

## UM INDICADOR DE VULNERABILIDADE PARA SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

Thomaz Correa e Castro da Costa<sup>1</sup>  
Elaine Cristina Cardoso Fidalgo<sup>2</sup>  
Mariella Camardelli Uzeda<sup>3</sup>  
Maria José Zaroni<sup>4</sup>  
Uebi Jorge Naime<sup>5</sup>  
Saulo Pedrinha Guimarães<sup>6</sup>

### RESUMO

Sub-bacias são compartimentos para o gerenciamento ambiental, possibilitando o monitoramento hidrológico, a conservação do solo e a disciplina do uso da terra, para produção de água em qualidade e quantidade, proteção da biodiversidade e a produção sustentável. As sub-bacias do Estado do Rio de Janeiro foram parametrizadas com o objetivo de indicar o grau de vulnerabilidade, relacionado à erosão do solo, pela análise multicritério (AMC). O resultado indica que sub-bacias mais vulneráveis à erosão concentram-se, principalmente, na região noroeste do Estado, indicadas como prioritárias para programas de recuperação ambiental.

**Palavras-chave:** suporte a decisão, erosão, bacias hidrográficas, SRTM.

### THE VULNERABILITY INDEX FOR WATERSHED OF THE RIO DE JANEIRO STATE

### ABSTRACT

Watersheds are paths of environment management for hydrologic monitoring, soil conservation and land use restriction, because the product water in quality and quantity, biodiversity protect, etc. The watersheds of the Rio Janeiro State was parameters with objective of indicate the agree vulnerability of the soil erosion by multi-criteria evaluation (MCE). The result indicate that watersheds more vulnerability à erosion occur prior in northwest State, indicate of the areas for environment recuperation programs.

<sup>1</sup> Doutor em Ciências Florestais – Sensoriamento Remoto. Pesquisador da Embrapa Solos, Rua Jardim Botânico, 1024 - 22460-000 – Rio de Janeiro - RJ, Brasil E-mail: thomaz@cnpms.embrapa.br.

<sup>2</sup> Doutora em Planejamento e Desenvolvimento Rural Sustentável. Pesquisadora da Embrapa Solos, Rua Jardim Botânico, 1024 - 22460-000 – Rio de Janeiro - RJ, E-mail: efidalgo@cnpas.embrapa.br.

<sup>3</sup> Doutora em Manejo de Recursos Naturais Renováveis- Agroecologia. Pesquisadora da Embrapa Agrobiologia, Rodovia BR 465, km 7 – 23890-000 - Seropédica – RJ, E-mail: mariella@cnpab.embrapa.br.

<sup>4</sup> Mestre em Levantamento e Classificação de Solos. Pesquisadora da Embrapa Solos, Rua Jardim Botânico, 1024 - 22460-000 – Rio de Janeiro - RJ, E-mail: zaroni@cnpas.embrapa.br.

<sup>5</sup> Mestre em Levantamento e Classificação de Solos. Pesquisador da Embrapa Solos, Rua Jardim Botânico, 1024 - 22460-000 – Rio de Janeiro - RJ, E-mail: ujn@cnpas.embrapa.br.

<sup>6</sup> Geólogo. Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Funcionário da EPE, Av. Rio Branco, 1 – 11º andar, Centro - 20.090-003 - Rio de Janeiro – RJ, E-mail: [saulopedrinha@gmail.com](mailto:saulopedrinha@gmail.com).

Agradecemos à Fundação CIDE, ao Instituto Biomas, à Fundação SOS Mata Atlântica, à SERLA, pelo fornecimento de dados e sugestões, também ao pesquisador Francisco Lumbresas, e ao Critical Ecosystem Partnership Fund (CEPF), Conservação Internacional (CI) e Rede para Conservação da Mata Atlântica, pelo apoio financeiro ao Projeto “Estratégias e Ações para Conservação da Mata Atlântica do Estado do Rio de Janeiro”, de onde originou este trabalho como um dos seus componentes.

**Keywords:** decision support, erosion watershed, srtm.

## INTRODUÇÃO

A vulnerabilidade do solo à erosão pode ser indicada por parâmetros físicos e químicos, processos biológicos e antropogênicos. Os parâmetros antropogênicos, como a conversão da cobertura vegetal em outros usos, principalmente agropecuários, são responsáveis por expressivas alterações do ambiente natural e mudanças na paisagem que, intensificadas, podem levar à degradação.

Os impactos provocados pela erosão do solo se expressam direta e indiretamente, como a perda de fertilidade e estrutura do solo, o assoreamento e a contaminação dos recursos – água e solo, a redução na biodiversidade, dentre outros.

Para estimar um índice de vulnerabilidade, ou mesmo quantificar a perda do recurso solo por erosão laminar, foram criados modelos, como a equação empírica USLE (Universal Soil Loss Equation) (Wischmeier & Smith, 1978), e o modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project). Este último estima perda de solo, deposição e taxa de arraste de sedimentos em sulcos ou em escala de bacias hidrográficas (Flanagan & Nearing, 1995), de maior complexidade, e exige um grande número de parâmetros de entrada (Bacchi *et al.*, 2000).

A especificidade destes modelos, desenvolvidos experimentalmente, mostra que são apropriados para aplicação em escalas maiores, como uma gleba de terra ou uma microbacia. Em larga escala, quando existe conectividade entre feições, como em bacias a montante e a jusante, ou quando a erosão de uma área pode contribuir com o assoreamento de outras áreas, pode-se citar como limitações ao seu emprego a necessidade de processamento de um grande volume de dados e a perda de precisão.

Uma forma de indicar vulnerabilidade de terras em larga escala é considerar a sub-bacia hidrográfica como unidade e incluir variáveis de fluxo hídrico.

Para variáveis obtidas por bacias hidrográficas, com pertinência à vulnerabilidade das terras, ainda não existem modelos empíricos, não sendo possível estabelecer relações estatísticas e construir funções, mesmo porque o índice de vulnerabilidade não é uma variável mensurável.

Uma das alternativas para integrar variáveis com pertinência à vulnerabilidade é aplicar um modelo de suporte à decisão. Um modelo usual e simples é a análise multicriterial (AMC), que executa a agregação de critérios, com a combinação linear de

pesos, WLC (Eastman et al., 1995), para gerar variáveis objetivo, como índices de vulnerabilidade (Mendes, 2001; Fuller et al., 2002; Costa et al., 2003).

Esta técnica permite integrar uma complexidade de fatores de diferentes naturezas e escalas, atendendo a um ou múltiplos objetivos, embora forneça resultados com menor consistência e de difícil validação, comparado a um modelo empírico. Sua estratégia é o equilíbrio entre máxima descompensação entre fatores e o máximo risco (Eastman et al., 1995).

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um índice de vulnerabilidade das terras para sub-bacias hidrográficas considerando parâmetros de solo, clima, relevo, incorporando variáveis morfométricas, e de uso da terra, além de um parâmetro de conectividade entre sub-bacias.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

O índice de vulnerabilidade foi desenvolvido para as sub-bacias hidrográficas do Estado do Rio de Janeiro, utilizando-se parâmetros de solo, topográficos e morfométricos compatíveis com a escala 1:100.000, e parâmetros de uso da terra na escala 1:250.000. O parâmetro erosividade da chuva (R) foi obtido a partir da interpolação de 75 estações meteorológicas.

Para a construção do índice de vulnerabilidade para sub-bacias foram primeiramente extraídas variáveis morfométricas e topográficas. Posteriormente foram estimados os parâmetros erosividade e erodibilidade da Equação Universal de Perda de Solos (USLE), e extraídas variáveis de uso/cobertura da terra por sub-bacias. Por fim foi aplicada uma integração temática com todos os parâmetros para obter a vulnerabilidade de bacias.

Para a delimitação de sub-bacias e a extração das variáveis morfométricas foi utilizado o modelo digital de elevação DEM/SRTM (NASA, 2005), resolução 90 x 90m, compatível com a escala 1:100.000 (Santos et al. 2005). Para corrigir o modelo foram realizadas operações de interpolação de falhas, atenuação de ruídos e ajuste de depressões (Costa et al., 2005a). As pequenas falhas foram interpoladas pela média de pixels vizinhos. As regiões com grandes falhas foram interpoladas separadamente, usando o método de kriging, por meio do software GSTAT (Pebesma, 1998).

A atenuação de ruídos foi realizada com a transformação de Fourier. A finalidade desta transformação é reconstituir uma imagem corrigida ou melhorada, com um

procedimento de filtragem no domínio das frequências (Jensen, 1996, Figueiredo, 1977, Eastman, 2003).

O ajuste de depressões, que impedem a continuidade do fluxo hídrico, foi executado, identificando pixels com cotas mais baixas, que têm variação de cota maior que o limiar estabelecido em relação a sua vizinhança, para serem uniformizados para a cota mais baixa da vizinhança, permitindo a continuidade do fluxo.

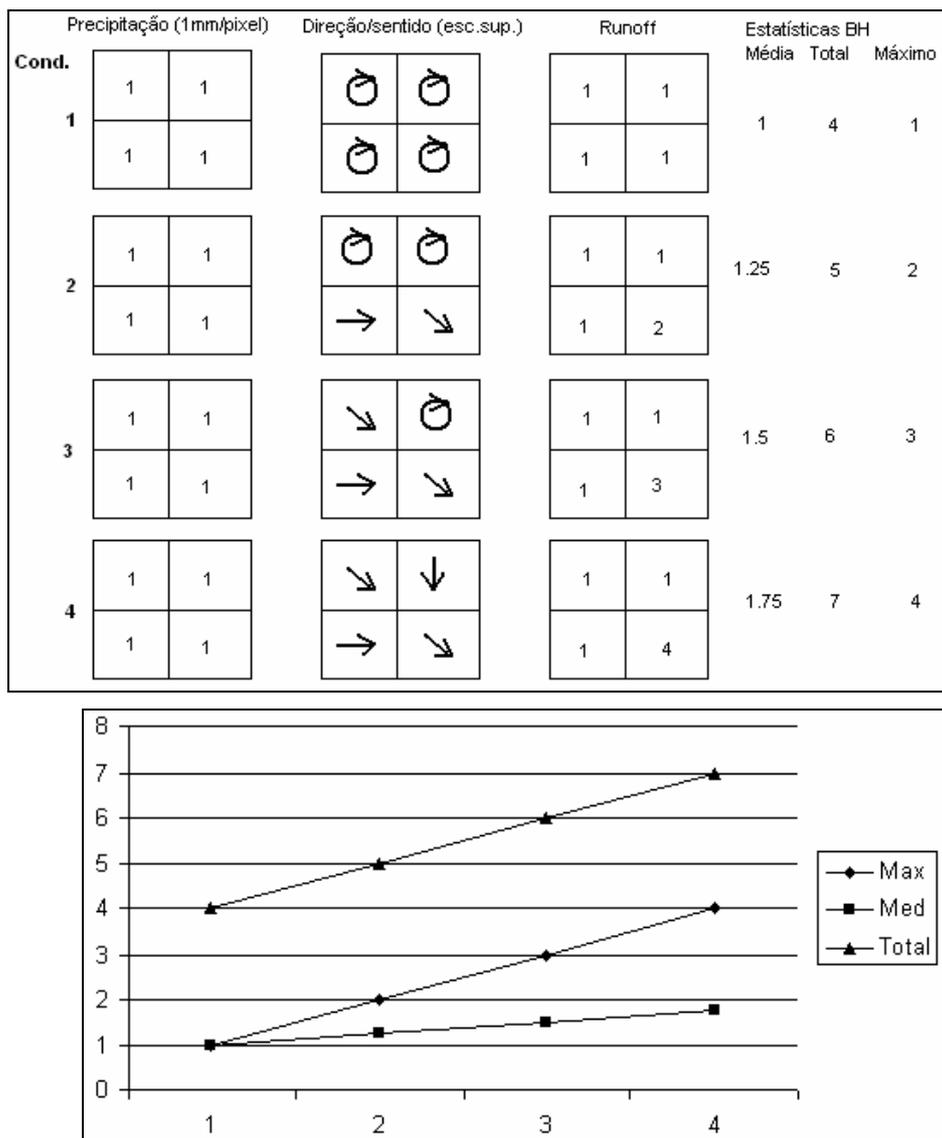
A delimitação de sub-bacias foi gerada automaticamente (método proposto por Janson & Domingue (1988)) com o modelo DEM SRTM e editada com o apoio das Cartas Topográficas, escala 1:50.000, do DSG e do IBGE.

Baseando-se em uma revisão sobre a obtenção e o emprego de variáveis morfométricas (Collares, 2000; Teixeira & Cruz, 2005; Ribeiro & Salomão, 2003; Milani & Canali, 2000; Rocha, 1991), foram extraídos os parâmetros morfométricos e topográficos das sub-bacias, adequados para a escala de trabalho, os quais são descritos a seguir.

### **Escoamento Superficial (RUNOFFBH)**

O Escoamento Superficial é um parâmetro que indica a contribuição de cada pixel em relação à captação pluvial e recepção de água de áreas vizinhas, e de bacias a montante, na direção do fluxo hídrico.

O parâmetro indicador da magnitude do escoamento superficial para uma sub-bacia é o seu valor máximo, conforme o exemplo dado na Figura 1. Na comparação entre a média, total e valor máximo, a média atenua a intensidade real de escoamento na bacia, enquanto o parâmetro total o superestima, porque acumula o escoamento. O parâmetro que informa o escoamento superficial total da chuva na bacia é o valor máximo do pixel que se encontra na foz. E, por causa da conexão entre bacias a montante e a jusante, este valor não é somente a quantidade de chuva receptada pela bacia, mas indica bacias com maior recepção na drenagem considerando bacias a montante.



**Figura 1.** Estatísticas do escoamento superficial para uma área de captação de quatro pixels, variando da condição completamente plana para o máximo escoamento superficial, com recepção de 1mm de chuva por pixel.

### Densidade de Drenagem

É dada pela fórmula  $DD = \frac{CD}{A}$ , sendo CD = comprimento de drenagem, dado

por  $CD = \sum R + \sum C + \sum T$ , sendo R=ravinas; C=canais; e T= tributários, em km; e A = área da sub-bacia, em ha.

Para a detecção da drenagem a partir do modelo digital de elevação, o escoamento superficial foi reclassificado a partir de um limiar. A rede de drenagem obtida desta forma é imprecisa em continuidade para áreas com menor declive, mas detecta

ravinas, canais e tributários não restituídos nas Cartas de Levantamento Sistemático do DSG e do IBGE.

Para estimar o comprimento da drenagem na estrutura raster, formada por segmentos contínuos de pixels de 90 x 90 m, executou-se o procedimento descrito em Costa et al. (2005b).

Para validação da densidade de drenagem, os valores estimados foram comparados com os valores de 13 microbacias da Sub-bacia do Rio Soturno (Costa et al. 2005b), obtidos por Rocha (1991).

### **Índice de Circularidade**

É dado pela expressão  $IC=A/AC$ , sendo  $A$ = área da bacia (ha) e  $AC$ =área do círculo de perímetro igual ao da bacia considerada ( $AC=P^2/4\pi$ ).  $IC$  é um parâmetro que mede a proximidade da forma da bacia ao círculo. Quanto mais próxima da forma circular ( $\approx 1$ ), maior o risco de erosão, assoreamento e enchentes na bacia. Este risco está relacionado com a velocidade e sincronia de tempo entre os escoamentos da água da chuva provenientes das cabeceiras.

Numa bacia de forma próxima da circular os escoamentos convergem em instantes similares para pontos próximos, aumentando rapidamente o deflúvio acumulado para o canal principal da bacia, potencializando a carga hídrica, os processos erosivos, o assoreamento e com maior risco de enchentes. Em uma bacia alongada o deflúvio ocorre em pontos distantes e com um tempo para estes escoamentos chegarem ao mesmo ponto do canal principal, chegam em tempos diferentes, resultando em menor vazão.

### **Declividade Média (DECL)**

A declividade foi derivada do modelo digital de elevação DEM/SRTM, compatível com a escala 1:100.000.

### **Desvio padrão da altitude (DPALT)**

É um parâmetro complementar à declividade média, mensurando a dispersão da altitude. Bacias com maior dispersão em altitude apresentam maior velocidade hídrica,

devido às maiores amplitudes topográficas e, portanto, maior capacidade de arraste do solo, sendo mais vulneráveis.

### **Cobertura e Uso da Terra**

As classes de uso/cobertura da terra consideradas se referem às de maior ocorrência no mapeamento, e correspondem as proporções de área na sub-bacia. Foram consideradas: área relativa da cobertura florestal (COBVEG) (Área Fragmentos/Área Sub-bacia) do mapeamento de remanescentes da Mata Atlântica (Fundação SOS Mata Atlântica, 2002), na escala 1:50.000; e áreas relativas de agricultura (AGRIC), pastagem (PAST) e área urbana (URBAN), extraídas do mapeamento do Uso e Cobertura da Terra (FCIDE, 2000).

### **Parâmetros erosividade e erodibilidade da Equação Universal de Perda de Solo**

A USLE é uma equação empírica não linear que estima perda de solo (A), em ton/ha.ano, por meio dos fatores R = erosividade da chuva (MJ.mm/ha.h.ano), K = erodibilidade do solo (ton.h/MJ.mm), L = comprimento de rampa (m), S = declividade (classes em graus), C = uso e manejo (magnitude da contribuição), e P = práticas conservacionistas (magnitude da mitigação):  $A = R \times K \times L \times S \times C \times P$ .

Os parâmetros considerados para vulnerabilidade de bacias foram: erosividade (R), medida da intensidade e energia cinética da chuva, e erodibilidade (K), determinada pelas características físicas, químicas e morfológicas do solo. A seleção desses fatores deve-se ao fato de se constituírem em variáveis relativas ao clima e ao solo, ainda não consideradas no modelo.

As demais variáveis, L e S, topográficas, com intuito de representar as forças da gravidade e da velocidade da água sobre o solo, e o fator C, de uso/cobertura da terra, considerado pela sua maior ou menor proteção do solo, foram substituídas pelas variáveis extraídas por bacias, DPALT, DECL, RUNOFFBH, COBVEG, AGRIC, PAST, URBAN. O fator P não foi considerado.

O fator R foi estimado pela soma dos valores mensais do índice de erosividade, em MJ.mm/ha.h.mes obtidos pela equação  $R_m \approx EI_{30} \approx 89,823 (r^2/P)^{0,759}$ , recomendada por Lombardi para as condições do Estado do Rio de Janeiro, em Carvalho Júnior (1985). Esta equação é uma aproximação do produto da energia cinética da chuva (E) pela sua

intensidade máxima em 30 min (I30). Foram utilizados os dados de precipitação mensal (r) e anual (P), em mm, da série histórica de 1973 a 2000, de 18 estações pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e 59 estações pluviométricas da Agência Nacional de Águas (ANA) (Agência..., 2005; Alfonsi et al., 2003).

A espacialização da erosividade foi gerada pela interpolação por kriging no software GSTAT (Pebesma, 1998) incorporado pelo software IDRISI Kilimanjaro (Eastman, 2003).

Para estimar o fator K, foi necessário o mapa de solo do Estado do Rio de Janeiro publicado em Carvalho Filho et al. (2003a; 2003b), na escala 1:250.000. O fator K foi obtido por consulta de material bibliográfico, associando valores de K de classes iguais ou similares às ocorrentes no Estado do Rio de Janeiro, que foram sistematizados, ponderados e eliminados os outliers, gerando valores de K padronizados, conforme procedimento descrito em Costa et al. (2005c).

As comparações entre fatores foram realizadas pelo coeficiente de correlação de postos de Spearman (Siegel, 1956) não paramétrico, devido à natureza não paramétrica de alguns dados.

### **Integração temática para obtenção de índices de vulnerabilidade**

O índice de vulnerabilidade de sub-bacias do Estado do Rio de Janeiro foi calculado por meio da AMC, com agregação de critérios pelo método da combinação linear de pesos (WLC), em que a variável objetivo (S) é o índice de vulnerabilidade, resultado da aplicação de pesos ( $w_i$ ) aos fatores ( $x_i$ ), segundo a equação:

$$S = \sum w_i x_i$$

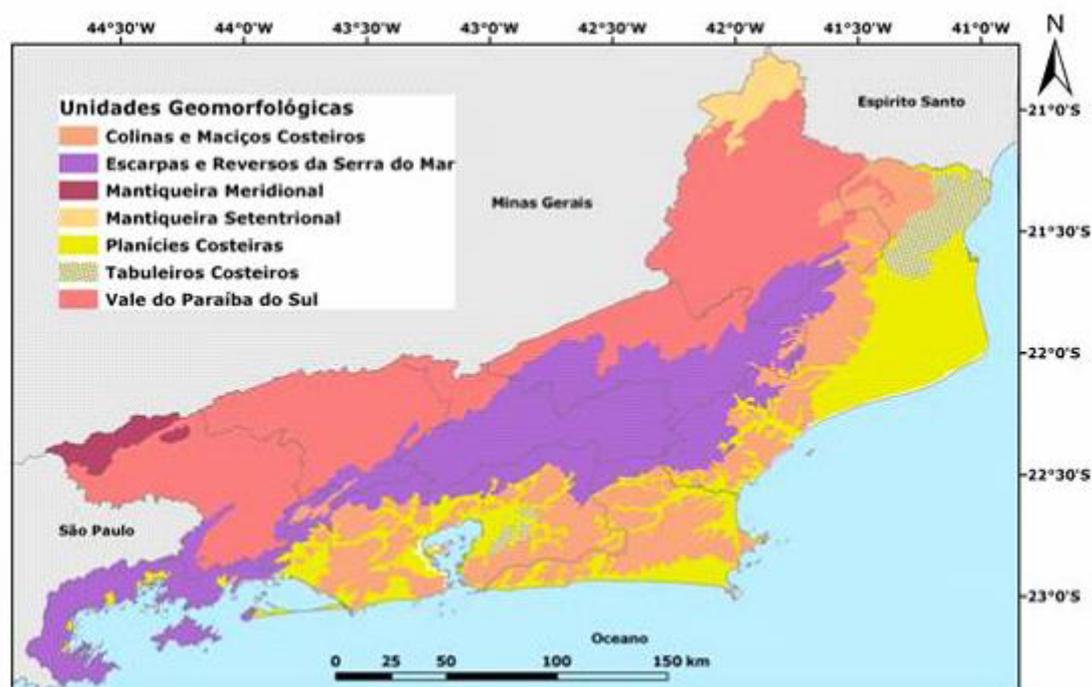
A atribuição de pesos extrínsecos ( $w_i$ ) aos fatores, de acordo com seu grau de importância, é feita com o auxílio da AHP (Analytical Hierarchy Process), conforme os graus de hierarquia entre os fatores par a par, extraídos de uma escala de 9 pontos (Saaty, 1977). A AHP gera os pesos finais e um índice de consistência (Eastman, 2003).

Por causa das diferentes escalas em que cada fator é mensurado, esses foram normalizados para uma escala contínua (1byte) que se estende do valor de menor vulnerabilidade (0) para o valor de maior vulnerabilidade (255). A transformação de valores originais foi linear, que segue a relação de pertinência de cada fator, sendo a proporção de cobertura vegetal o único fator com relação inversa à vulnerabilidade de bacias.

Os resultados obtidos foram analisados por compartimento geomorfológico do Estado do Rio de Janeiro, tomando-se como referência o Mapa em escala 1:1.000.000 (IBGE, 1983).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os compartimentos geomorfológicos no Estado do Rio de Janeiro são mostrados na Figura 2.



Fonte dos dados de unidades geomorfológicas:  
Projeto RADAMBRASIL. Folhas SF 23/24 Rio de Janeiro/Vitória, geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro, 1983. 780 p. 6 mapas. (Levantamento de Recursos Naturais, 32).

**Figura 2.** Unidades Geomorfológicas ocorrentes no Estado do Rio de Janeiro.

Para a Densidade de Drenagem (DD) Valores baixos podem estar associados a rochas resistentes, solos muito permeáveis ou relevo suave (Rocha, 1991). A densidade de drenagem é alta, entre 0.025 e 0.031km/ha, nas Unidades dos Maciços Costeiros, Escarpas Serranas (Serra do Mar - Planalto da Bocaína e Serra dos Órgãos) e Mantiqueira Meridional - Planalto de Itatiaia. Apesar da grande propensão a processos erosivos, estes não ocorrem de maneira intensa devido à preservação da cobertura vegetal existente em parte destas unidades.

Densidades intermediárias ocorrem nas depressões e nos alinhamentos de cristas do Paraíba do Sul, incluindo compartimentos planálticos do Leste de Minas, no Noroeste Fluminense e nas Colinas e Maciços Costeiros próximos ao litoral. E regiões com densidade de drenagem baixa podem ser encontradas na baixada litorânea a leste do Estado, constituída das Unidades Planícies Costeiras e Tabuleiros de Bacias Sedimentares, onde ocorre predominância de terrenos sedimentares, em que raramente aflora o substrato rochoso, isto faz com que a transmissibilidade do terreno seja alta, diminuindo a densidade de drenagem nestas regiões. Estas unidades apresentam um baixo potencial de vulnerabilidade aos processos erosivos e movimentos de massa devido as suas declividades pequenas e ao seu relevo suave.

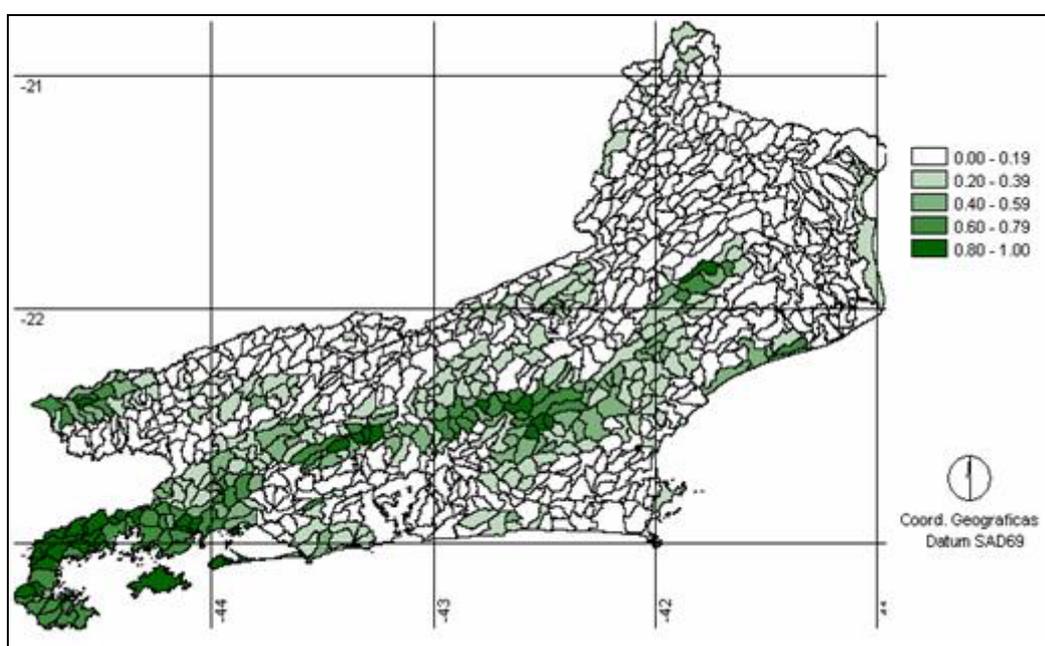
Para o Índice de Circularidade (IC) quase não se observou uma associação entre o formato da bacia e a geomorfologia, com a distribuição heterogênea do formato de bacias em quase todas as formações, com exceção do norte fluminense, com depósitos sedimentares (planícies e tabuleiros), onde predomina a forma alongada de bacias hidrográficas.

Para a declividade média (%) da sub-bacia (DECL), as sub-bacias com menor declividade encontram-se na faixa de elevação entre 0 e 50 m, onde ocorrem as maiores intensidades de ocupação urbana e atividades agrícolas. E muitas sub-bacias com maiores desvios padrão da altitude na bacia (DPALT) encontram-se protegidas por unidades de conservação, como o Parque Nacional de Itatiaia e a APA da Serra da Mantiqueira, Parque Nacional dos Três Picos, Parque Nacional da Serra dos Órgãos, Reserva Biológica do Tinguá, Parque Nacional da Serra da Bocaina e Parque Estadual do Desengano. Devido à declividade constituir-se em um impedimento natural ao uso das terras, estas áreas mantiveram os grandes remanescentes da Mata Atlântica, que foram posteriormente protegidos pelo poder Público.

A maior magnitude de escoamento superficial (RUNOFFBH) ocorre no Norte Fluminense, em direção à Lagoa Feia, e para o oceano, na Bacia de Campos. Nesta mesma região ocorre uma concentração de sedimentos na faixa litorânea em direção ao oceano, identificada em imagens de satélite, relacionada talvez com o potencial de escoamento hídrico do continente. A moderada magnitude de escoamento superficial ocorre nos cordões arenosos, no Delta do Paraíba do Sul, na saída para o manguezal de Guapimirim, ainda preservado, que serve como um dissipador de energia, depositando sedimentos antes de atingir a Baía de Guanabara. Outra região é a da Baía de Sepetiba, onde se observa também alguma suspensão de sedimentos. Outras sub-bacias de maior magnitude de

escoamento superficial e com baixa cobertura vegetal, ocorrem no Noroeste Fluminense e na Bacia do Paraíba do Sul.

A ausência da cobertura vegetal é um fator crucial na vulnerabilidade de sub-bacias, principalmente em áreas críticas, como as de preservação permanente, definidas pelo Código Florestal, Lei 4.771 de 1965. Bacias com até 19.99% de cobertura vegetal (COBVEG) estão em desconformidade com o código florestal, enquanto as com cobertura acima de 20% podem atender ao computo de reserva legal exigido pelo Código Florestal na região sudeste (Figura 3). Neste caso, não foram consideradas as áreas de preservação permanente.



**Figura 3.** Proporção de áreas com remanescentes florestais extraídas do Mapeamento da Cobertura da Terra (SOS Mata Atlântica, 2000) para as Sub-bacias do Estado do Rio de Janeiro.

A agricultura (AGRIC) é um dos principais fatores de degradação, devido ao manejo inadequado que expõe o solo à erosão hídrica, afeta a estrutura e reduz a matéria orgânica. As áreas com ocorrência de agricultura distribuem-se na região Norte Fluminense, com o predomínio da lavoura de cana de açúcar; em Cachoeiras de Macacu, com olericultura, milho, etc.; na região Serrana, também com olericulturas; na região de Silva Jardim, Casimiro de Abreu; e em Mangaratiba.

As pastagens (PAST), também constituem um fator de vulnerabilidade, pois em manejos inadequados e em áreas inaptas são causa de compactação e perda da fertilidade do solo, resultando em processos erosivos, como ravinamentos, erosão laminar e até voçorocamentos.

As áreas com pastagens distribuem-se por todo o estado do Rio de Janeiro, com exceção de uma área onde o domínio é da agricultura, no Município de Campos. Sua maior concentração é na região Noroeste Fluminense, na região dos Lagos e no Vale do Paraíba do Sul.

As áreas urbanas (URBAN) têm impactos potenciais em sub-bacias hidrográficas, exigindo ações corretivas pontuais, com uma gestão ambiental distinta do escopo rural. A impermeabilização do solo (aumentando o risco de enchentes), a ocupação em áreas com risco de deslizamento e a disposição de resíduos urbanos e industriais são alguns dos problemas relacionados com a vulnerabilidade em bacias hidrográficas urbanas.

As bacias com ocorrência de áreas urbanas correspondem à região Metropolitana do Rio de Janeiro, região dos Lagos e de Angra dos Reis, Bacia de Campos, região Serrana, Vale do Paraíba, e demais núcleos urbanos distribuídos pelo Estado.

A variação de erosividade (R) entre as estações pluviométricas, ficou entre 4008 e 11.655 MJ.mm/ha.h.ano, concentrando-se os maiores valores, acima de 10.000 MJ.mm/ha.h.ano, nas Serras do Mar e da Mantiqueira, como nas estações: Represa do Paraíso, Teodoro Oliveira, Fazenda Agulhas Negras, Fumaça, e os menores valores no litoral Norte Fluminense, Região dos Lagos e na parte leste da Baía de Sepetiba, em estações como a do Farol de São Tomé, Iguaba Grande, Santa Cruz.

As regiões com solos menos erodíveis (fator K) concentram-se no Norte Fluminense, regiões alagadiças na Baía de Sepetiba e manguezal de Guapimirim na Baía de Guanabara, e as com solos mais erodíveis concentram-se na Serra do Mar.

As correlações entre os indicadores de vulnerabilidade, Densidade de Drenagem (DD), Índice de Circularidade (IC), Declividade Percentual Média (DECL), Desvio padrão da altitude na bacia (DPALT), escoamento Superficial Máximo (RUNOFFBH), Percentual de Cobertura Vegetal (COBVEG), Áreas Agrícolas (AGRIC), Áreas com Pastagens (PAST), Áreas Urbanas (URBAN), Erosividade da Chuva (R), Erodibilidade do Solo (K), estão apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1.** Correlação entre variáveis morfométricas e topográficas, da equação de perda de solo, e do uso da terra (valores significativos a 0,05 de probabilidade, em negrito, n = 883 sub - bacias).

	R	K	DD	IC	DECL	RUNOFFBH	DPALT	COBVEG	AGRIC	PAST
K	-0,0336									
DD	<b>0,4456</b>	<b>0,4527</b>								
IC	<b>0,1437</b>	<b>0,1955</b>	<b>0,3461</b>							
DECL	<b>0,4514</b>	<b>0,4444</b>	<b>0,7532</b>	<b>0,3137</b>						
RUNOFFBH	0,0337	<b>-0,0754</b>	-0,0361	<b>-0,1723</b>	0,0129					
DPALT	<b>0,4704</b>	<b>0,3828</b>	<b>0,8313</b>	<b>0,2547</b>	<b>0,9022</b>	0,0194				
COBVEG	<b>0,5371</b>	<b>0,0704</b>	<b>0,4859</b>	<b>0,1559</b>	<b>0,6116</b>	-0,0542	<b>0,6738</b>			
AGRIC	<b>-0,2225</b>	<b>-0,2544</b>	<b>-0,2991</b>	<b>-0,1669</b>	<b>-0,4080</b>	0,0380	<b>-0,3480</b>	<b>-0,2415</b>		
PAST	<b>-0,1773</b>	<b>0,2676</b>	-0,0348	<b>0,1350</b>	-0,0547	<b>0,1056</b>	<b>-0,1071</b>	<b>-0,3517</b>	<b>-0,325082</b>	
URBAN	<b>0,1250</b>	<b>-0,2384</b>	-0,0094	<b>-0,1615</b>	<b>-0,2023</b>	<b>0,0997</b>	<b>-0,0723</b>	-0,0555	0,056134	<b>-0,2292</b>

Conforme a Tabela 1, os indicadores R, DD, DECL, DPALT, COBVEG, e COBVEG, AGRIC e PAST apresentam maior correlação significativa entre si, justificando que sub - bacias susceptíveis a erosividade pela precipitação (>R), geralmente estão associadas a maior densidade de drenagem (>DD), tem maior declividade média (>DECL) e variação de altitude (>DPALT), sendo mais vulneráveis. Por compensação estas condições proporcionam um favorecimento natural, ocorrem geralmente em lugares mais úmidos e com acesso difícil (<AGRIC, <PAST), favorecendo a manutenção da vegetação (>COBVEG), que minimiza a vulnerabilidade.

Outra relação que potencializa a vulnerabilidade é a erodibilidade do solo (K) com parâmetros topográficos da bacia. Solos mais vulneráveis, como Cambissolos e Neossolos Litólicos, são geralmente rasos e associados a terrenos declivosos, conforme se observa a correlação entre K, DD, DECL, DPALT.

O índice de circularidade (IC) mostrou uma relação com a densidade de drenagem (DD).

A variável que atua com independência no modelo é o escoamento superficial (RUNOFFBH), agregando uma informação que contribui na vulnerabilidade da bacia, não expressa por outras variáveis.

Na Tabela 2 são apresentados graus de importância entre fatores (Saaty, 1977), que seguiram os seguintes critérios: DD, DECL, DPALT são variáveis com alto coeficiente de correlação entre si e tem importância similar no modelo. Para reduzir o triplo efeito destas variáveis, foi atribuído grau de 1/3 em relação aos demais fatores. O fator COBVEG foi considerado um grau de importância (3) em relação aos fatores, pelo significativo efeito protetor do solo. Em terrenos declivosos a cobertura vegetal nativa é um excelente atenuante de processos erosivos, e somente em raras situações ocorrem escorregamentos naturais. Do mesmo modo, AGRIC foi considerado um grau de importância (3), pela maior exposição do solo. Por fim, URBAN foi considerado o fator mais agravante, com dois graus de importância (5), pelo fato de alterar de forma drástica o sistema hídrico, com impermeabilização do solo, canalização de cursos d'água, ocupação em áreas de risco, etc. Os demais fatores não apresentaram hierarquização, com grau (1) entre si.

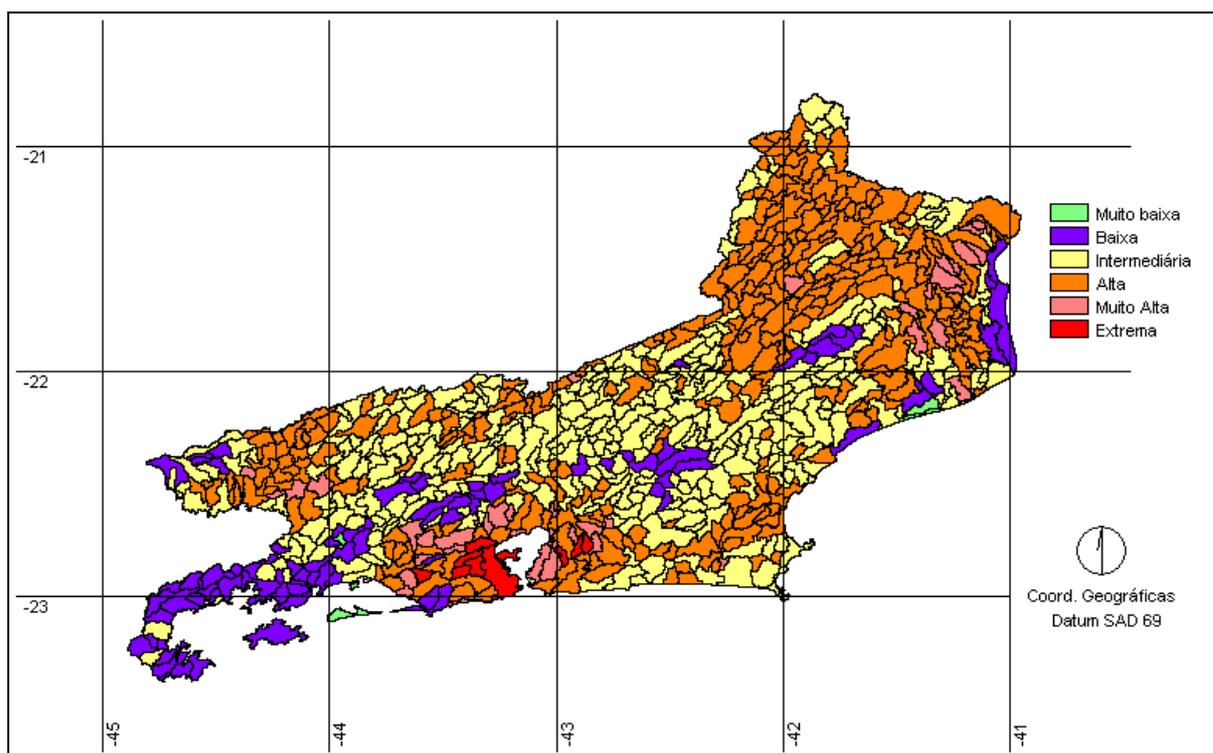
**Tabela 2.** Hierarquia de importância entre os fatores  $x_i$

$x_i$	K	R	DD	IC	DECL	DPALT	RUNOFFBH	COBVEG	AGRIC	PAST	URBAN
K	1										
R	1	1									
DD	1/3	1/3	1								
IC	1	1	3	1							
DECL	1/3	1/3	1	1/3	1						
DPALT	1/3	1/3	1	1/3	1	1					
RUNOFFBH	1	1	3	1	3	3	1				
COBVEG	3	3	5	5	5	5	3	1			
AGRIC	3	3	5	5	5	5	3	1	1		
PAST	1	1	3	1	3	3	1	1/3	1/3	1	
URBAN	5	5	7	5	7	7	5	3	3	5	1

Na Tabela 3 são apresentados os fatores com os respectivos pesos obtidos pela técnica AHP, empregados na análise multicriterial para obter o índice de vulnerabilidade de sub-bacias. O resultado é apresentado na Figura 4.

**Tabela 3.** Fatores, relações de pertinência, e seus respectivos pesos calculados pela técnica AHP (índice de consistência = 0,02) utilizados na análise multicriterial para vulnerabilidade de sub-bacias hidrográficas.

$X_i$	Pertinência	$W_i$
DD	+	0,0252
IC	+	0,0581
DECL	+	0,0252
DPALT	+	0,0252
RUNOFFBH	+	0,0619
COBVEG	-	0,1623
AGRIC	+	0,1623
PAST	+	0,0619
URBAN	+	0,2943
R	+	0,0619
K	+	0,0619



**Figura 4.** Vulnerabilidade de Sub-bacias do Estado do Rio de Janeiro.

A vulnerabilidade é maior nas sub-bacias que predominam na região Noroeste, a mais carente do Estado, com degradação de pastagens, economia estagnada e evasão rural; na Região Norte, com intensa atividade agrícola pela monocultura da cana; e em sub-bacias com aglomerados urbanos, como na Baía da Guanabara e na parte Oeste do Vale do Paraíba.

Destacam-se, na região Noroeste, sub-bacias críticas nos municípios de São Fidelis, Cambuci e São Sebastião do Alto, e na região Norte, a parte centro leste de Campos dos Goytacazes e o norte de São Francisco de Itabapoana. Na Bacia da Baía de Guanabara as sub-bacias críticas estão nos municípios de Itaboraí, São Gonçalo, porção leste de Duque de Caxias, São João de Meriti, Belfort Roxo, Nova Iguaçu, Queimados e Rio de Janeiro. No Vale do Paraíba as sub-bacias mais vulneráveis estão em Resende, Barra Mansa, Volta Redonda e Quatis, e ao norte do município de Cantagalo, e ao noroeste de Sapucaia. Um estudo do risco de erosão do solo para Volta Redonda foi obtido por Dias et al. (2001), concluindo que fatores antrópicos induziram a proliferação de áreas com instabilidade ambiental. A região dos Lagos, também por pressão urbana, tem sub - bacias mais vulneráveis ao sudeste de Saquarema, oeste de Marica, região central de Araruama e ao norte de Cabo Frio.

Algumas sub-bacias que ocorrem na Serra da Mantiqueira, Serra do Mar, e Serra da Bocaina tem vulnerabilidade intermediária a baixa pela proteção da vegetação.

Em sub-bacias com predominância da atividade agropecuária (meio rural) pode-se adotar soluções para problemas ambientais com menor custo. Sistemas de produção sustentáveis, como os agroflorestais, plantio direto, sistema integração lavoura-pecuária para a recuperação de pastagens degradadas, sistemas silviculturais com controle de área, são alguns exemplos. Sub-bacias que se encontram em áreas de grande importância biológica e estão próximas de unidades de conservação podem ser integradas às estratégias de serviços ambientais e corredores de biodiversidade. E sub-bacias muito vulneráveis e com inadequação frente a legislação ambiental devem ser prioridade para os órgãos de fiscalização ambiental e para programas de recuperação florestal.

## CONCLUSÕES

Os resultados mostraram como fatores morfométricos, topográficos, ambientais e de uso da terra se correlacionam e influem na vulnerabilidade das terras. Por meio da metodologia empregada identificaram-se sub-bacias hidrográficas que devem merecer especial atenção por serem mais vulneráveis aos processos erosivos. Os resultados buscam subsidiar e orientar estratégias de conservação no Estado do Rio de Janeiro.

## REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Águas - ANA. Disponível em: <<http://www.hidroweb.ana.gov.br>>. Acesso em: 14 abr. de 2005.

Alfonsi, R. R.; Pinto, H. S.; Zullo Júnior, J.; Coral, G.; Assad, E. D.; Evangelista, B. A.; Lopes, T. S. de S.; Marra, E.; Bezerra, H. S.; Hissa, R. H.; Figueiredo, A. F. de; Silva, G. G. da; Sucharov, E. C.; Alves, J.; Martorano, L. G.; Bouhid André, R. G.; Bastos Andrade, W. E. de. **Zoneamento Climático da Cultura do Café (*Coffea arabica*) no Estado do Rio de Janeiro**. Campinas: IAC: UNICAMP; Brasília: Embrapa Cerrados; Niterói: Pesagro-Rio; Rio de Janeiro: SIMERJ: Embrapa Solos; 2003. Disponível em: <[http://www.cpa.unicamp.br/cafe/RJ\\_menu.html](http://www.cpa.unicamp.br/cafe/RJ_menu.html)> Acesso em: 14 abr. de 2005.

Bacchi, O.O.S., Reichard, K., Sparovek, G., Ranieri, S.B.L. Soil erosion e valuation in a small watershed in Brazil through 137Cs fallout redistribution analysis and conventional models. **Acta Geologica Hispanica**, v. 35, nº 3-4, p. 251-259, 2000.

Carvalho Filho, A. De; Lumbreras, J. F.; Wittern, K. P.; Lemos, A. L.; Santos, R. D. Dos; Calderano Filho, B.; Mothci, E. P.; Iturri Larach, J. O.; Conceição, M. Da; Tavares, N. P.; Santos, H. G. Dos; Gomes, J. B. V.; Calderano, S. B.; Gonçalves, A. O.; Martorano, L. G.; Santos, L. C. de O; Barreto, W. de O.; Claessen, M. E. C.; Paula, J. L. De; Souza, J. L. R. De; Lima, T. Da C.; Antonello, L. L.; Lima, P. C. De; Oliveira, R. P. De; Aglio, M. L. D. **Levantamento de reconhecimento de baixa intensidade dos solos do estado do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003a. Contém texto e mapa color., escala 1:250.000. (Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 32). No prelo.

Carvalho Filho, A. De; Lumbreras, J. F.; Wittern, K. P.; Lemos, A. L.; Santos, R. D. Dos; Calderano Filho, B.; Calderano, S. B.; Oliveira, R. P.; Aglio, M. L. D.; Souza, J. S. De; Chaffin, C. E. **Mapa de reconhecimento de baixa intensidade dos solos do estado do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003b. 1 mapa, color. Escala 1:250.000. Disponível em: <http://www.cnps.embrapa.br/solosbr/sigweb.html>. Acesso em 14 de abril de 2005.

Carvalho Junior, W. De. **Modelos de planejamento agrícola conservacionista com suporte de geoprocessamento: estudo de caso, municípios de Paty de Alferes e Miguel Pereira – RJ**. 1985. 104p. Dissertação (Mestrado em Geoprocessamento) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

Collares, E. G. **Avaliação de alterações em redes de drenagem de sub-bacias como subsídio ao zoneamento geoambiental de bacias hidrográficas: Aplicação na bacia hidrográfica do Rio Capivari-SP**. 2000. 211p. Tese (Doutorado) – Universidade de São Carlos, Campinas.

Costa, T. C. C.; Santos, P. R. A.; Guimarães, S.P. Extração de variáveis topográficas do modelo digital de elevação SRTM para o Estado do Rio de Janeiro. **Documento** n. 76, Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2005. 26p.

Costa, T. C. C.; Souza Neto, N. C.; Oliveira, M. A. J.; Accioly, L. J. O. Estimativa da diversidade florística da caatinga por meio da análise multicriterial. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...**São José dos Campos: INPE, 2003. Artigos, p. 2689-2696. CD-Rom.

Costa, T.C.C.; Guimarães, S.P. Delineamento e parametrização ambiental de sub-bacias hidrográficas para o Estado do Rio de Janeiro. **Boletim de Pesquisa** n. 84, Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2005b. 37p.

Costa, T.C.C.; Lumbreras, J.F.; Zaroni, M.J.; Naime, U.J.; Guimarães, S.P.; Uzeda, M.C. Estimativas de perda de solo para microbacias hidrográficas do Estado do Rio de Janeiro. **Boletim de Pesquisa** n. 78, Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2005c. 46p.

Dias, J.E.; Gomes, O.V.O.; Goes, M.H.B. Áreas de riscos de erosão do solo: uma aplicação por geoprocessamento. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v.8, n.1, p.01-10, 2001.

Eastman, J. R. **IDRISI Source Code** 1987-2003. Worcester: Clark University, 1987-2003. 1 v.

Eastman, J. R.; Jin, W.; Kyem, P. A. K.; Toledano, J. Raster procedures for multi-criteria, multi-objective decisions. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v. 61, n. 5, p. 539-547, 1995.

Figueiredo, D.G. **Análise de Fourier e equações diferenciais parciais**, Rio de Janeiro: Instituto de Matemática Pura e Aplicada, CNPq, 1977. 274p. (Projeto Euclides)

Flanagan, D.C.; Neareing, M.A. USDA-Water erosion prediction project: hillslope profile and watershed model documentation. West Lafayette: NSERL. Report n.10. USDA-ARS-MWA, West Lafayette, IN. 1995.

Fuller, D.; Jeffe, M.; Williamson, R. A.; James, D. Satellite remote sensing and transportation lifelines: safety and risk analysis along rural Southwest roads. In: ISPRS Commission I Symposium 2002, Denver.; Mid-Term Symposium in Conjunction With Pecora 15 Land Satellite Information, 4., 2002. Integrated Remote Sensing at the Global, Regional and Local Scale. Denver, CO: ISPRS, 2002. Disponível em: <<http://www.isprs.org/commission1/proceedings/paper/00089.pdf>>. Acesso em: 06 maio 2005.

Fundação Centro de Informações E Dados Do Rio de Janeiro (CIDE). **Índice de qualidade dos municípios - verde (IQM - Verde)**. Rio de Janeiro: CIDE, 2000. CD-Rom.

Fundação Sos Mata Atlântica E Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (2002) **Atlas dos Remanescentes Florestais da Mata Atlântica: período 1995-2000**. Relatório Final.

IBGE. Folhas **SF 23/24 Rio de Janeiro / Vitória: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra**. Levantamento de Recursos Naturais, v. 32, Rio de Janeiro, 1983. 775 p.

Janson, S.; Domingue, J. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 54, n.11, p. 1593-1600, 1988.

Jensen, J.R. **Introductory digital image processing: a remote sensing perspective**. 2 ed. Prentice Hall series in geographic information science, 1996. 316p.

Mendes, J. F. G.; Motizuki, W. S. Urban quality of life evaluation scenarios: the case of São Carlos in Brazil. **CTBUH Review**, University of Illinois at Urbana-Champaign, v. 1, n.2, p.13-23, 2001.

Milani, J. R.; Canali, N. E. O sistema hidrográfico do rio Matinhos: uma análise morfométrica. **R. RA'EGA**, Curitiba, UFPR, n. 4, p. 139-152. 2000.

NASA homepage <https://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid/mrsid.pl> Acesso em 01 de março de 2005.

Pebesma, E. J. **Gstat, a program for geostatistical modelling, prediction and simulation**. Copyright 1992,1998 ©

Ribeiro, J. C.; Salomão, F. X. T. Abordagem morfopedológica aplicada ao diagnóstico e prevenção de processos erosivos na bacia hidrográfica do alto rio da casca, MT São Paulo, UNESP, **Geociências**, v. 22, n. 1, p. 83-95, 2003.

Rocha, J. S. M. **Manual de manejo integrado de bacias hidrográficas**. Santa Maria: UFSM, 1991. 181p.

Saaty, T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, New York, v.15, p. 59-62, 1977.

Santos, P.R.A.; Gaboardi, C.; Oliveira, L.C. Avaliação da precisão vertical dos modelos SRTM para a Amazônia., 12., 2005, Goiânia. **Anais...**São José dos Campos: INPE, 2005. Artigos, p. 4473-4480. CD-Rom.

Siegel, S. **Nonparametric statistics for the behavioral sciences**. New York: McGraw-Hill, 1956. 350 p.

Wischmeier, W. H.; Smith, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. Washington, D.C.: USDA, 1978. 57 p. (USDA. Agricultural Handbook, 537).