 projetado para o hemisfério Norte. Para a devida utilização das imagens foi necessária a reprojeção para o hemisfério Sul.

Para a correção atmosférica, foi empregada o método $Cos(t)$ desenvolvido por Chavez (1996), que incorpora todos os elementos da correção pelo *pixel* escuro (Dark Object Subtraction, DOS) (CHAVES, 1989) e constitui-se como uma técnica de aproximação que considera tanto o efeito do espalhamento atmosférico como o da absorção atmosférica com base no cosseno do ângulo solar zenital. Este método apresenta resultados satisfatórios, considerando-se a simplicidade na obtenção dos resultados (SCHROEDER et al., 2006; SONG et al., 2001). O produto do processamento é uma imagem em valores de reflectância (0 a 1).

A partir da imagem do NDVI e do limite das 99 sub-bacias foi possível obter os valores médios do NDVI para cada sub-bacia.

Classificação dos mapas dos parâmetros das sub-bacias

Os valores obtidos do cálculo do fator topográfico e do índice de vegetação médio foram identificados para as 99 sub-bacias, assim cada sub-bacia recebeu o seu valor correspondente. Para possibilitar uma análise de ambos os mapas, utilizaram-se classes com intervalos a cada 20%, assim o conjunto dos dados foi dividido em cinco partes iguais. A edição final dos mapas temáticos foi realizada no ArcGIS 10.

Zoneamento das sub-bacias hidrográficas

O método de análise de agrupamento denominado média-k (HARTIGAN, 1975) foi utilizado neste estudo. Trata-se de um método muito empregado e avaliado para a definição de regiões homogêneas em função da capacidade do escoamento superficial (BURN, 1989; LECCE, 2000; LIN; CHEN, 2006). Este consiste em deslocar os objetos entre os *clusters* predefinidos pelo usuário com o objetivo de minimizar a variabilidade intragrupos e, ao mesmo tempo, maximizar a variabilidade intergrupos.

O programa de estatística NCSS 2007 indica o melhor ajuste para a formação dos *clusters* pela porcentagem de variação da soma dos quadrados das médias dos *clusters* formados. O melhor ajuste é dado por meio da queda abrupta desse valor no gráfico apresentado. Desse modo, deve-se processar mais uma vez, agora com o número exato de *clusters*, obtido a partir da análise do gráfico do processamento anterior. Assim, quatro *clusters*, ou seja, zonas, foram definidos como de melhor ajuste.

Resultados e discussão

O mapa do fator topográfico (Figura 5) apresentou os maiores valores na porção central da bacia do Reservatório Atibainha, referentes às classes III, IV e V.

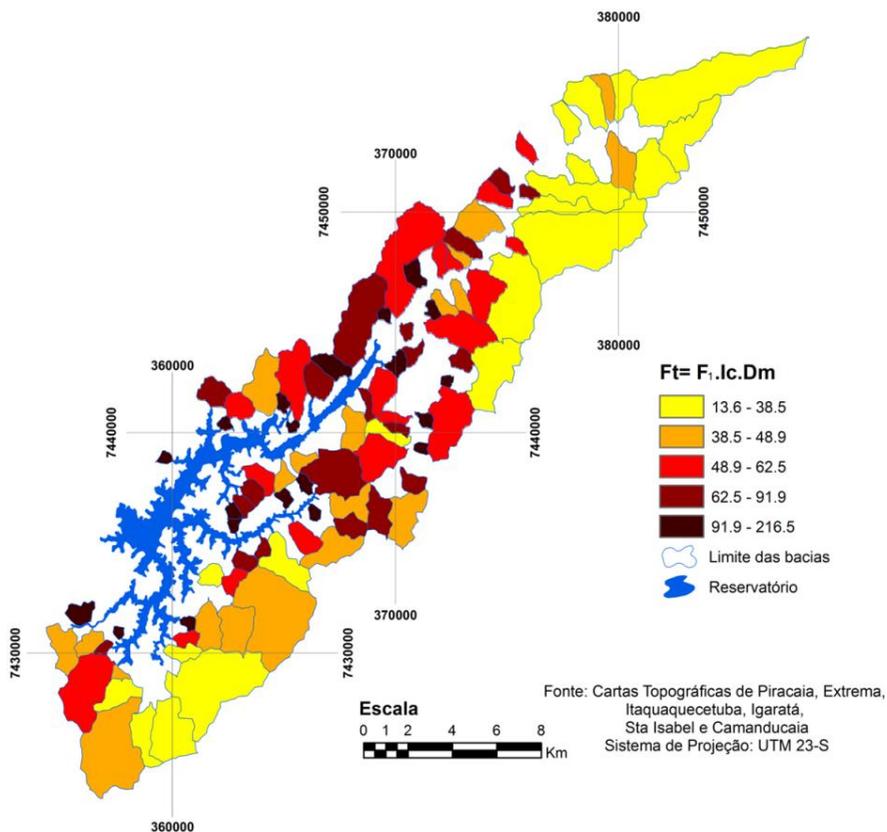


Figura 5. Mapa do fator topográfico (Ft).

Esse setor tem relevo característico de morros com declividades médias entre 28% e 32,5%, é cortado pela falha de Jundiuvira e por falhas adjacentes que separam unidades litológicas – migmatitos e filitos (Figura 2) – com presença de Argissolos e Latossolos, sempre associados aos Cambissolos, característicos de áreas declivosas (Figura 3). Esses fatores contribuem efetivamente para um aumento da taxa de frequência de canais de primeira ordem (F_1), especialmente as posicionadas em Argissolos de acordo com Christofolletti (1981).

O índice de circularidade (I_c) (Tabela 1) também apresentou concentração significativa dos maiores valores na porção central da bacia.

Tabela 1. Parâmetros morfométricos¹ apresentados por classe do mapa do fator topográfico Ft. (Valores representam a média aritmética).

Classes Ft	F1 (c km-2)	Ic	Dm(%)	H
1	2,23	0,48	26,45	134,63
2	3,03	0,56	26,80	144,88
3	3,55	0,57	28,02	127,93
4	3,92	0,62	29,26	116,33
5	5,70	0,70	32,54	101,57

¹ F_1 é a frequência de canais de primeira ordem; I_c é o índice de circularidade; Dm é a declividade média; e H é a amplitude altimétrica.

Segundo Zavoianu (1985), canais que fluem de montanhas para planícies tendem a formar bacias mais alongadas. Por outro lado, as bacias mais circulares estão posicionadas na confluência entre unidades de relevo e, portanto, distanciadas das porções mais altas da bacia (divisores de água). Assim, ocorre maior capacidade de formação de canais em bacias de formato mais circular, indicando amplitudes altimétricas (H) menores que as encontradas em bacias de formato mais alongado (ver Tabela 1).

De outro modo, os valores mais baixos do Ft estão representados pelas classes I e II do mapa, sendo constituídos por setores serranos, a nordeste (Serra da Mantiqueira), onde ocorrem os gnaisses que, em função da alta resistência, impedem maior esculturação de canais e contribuem para a formação de um relevo fortemente escarpado. A sudoeste (Serra da Cantareira) e em toda borda leste da bacia predominam as formações granitoides com presença dos Latossolos associados aos Cambissolos, em relevos de montanhas de topos suavizados. A resistência desses materiais associados ao formato mais alongado das sub-bacias aí posicionadas dificulta a formação de canais.

Zavoianu (1985) aponta uma tendência para a diminuição das cheias nas bacias de formato alongado, pois seus tributários fluem para o canal principal em curtos intervalos de tempo e em espaços maiores. Esse fato contribui para um retardamento do processo de evolução dessas bacias, que geralmente têm amplitudes altimétricas maiores (Tabela 1).

Uma reflexão sobre esses resultados nos remete a considerar uma preocupação não somente com as nascentes de uma bacia hidrográfica, onde encontramos as maiores movimentações topográficas, mas também com os setores intermediários da bacia, pois valores elevados do Ft em bacias hidrográficas demonstram maior potencial hidrológico. Deste modo, maior fluxo de água pode indicar também maior capacidade de desencadeamento de processos erosivos, especialmente se ocorrer a retirada da cobertura vegetal.

A Figura 6 apresentou valores de índice de vegetação médio (Ivm) para a classe I de 0,57 a 0,71, o que revela vegetação densa. Ocorre uma intensificação desses valores na porção

central e nas principais zonas serranas, a sudoeste (Serra da Cantareira) e a nordeste (Serra da Mantiqueira) da área de estudo (Figura 1), que apresentam valores acima de 0,83 na classe V do mapa.

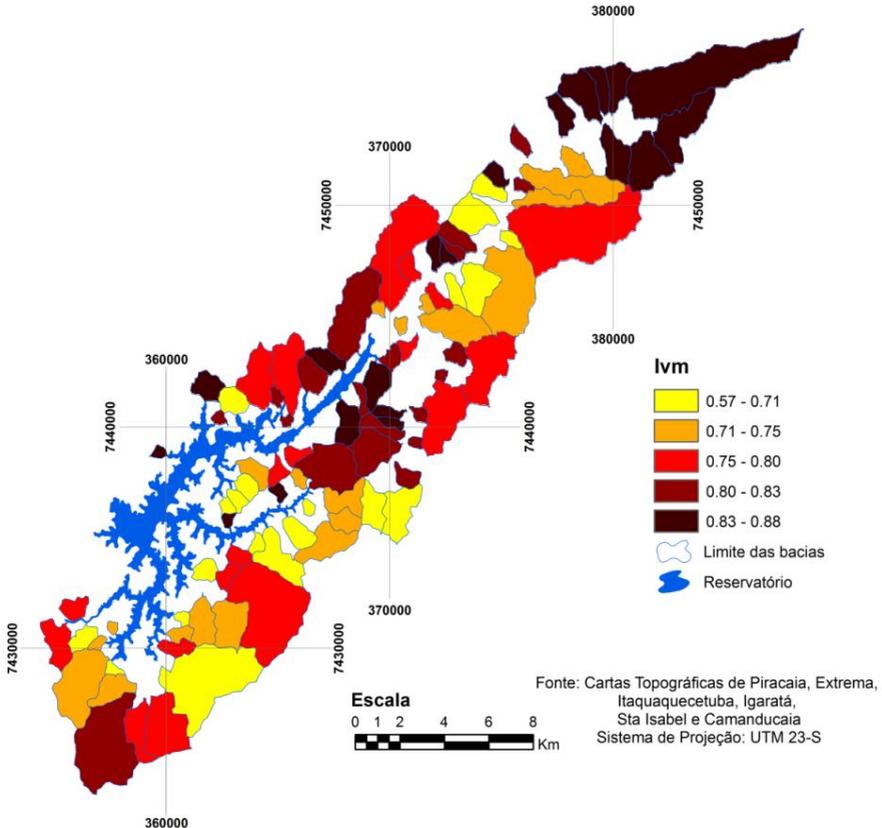


Figura 6. Mapa do índice de vegetação médio (Ivm).

Os valores encontrados são significativos, o que indica uma vegetação densa para toda a extensão da bacia do Reservatório Atibainha. Segundo Julien et al. (2006), valores de NDVI acima de 0,5 já são considerados

como de vegetação densa sem presença de solo exposto. Entretanto, é importante que, em estudos futuros, haja distinção entre os diferentes usos da terra, tendo em vista que a região, além de floresta ombrófila densa, floresta montana e floresta aluvial, possui áreas agrícolas, pastagens e reflorestamento de eucalipto.

O mapa do zoneamento das sub-bacias (Figura 7) indicou melhor ajuste para a definição de quatro zonas, destacadas a seguir:

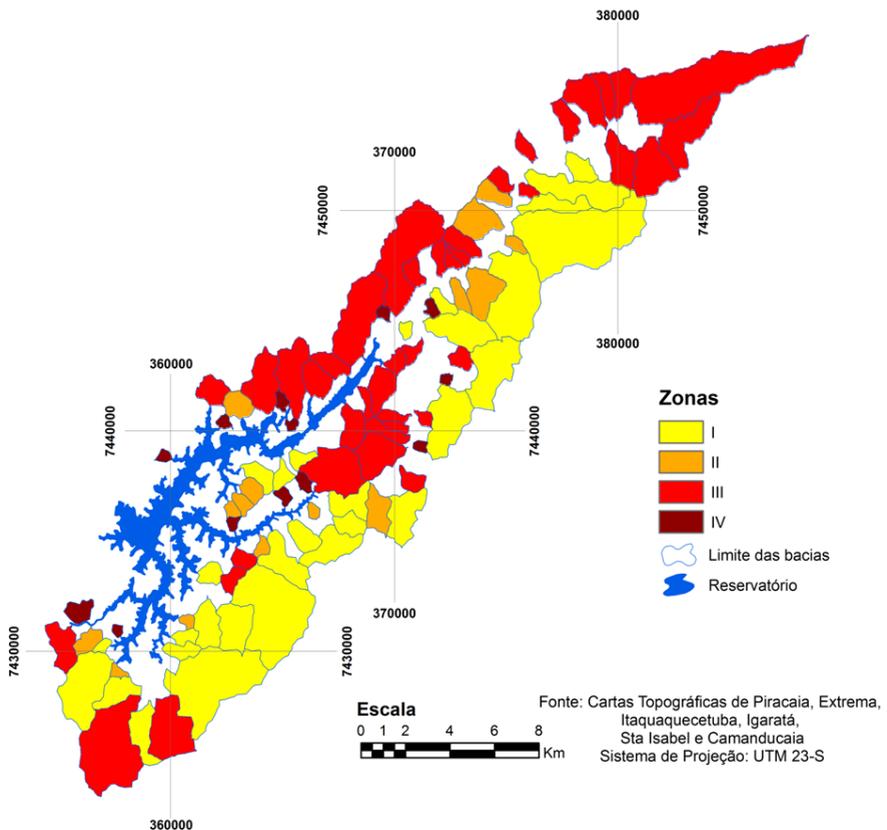


Figura 7. Mapa do zoneamento das sub-bacias.

ZONA I

Esta zona apresenta vales abertos, com presença de planícies restritas. São áreas posicionadas a sudoeste e na porção a leste da bacia, com presença marcante dos corpos granitoides do tipo porfiroide a sul-sudoeste e granito-gnáissico a leste-nordeste (HASUI et al., 1981). Caracteriza-se por relevo montanhoso forte ondulado, com presença de Latossolos e Argissolos sempre associados aos Cambissolos. Conforme a Tabela 2, a declividade média desta zona é a menor de toda a área de estudo. Contudo, apresenta um valor de 24,6%, considerado um valor alto característico de relevo forte com capacidade de esculturação e transporte de materiais, onde ocorre o predomínio da morfogênese sobre a pedogênese. São áreas que se caracterizam como meios instáveis (IBGE, 2009).

Tabela 2. Parâmetros morfométricos² e índice de vegetação médio *Ivm* apresentados por zonas do mapa de zoneamento. (Valores representam a média aritmética).

Zonas	<i>Ivm</i>	<i>Ft</i>	H	Dm(%)
1	0,74	37,53	107,73	24,60
2	0,64	60,66	94,07	26,43
3	0,82	48,13	164,70	30,22
4	0,80	149,92	94,29	33,22

² *Ft* é o fator topográfico; H é a amplitude altimétrica; e Dm é a declividade média.

Os valores do *Ft* desta zona são os mais baixos da bacia do Reservatório Atibainha e contabilizam *Ivm* entre as classes I, II, III, de 0,57 a 0,80 (Figura 6), considerado como de vegetação densa. Isso confere uma condição satisfatória a esta zona.

ZONA II

A característica peculiar desta zona é o predomínio de formas de relevo forte ondulado e montanhoso, posicionadas em migmatitos e filitos cobertos por Argissolos distróficos, em alguns setores com associação aos Cambissolos. As amplitudes altimétricas médias são as mais baixas da bacia do Reservatório Atibainha, com valor similar ao da zona IV (Tabela 2).

Esta zona apresenta os mais baixos valores do Ivm , o que indica o risco iminente à perda de solo nas encostas com aumento na taxa de sedimentos transportados pelos canais, especialmente porque algumas sub-bacias desta zona apresentam altos valores do Ft (ver Figura 5).

ZONA III

As sub-bacias desta zona estão posicionadas em áreas serranas na porção central, as quais se estendem a nordeste (Serra da Mantiqueira) seguindo a falha de Jundiuvira. Segundo Pires Neto (1996) controla segmentos de escarpas descontínuos e o próprio Rio Atibainha. Neste trecho predominam os gnaisses e migmatitos em relevo de montanha com desníveis abruptos. A sudoeste da área de estudo (Serra da Cantareira), o relevo é montanhoso, mais ondulado em função da menor resistência dos granitos aos processos erosivos. São as maiores amplitudes altimétricas médias encontradas em toda a bacia, contudo ocupam somente a segunda posição com relação à declividade, o que indica que as rampas das vertentes são mais longas (Tabela 2), com vales fechados e profundos sem presença de planícies e com predomínio de Latossolos e Argissolos sempre associados aos Cambissolos (Figura 3). A vegetação é densa, o que indica valores de Ivm acima de 0,80, classe IV do mapa da Figura 6. Além disso, esta zona apresenta valores de Ft abaixo da média

para a Bacia do Atibainha, o que lhe confere uma ótima condição ambiental.

ZONA IV

É composta por sub-bacias menores em setores internos, geralmente confluência entre outras sub-bacias, posicionadas em encostas de morros e montanhas. Caracteriza-se por apresentar vertentes retilíneas e canais rasos e, por vezes, vales fechados e profundos. Apesar da menor amplitude altimétrica média, a declividade média é a maior de toda a bacia por apresentar rampas curtas (Tabela 2). Predominam migmatitos e filitos cobertos por Argissolos associados aos Cambissolos. Apesar do predomínio de valores altos para o *Ft*, os altos valores do *Ivm* favorecem condições ambientais satisfatórias. Contudo são sub-bacias que devem ser monitoradas em função da vulnerabilidade a que estão sujeitas, pois um alto valor do *Ft* indica vertentes com alta declividade e, como consequência, maior capacidade de esculturação de canais, e o formato mais circular de suas bacias pode desencadear retardamento do escoamento pluvial, formando enxurradas de acordo com Christofolletti (1981), Christofolletti e Perez Filho (1975) e Zavoianu (1985).

Ainda é possível perceber, conforme destacado por Ferreira (1996) e Allende et al. (2009), a marcante correspondência dessas zonas com os mapas físicos (Figura 1), de geologia (Figura 2) e de pedologia (Figura 3) e a morfometria expressa pelo *Ft* (Figura 5). As áreas serranas estão destacadas na zona III, a nordeste (Serra da Mantiqueira), a sudoeste (Serra da Cantareira) e nas serras da porção central com amplitudes altimétricas mais amenas que as anteriores. A porção central apresenta mais falhamentos e diferenças litológicas e pedológicas e está bem marcada pelas classes IV e V do mapa do fator topográfico (Figura 5). De outro modo, os corpos

granitoides a leste-nordeste e sul-sudoeste destacadas por Hasui et al. (1981), ocupam exatamente as porções intermediárias entre as zonas serranas destacadas no mapa de zoneamento como zona I.

A bacia do Reservatório Atibainha está inserida na borda leste da Bacia do Paraná, na província geomorfológica do Planalto Atlântico, em áreas correspondentes ao embasamento cristalino, o que denota intensa movimentação topográfica com declividades altas. Como consequência, as unidades pedológicas quase sempre estão associados aos Cambissolos e Argissolos, o que, segundo Oliveira et al. (1999), impõe severas limitações ao uso da terra. Este fator se soma às restrições com relação à legislação ambiental, pois a área está inserida na área de proteção ambiental (APA) Piracicaba e Juqueri-Mirim, com o objetivo de garantir a proteção das nascentes e dos afluentes do alto curso do Rio Piracicaba.

Neste contexto, as zonas definidas aqui indicam setores da bacia do Reservatório Atibainha em áreas de mananciais com maior ou menor grau de vulnerabilidade em função do valor do fator topográfico, que é bem distinto para cada zona, conforme a Tabela 2. Contudo, deve-se atentar para o fato de que este índice é obtido por uma média para cada sub-bacia, situação que é real apenas para bacias extremamente homogêneas. Isso denota que mesmo para as zonas com maior valor do Ft é possível o desenvolvimento de atividades agrícolas ou pastoris não extensivas e com práticas conservacionistas na baixa encosta das vertentes ou nas planícies restritas das sub-bacias das quais fazem parte essas vertentes. Essas áreas podem ser melhor definidas por trabalhos em escalas maiores e com metodologias que permitam a visualização da dinâmica espacial no interior das sub-bacias.

Contudo, as considerações acima formuladas não são significativas nas escalas menores que 1:50.000. Neste nível de generalização cartográfica, o importante é a organização espacial, o arranjo dos padrões de sub-bacias e as ordens de conexões das mesmas, fato perfeitamente constatado pela aplicação da metodologia à área estudada.

Conclusões

A aplicação da metodologia para o zoneamento das sub-bacias do Reservatório Atibainha possibilitou identificar quatro zonas com características fisiográficas e ambientais distintas de acordo com os valores encontrados dos parâmetros morfométricos e do índice de vegetação médio.

O fator topográfico permitiu analisar comparativamente as sub-bacias, pois, além de indicar o potencial hidrológico, mostrou-se eficiente para a classificação das sub-bacias segundo diferentes níveis de suscetibilidade à degradação ambiental, assim como na caracterização física da área, e apresentou correspondência com as unidades litológicas, pedológicas e geomorfológicas.

O uso do índice de vegetação no zoneamento de sub-bacias hidrográficas apresenta uma série de vantagens, entre elas a objetividade quantitativa dos valores de densidade da cobertura vegetal na bacia, que permite comparar diferentes sub-bacias, e a possibilidade do monitoramento desses valores devido à resolução temporal dos sistemas sensores orbitais.

As sugestões apresentadas têm como objetivo principal o monitoramento da situação, ou, ainda, o diagnóstico preliminar visando identificar anomalias no geossistema, orientando trabalhos pontuais em escalas maiores que permitam uma avaliação detalhada do que ocorre no interior das sub-bacias. Isso permite otimizar o planejamento ambiental, ainda mais o de uso vital, como é o caso dos mananciais do Sistema Cantareira, um dos fornecedores de água para a Região Metropolitana de São Paulo e importantes municípios do Estado de São Paulo, entre eles Campinas.

Referências

ACREMAN, M. C.; SINCLAIR, C. D. Classification of drainage basins according to their physical characteristics: an application for food frequency analysis in Scotland. **Journal of Hydrology**, v. 84, p. 365-380, 1986.

ALLENDE, T. C.; MENDOZA, M. E.; GRANADOS, E. M. L.; MANILLA, L. M. M. Hydrogeographical Regionalisation: an approach for evaluating the effects of land cover change in watersheds. A case study in the Cuitzeo Lake Watershed, Central Mexico. **Water Resources Management**, v. 23, n. 12, p. 2587-2603, 2009.

BURN, D. H. Cluster analysis as applied to regional flood frequency. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 115, p. 567-582, 1989.

CHAVEZ JÚNIOR, P. S. Image-based atmospheric corrections - revisited and improved. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v. 62, p. 1025-1036, 1996.

CHAVEZ JÚNIOR, P. S. Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper multispectral images. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v. 55, p. 1285-1294, 1989.

CHIANG, S. M.; TSAY, T. K.; NIX, S. J. Hydrologic regionalization of watersheds. I: Methodology. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 128, n. 1, p. 3-11, 2002.

CHRISTOFOLETTI, A. A variabilidade espacial e temporal da densidade de drenagem. **Notícia Geomorfológica**, Campinas, v. 21, n. 41, p.1-127, dez. 1981.

CHRISTOFOLETTI, A.; PEREZ FILHO, A. Estudos sobre a forma de bacias hidrográficas. **Boletim Geografia Teorética**, v. 5, n. 9/10, p. 83-92, 1975.

FERREIRA, M. C. Regionalização de pequenas bacias hidrográficas a partir de imagens orbitais e sistema de informação geográfica. **Geociências**, v. 15, n. 1, p. 163-184, 1996.

HARTIGAN, J. **Clustering Algorithms**. New York: John Wiley & Sons, 1975.

HASUI, Y., CARNEIRO, C. D. R.; BRISTICHI, C. A. O embasamento pré-cambriano e eo-paleozóico em São Paulo. In: INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DE SÃO PAULO. **Mapa Geológico do Estado de São Paulo – escala 1:500.000**. São Paulo: IPT/DMGA, 1981. v. 1, p. 12-45. (Monografia, 6).

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/download/geociencias.shtml>>. Acesso em: 30 nov. 2011.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico de geomorfologia, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2009. 182 p. (Manuais técnicos em geociências, 5).

JANASI, V. A. **Geologia e petrologia do maciço monzodiorítico-monzonítico de Piracaia**. 1986. 281 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geologia, Universidade de São Paulo.

JESUS, N. **Avaliação do modelo digital de elevação ASTER para análise morfométrica em bacias hidrográficas**. 2009. 154 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

JULIEN, Y.; SOBRINO, J. A.; VERHOEF, W. Changes in land surface temperatures and NDVI values over Europe between 1982 and 1999. **Remote Sensing of Environment**, v. 103, p. 43–55, 2006.

LECCE, S. A. Spatial variations in the timing of annual floods in the southeastern United States. **Journal of Hydrology**, v. 235, p. 151–169, 2000

LIN, G. F.; CHEN, L. H. Identification of homogeneous regions for regional frequency analysis using the self-organizing map. **Journal of Hydrology**, v. 324, p. 1–9, 2006.

MENARDI JÚNIOR, A. **Regime e ritmo das chuvas na Bacia do Rio Piracicaba: variações e impactos**. 291 f. 2000. Tese (Doutorado) – Instituto Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

MILLER, V. C. **A quantitative geomorphic study of drainage basins characteristic in the Clinch Mountain area**. Columbia: Dept. Geology/Columbia University, 1953. (Technical Report,3).

MORISAWA, M. E. Quantitative geomorphology of some watersheds in the Appalachian Plateau. **Geological Society of America Bulletin**, v. 73, n. 9, p. 1025-1046, 1962.

OLIVEIRA, J. B.; CAMARGO, M. N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, B. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo**: legenda expandida. Campinas: Instituto Agronômico; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 64 p.

OLIVEIRA, J. B. **Solos do Estado de São Paulo**: descrição das classes registradas no mapa pedológico. Campinas: Instituto Agronômico, 1999. 112 p.

PIKE, R. J.; EVANS, I. S.; HENGL, T. Geomorphometry: a brief guide. In: HENGL, T.; REUTER, H. I. (Ed.). **Geomorphometry**: concepts, software, applications. New York: Elsevier, 2008. v. 33, p. 1-28. (Developments in Soil Science).

PIRES NETO, A. G. **Estudo morfotectônico das bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari, Jundiá e áreas adjacentes no Planalto Atlântico e Depressão Periférica**. 1996. 70 f. Projeto (Pós-Doutorado) - Instituto de Geociências, e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

SCHROEDER, T. A.; COHEN, W. B.; SONG, C.; CANTY, M. J.; YANG, Z. Radiometric correction of multi-temporal Landsat data for characterization of early successional forest patterns in western Oregon. **Remote Sensing of Environment**, v. 103, n. 1, p. 16-26, jul. 2006.

SCHUMM, S. A. Evolution of drainage system and slopes in bandlands of Perth Amboy, **Geological Society of America Bulletin**, New Jersey, v. 67, n. 3, p. 597-646, 1956.

SCHUMM, S. A. **The fluvial system**. New York: John Wiley & Sons, 1977. 338 p.

SONG, C.; WOODCOCK, C. E.; SETO, K. C.; PAX-LENNEY, M.; MACOMBER, S. A. Classification and change detection using Landsat TM data: when and how to correct atmospheric effects? **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 75, p. 230-244, 2001.

STRAHLER, A. N. Hypsometric analysis of erosional topography. **Geological Society of America Bulletin**, v. 63, n. 11, p. 1117-1142, 1952.

TUCCI, C.; SILVEIRA, A.; SANCHEZ, J. Flow regionalization in the upper Paraguay basin, Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, v. 40, n. 4, p. 485-497, 1995.

ZAVOIANU, I. **Morphometry of drainage basins**. Amsterdam: Editora Academiei, Bucharest & Elsevier Science Publishers, 1985. 238 p.

Embrapa

Monitoramento por Satélite

Ministério da
**Agricultura, Pecuária
e Abastecimento**

GOVERNO FEDERAL
BRASIL
PAÍS RICO É PAÍS SEM POBREZA