

Espacialização das drenagens utilizando técnicas de geoestatística e de sensoriamento remoto

Paulo Sérgio de Rezende Nascimento¹
Reinaldo Antônio Petta¹

¹ Laboratório de Geomática – Departamento de Geologia – UFRN
Caixa Postal 1607 – 59.078-970 – Natal – RN, Brasil
{paulo, petta}@geologia.ufrn.br

Abstract. The erosion in Piracicaba River Watershed (SP) is increasingly growing and is damaging the development of agribusiness in that region. A way to visualize the situation is by the drainage density because the largest it is, the most intense the erosive process is. The present work aimed at spatializing the drainage net of Low Piracicaba sub-watershed in order to obtain a map of density, using the geostatistics and remote sensing techniques. The steps of the work were: extraction of the drainage by visual interpretation of CCD/CBERS-2 images (corrected by restoration); geostatistics analyses (modeling of empirical semivariogram, adjustment-validation of experimental semivariogram and spatial interpolation by ordinary kriging); and generation of thematic map of the studied attribute by digital processing of the interpolated image (rainbow slicing and histogram equalization). The results presented the spatialization of the drainage net illustrated in the thematic map with four classes of drainage density: high, average high, average low, low. This map shows the vulnerability to erosion in the sub-watershed, as the density represents the erosive situation of the area. The conclusions were: the methodological proceeding adopted here was efficient to accomplish the objectives; the area is subjected to different intensities to erosive processes; and it is necessary to establish priorities of recuperation of degraded areas by deforestation and inadequate land use, like riparian forest and hillsides, in order to guarantee the adequate level of security for the agro-industry enterprises in the region.

Palavras-chave: ordinary kriging, erosive processes, drainage density, krigagem ordinária, processos erosivos, densidade de drenagem.

1. Introdução

Em qualquer ciência, o desenvolvimento de novas tecnologias não é importante por si só, mas sim por permitir novas descobertas que estimulem o progresso científico. Deste modo, a associação de procedimentos de estatísticas espaciais, técnicas de sensoriamento remoto e imagens orbitais, como as CCD-CBERS-2B, permite a confecção de mapas que retratam adequadamente, em meio digital, as propriedades ou as características do terreno. Como exemplo, pode-se citar a confecção de mapas de densidade de drenagem, que se constituem em importantes indicadores das alterações ocorridas na composição da paisagem de bacias hidrográficas, seja por mudanças na sua estruturação, forma ou por perda ou ganho de canais (COLLARES, 2000). Assim, a densidade de drenagem representa o quadro erosivo de uma área, e é reconhecida como uma das variáveis mais importantes na análise de bacias hidrográficas, representando o grau de dissecação topográfica (CHRISTOFOLETTI, 1979; 1981). A rede de drenagem é observada nitidamente nas imagens CCD-CBERS-2B de forma direta, a qual pode ser interpolada espacialmente por análises geoestatísticas e definidas classes de densidade de drenagem, representadas em mapas temáticos, por técnicas de processamento digital de imagens.

A Bacia hidrográfica do Rio Piracicaba, localizada na região centro-sudeste do Estado de São Paulo, é o segundo pólo industrial do país e seu sistema geoeconômico é o mais dinâmico do Estado. Desta forma, estudos para a preservação ambiental e para o contínuo crescimento sócio-econômico da região (desenvolvimento sustentável) é o cerne deste trabalho. Para tal, foi escolhida como área de estudo (Figura 1), a Sub-bacia do Baixo Piracicaba, a qual historicamente é caracterizada pela atividade rural calcada nas culturas de café e pastagem, sendo substituída nas últimas décadas pela cana-de-açúcar e no desenvolvimento do agronegócio canavieiro. A contenção do processo erosivo, que se desencadeia desde os

séculos XVIII e XIX, é uma questão tanto de sobrevivência e desenvolvimento da agroindústria canavieira e do crescimento sócio-econômico da região, como da preservação ambiental da área de estudo.



Figura 1. Localização da área de estudo.

Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi a espacialização da rede de drenagem da Sub-bacia do Baixo Piracicaba para obter o mapa de densidade deste atributo e assim, verificar as áreas vulneráveis aos processos erosivos utilizando técnicas de geostatística e de sensoriamento remoto. O mapa de densidade de drenagem representa uma importante ferramenta tecno-gerencial para priorização dos ambientes a serem protegidos e auxiliam no direcionamento dos recursos disponíveis para a recuperação e/ou minimização da degradação do terreno oriundo dos processos erosivos. Como a agricultura é um dos principais agentes propulsores do desenvolvimento dos municípios da área de estudo, a implementação de um plano de gestão ambiental, em que a agricultura seja prioridade constitui o caminho a percorrer para o desenvolvimento econômico e social.

2. Material e Método

Os materiais utilizados para a confecção do mapa de densidade de drenagem foram as cartas topográficas do IBGE escala 1:50.000, correspondentes às folhas de Dois Córregos, Brotas, Itirapina, Piracicaba, Capivari, Laras, São Pedro, Barra Bonita e Santa Maria da Serra; imagens orbitais CCD-CBERS-2B e o programa computacional de geoprocessamento SPRING (Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas).

As etapas de operacionalização realizadas para atingir o objetivo deste trabalho corresponderam: extração da rede de drenagem pelo método de interpretação visual das imagens CBERS, análise exploratória dos dados, geração, análise do semivariograma (ajuste e validação do semivariograma experimental), interpolação espacial por krigagem ordinária e processamento digital utilizando o fatiamento por arco-íris e equalização do histograma.

2.1 Extração da rede de drenagem

O procedimento metodológico adotado para a extração da rede de drenagem foi a fotoleitura, baseado no processo sistemático e lógico de fotointerpretação de imagens de satélites. O primeiro passo foi a importação da rede drenagem das cartas topográficas, que já se encontram no formato digital, para o Banco de Dado Georreferenciado (BDG) do SPRING. No próprio monitor, a rede de drenagem foi complementada pelas imagens CCD-CBERS-2B, ora utilizando as imagens com órbita/ponto 148/108 datadas de 02/01/2008 e ora as de 23/02/2008, devido à cobertura de nuvens. É importante ressaltar que as imagens passaram

pelo procedimento de restauração para a correção radiométrica e aumento dos tamanhos dos pixels para 10m por 10m, obtendo uma imagem realçada e com o dobro da resolução espacial das imagens originais. Este procedimento foi realizado em um projeto sem projeção cartográfica para garantir que as mesmas não foram reamostradas e então foram convertidas para o formato GRIB, registradas e só então inseridas no BDG. No SPRING, as imagens foram transformadas por Principais Componentes (PC), que além de concentrar as informações de todas as bandas na PC1, possui também a maior variância (maior contraste) e maior média (maior brilho).

2.2 Análise geoestatística

O primeiro passo foi a conversão da carta da rede de drenagem que se encontrava no formato vetorial para o matricial, pois o SPRING leva em consideração o número de pixels de cada drenagem. A dimensão média e a distribuição das drenagens permitiram que a área fosse dividida em células de 4.000 x 4.000 metros, criando inicialmente um mapa temático, o qual foi transformado em cadastral e assim foram associados os atributos, no caso a rede de drenagem, que serviu para armazenar a densidade de drenagem. Neste procedimento foram utilizados os operadores de álgebras de mapas Conte e Média Zonal, os quais contam o número de pixels de cada drenagem e inserem na tabela de objetos a média do número de pixels em cada célula (parâmetro Z estimado). Para criar o plano de amostragem (do modelo numérico) utilizou-se a ferramenta de geração de pontos amostrais, estando agora no formato adequado para aplicar o método da Krigagem ordinária.

Antes da aplicação das ferramentas geoestatísticas, os dados foram analisados pelos procedimentos de análise estatística descritiva, para visualizar o comportamento geral dos dados e, então, melhorar a eficiência da análise geoestatística (ALVES, 1987). Assim, as estatísticas univariadas fornecem um meio de organizar e sintetizar um conjunto de valores, que se realiza principalmente através do histograma, cujas características importantes de análise são as medidas de localização, de dispersão e de forma (COSTA NETO, 1977).

De acordo com Landim (2006), a análise geoestatística compreende os seguintes passos: levantamento do semivariograma experimental; ajuste a uma família de modelos de semivariogramas e validação do modelo a ser utilizado nos procedimentos da krigagem e por fim, a aplicação da krigagem ordinária, propriamente dita. Deste modo, inicialmente, gerou-se um semivariograma omnidirecional para maximizar o número de pares em cada intervalo de distância, para produzir um variograma mais suavizado. Em seguida, realizou-se a análise por superfície do semivariograma omnidirecional, visando verificar a ocorrência ou não de uma anisotropia. A anisotropia indica as direções de maior e menor continuidade espacial da variável. É importante que o semivariograma experimental tenha uma aparência mais próxima de um modelo teórico a ser ajustado. Isto garante que o ajuste seja mais representativo e assim, as estimativas obtidas a partir da krigagem sejam mais exatas e, portanto, mais confiáveis (LANDIM, 2003). O ajuste do semivariograma ao modelo teórico estima os valores do efeito pepita, a contribuição e o alcance para um determinado modelo. É imprescindível testar todos os modelos para verificar o melhor ajuste, que é definido pelo menor valor de Akaike. Então, verifica-se a validação do modelo através do histograma dos valores observados x estimados e do diagrama e estatística do erro (ANDRIOTTI, 2005); e por fim, realiza-se a krigagem ordinária, propriamente dita. Foi utilizada a krigagem ordinária 2D e tem-se, então, um produto representado por uma imagem interpolada em nível de cinza (NC).

2.2 Processamento digital

A última etapa foi o processamento da imagem interpolada em NC por fatiamento e a posterior equalização de histograma para obter o mapa temático de interesse. No SPRING, o fatiamento é feito de modo interativo, onde o usuário define o tipo de fatiamento e o número

de fatias. O tipo de fatiamento escolhido foi o arco-iris, o qual segue a seqüência do arco-iris, como o próprio nome já indica e o número de fatias foi quatro. A equalização do histograma é uma manipulação do histograma de forma que as classes ou fatias não necessitam ter os mesmos intervalos, pois as mesmas são definidas pela freqüência dos níveis de intensidade. Este procedimento, juntamente com o fatiamento por arco-iris, foi possível separar de forma objetiva quatro classes de densidade de drenagens. Estas quatro classes possuem o valor interpolado Z, que varia de 1.023 a 4.851 e as classes de baixa densidade possuem valores entre 1.023 e 2.446, a medianamente baixa entre 2.446 e 3.201, a medianamente alta, 3.201 e 4.062 e por fim, a classe de alta densidade de drenagem, entre 4.062 e 4.851.

3. Apresentação e análise dos resultados

Após a extração da rede de drenagem utilizando as imagens CBERS-2B e obter o parâmetro Z, gerou-se um semivariograma omnidirecional e pela análise de superfície (Figura 2) constatou-se uma anisotropia com maior variação anisotrópica na direção de 26 graus e menor, na direção ortogonal (116 graus).

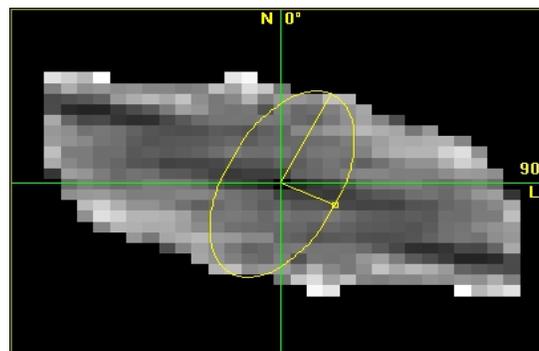


Figura 2. Semivariograma por análise de superfície com os eixos de anisotropia.

Desta forma, foram realizadas as análises do semivariograma nestas duas direções. Para confirmar a anisotropia confrontou-se o semivariograma unidirecional das duas direções de maior e menor variabilidade espacial com o semivariograma omnidirecional (Figura 3). Com a construção dos semivariogramas pode-se perceber que há uma grande diferença na estrutura dos dados ao longo das duas direções. Na direção 26° os valores aumentam mais rapidamente, em oposição à direção 116°, nesta, os valores são mais contínuos, confirmando assim, a maior anisotropia na direção 26°.

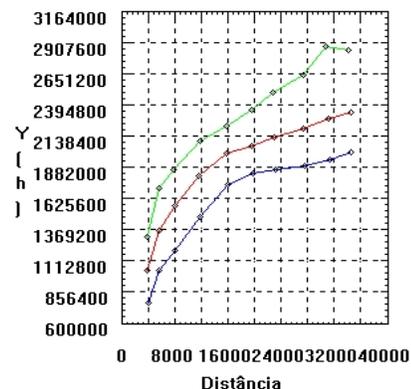


Figura 3. Análise unidirecional nas direções 0° (vermelho), 26° (verde) e 116° (azul).

O melhor ajuste a uma família de modelos dos semivariogramas foi o modelo exponencial, pois este apresentou o menor valor de akaike com relação aos modelos esférico, potência e gaussiano. Desta forma, trata-se de uma anisotropia combinada, pois foi definido um único modelo consistente da anisotropia, refletida por diferentes patamares, alcances e efeitos pepitas (Figura 4 e Tabela 1).

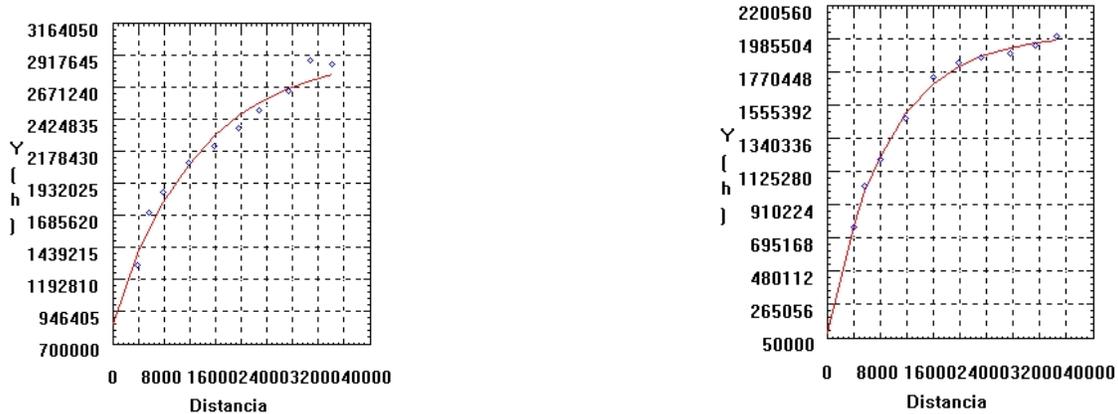


Figura 4. Semivariogramas anisotrópicos ajustados com o modelo exponencial para as direções 26 e 116 graus.

Tabela 1. Valores de akaike, alcance, Contribuição e efeito pepita para ajuste.

Direção	Efeito pepita (C_0)	Contribuição ($C_0 + C_1$)	Alcance (a)	Akaike
26°	845.126,33	2.079.255,43	40.054,17	-65,06
116°	68.073,60	1.946.577,02	27.066,40	-80,66

A modelagem da anisotropia consistiu então em dividir o semivariograma em faixas, onde cada faixa foi modelada como uma anisotropia geométrica (Figura 5). Uma vez estabelecido de forma conveniente as faixas, a anisotropia foi decomposta graficamente de modo que, cada parcela represente a anisotropia geométrica. O modelo completo e consistente para qualquer distância e direção do vetor h resume-se na soma $\gamma(h) = \gamma_1(h) + \gamma_2(h) + \gamma_3(h) + \gamma_4(h)$. Após ter gerado o modelo de ajuste para a anisotropia, fez-se a validação deste, pois sempre existe um certo grau de incerteza sobre os parâmetros utilizados. Para tal foram gerados os produtos mostrados na Figura 6 e Tabela 2.

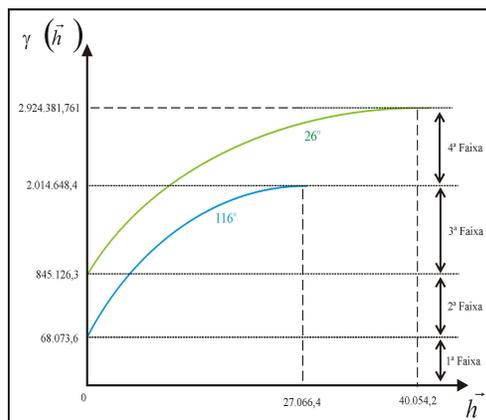


Figura 5. Análise unidirecional nas direções 0° (vermelho), 26° (verde) e 116° (azul).

Como pode ser visto pelo histograma do erro, há grande semelhança com uma distribuição normal; o diagrama observado e estimado se apresenta razoavelmente alinhados na direção de 45°, o que indica uma análise análoga, porém com alguns pontos dispersos. Pela estatística do erro, o valor da assimetria é muito baixo (próximo de zero), o que indica uma boa assimetria; o pequeno achatamento mostra uma distribuição platicúrtica e os altos valores da variância e do desvio padrão representam a grande heterogeneidade da distribuição das drenagens na área de estudo, o que influencia diretamente no valor da média, a qual não é próxima da média entre os valores mínimos e máximo.

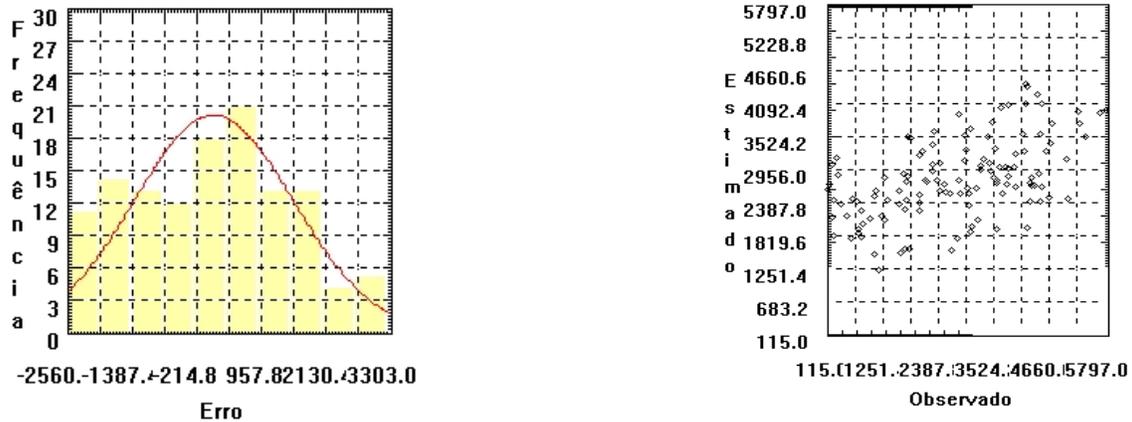


Figura 6. Validação do modelo de ajuste do semivariograma anisotrópico pelo histograma do erro e pelo diagrama observado x estimado.

Tabela 2. Validação do modelo de ajuste do semivariograma anisotrópico pela estatística do erro.

Média	Variância	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação	Coefficiente de Assimetria	Coefficiente de Curtose	Valor Máximo	Valor Mínimo
101	2.089.726	144	14,31	0,06	2,20	-1.559	3.301

A partir dos parâmetros definidos para compor o modelo anisotrópico (exponencial), executou-se a krigagem ordinária, gerando a superfície interpolada em nível de cinza (NC) e colorida, criada pelo fatiamento por arco-íris da imagem em NC interpolada (Figura 7), onde os tons de cinza mais claros ou avermelhados representam alta densidade de drenagem e os mais escuros ou azulados, baixa densidade de drenagem, claramente visível pela rede de drenagem sobreposta.

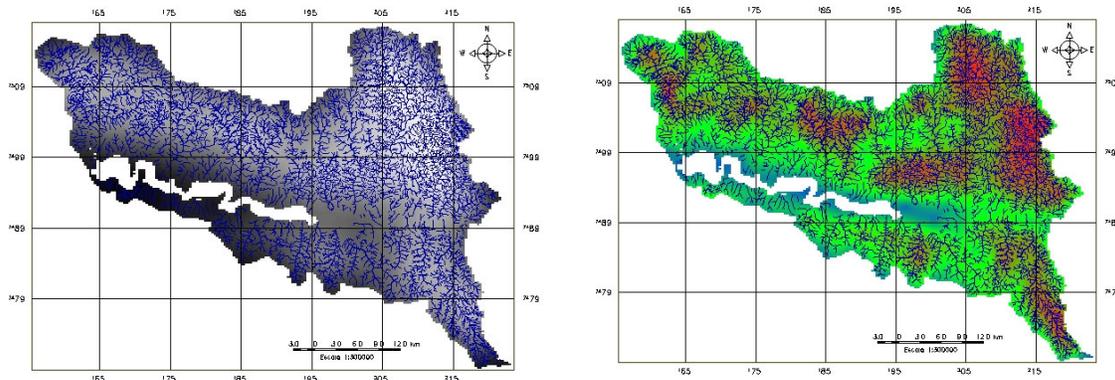


Figura 7. Imagens interpoladas em NC e colorida representativa da densidade de drenagem e a rede de drenagem.

Na Figura 8 pode-se ser observado o mapa de densidade de drenagem após a equalização do histograma. Este mapa representa as áreas de diferentes concentrações de drenagens, o que indica a capacidade de dissecação do relevo. Sem levar em consideração a área da Represa de Barra Bonita, a sub-bacia apresenta 1.461 km² de área, a classe de alta densidade de drenagem possui 224 km² (15%); a medianamente alta, 627 km² (43%); a medianamente baixa, 401 km²

(28%) e a baixa 209, km² (14%). As classes de alta e medianamente alta densidade de drenagem apresentam uma alta vulnerabilidade à erosão, cujos processos erosivos estão em estágios avançados, representados por ravinas e boçorocas, facilmente verificados em campo. A classe de baixa densidade de drenagem apresenta média vulnerabilidade à erosão, na qual ocorre um processo dinâmico entre deposição de sedimentos oriundos das demais áreas e a erosão destes sedimentos, findando no assoreamento dos canais fluviais, principalmente no rio Piracicaba e na Represa de Barra Bonita. A baixa densidade de drenagem nesta classe é devido a alta porosidade e permeabilidade dos sedimentos aluvionares, que facilita o processo de infiltração das águas pluviométricas, no entanto, a alta erosão é causada pela facilidade destes mesmos sedimentos serem carregados pelas chuvas pela falta de cimentação entre os grãos. Na classe medianamente baixa, as feições erosivas dominantes são os sulcos e raras ravinas e representa a área de menor vulnerabilidade à erosão.

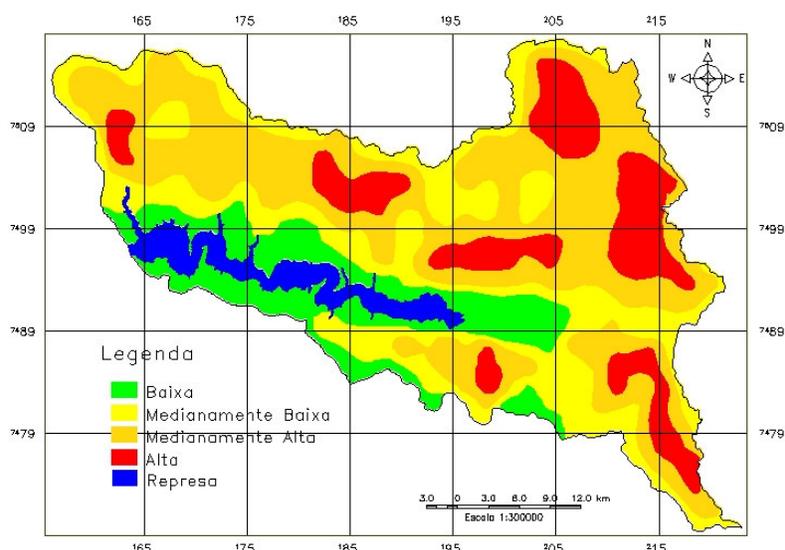


Figura 8. Mapa de densidade de drenagem da Sub-bacia do Baixo Piracicaba.

É importante ressaltar que, o mapa de densidade de drenagem representa uma importante ferramenta tecno-gerencial para priorização dos ambientes a serem protegidos e auxiliam no direcionamento dos recursos disponíveis para a recuperação e/ou minimização da degradação do terreno. Como a agricultura é um dos principais agentes propulsores do desenvolvimento dos municípios da sub-bacia, a implementação de um plano de gestão ambiental, em que a agricultura seja prioridade constitui o caminho a percorrer para o desenvolvimento econômico e social da região. A realidade da ocupação da área de estudo pelas pastagens e cana-de-açúcar é adversa aos princípios de um desenvolvimento econômico sustentável, pois a atividade rural está inadequada com a capacidade do ambiente em sustentar esta atividade em várias porções da sub-bacia, principalmente nas planícies de inundação e nas encostas das Serras de São Pedro e Itaqueri.

4. Conclusões

Conclui-se que os procedimentos geoestatísticos adotados mostraram-se eficientes na espacialização da rede de drenagem e na respectiva confecção do mapa da densidade de drenagem. É importante ressaltar que a utilização das imagens CBERS-2B restauradas e os processamentos digitais (fatiamento por arco-íris e equalização do histograma) foram essenciais para atingir o objetivo deste trabalho.

Pelo este mapa da densidade da rede de drenagem e por trabalho de campo, conclui-se também que existem áreas distintas quanto à vulnerabilidade à erosão. Assim, a área apresenta: 58% de alta vulnerabilidade à erosão, representada pelas classes de densidade de drenagem alta e medianamente alta; 14% de média vulnerabilidade (classe de densidade de drenagem baixa); e 28% de baixa vulnerabilidade aos processos erosivos (classe de densidade de drenagem medianamente baixa).

Recomenda-se o estabelecimento de diretrizes e prioridades de recuperação das áreas degradadas, tanto para a preservação ambiental, quanto para propor um nível de segurança adequado aos empreendimentos da agroindústria da região, minimizando os processos erosivos e de assoreamento. Estes processos são mais intensos nas planícies de inundação e nas encostas das serras, ambientes que se encontram desmatados, constituídos por solos expostos e por pastagens e cana-de-açúcar. De acordo com o Artigo 2º da Lei 4.771 de 15 de Setembro de 1965, do Código Florestal, modificado pela Lei 7.803 de 18 de Julho de 1989, estes ambientes são áreas de proteção permanente (APP).

Referências bibliográficas

- Alves, M. I. F. **Introdução à análise exploratória de dados**. Piracicaba: ESALQ/USP, 1987. 40p.
- Andriotti, J. L. S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo: UNISINOS, 2005. 165.
- Christofoletti, A. A análise da densidade de drenagem e suas implicações geomorfológicas. **Geografia**, v.36, n.8, p.23-42, 1979.
- Christofoletti, A. Variabilidade espacial e temporal da densidade de drenagem. **Notícia Geomorfológica**. v.21, n.42, p.3-22, 1981.
- Collares, E. G. **Avaliação de alterações em redes de drenagem de microbacias como subsídio ao zoneamento geoambiental de bacias hidrográficas**: aplicação na Bacia Hidrográfica do Rio Capivari –SP. 2000. 194p. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2000.
- Costa Neto, P. L. **Estatística**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977. 364p.
- Landim, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. São Paulo: Editora UNESP, 2003. 253p.
- Landim, P. M. B. Sobre geoestatística e mapas. **Terra e Didática**. v.2, n.1, p.19-33, 2006.