

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS UTILIZANDO INFERÊNCIA FUZZY E ZONEAMENTO DAS VULNERABILIDADES. ESTUDO DO CASO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIBEIRÃO DO FEIJÃO, SÃO CARLOS - SP

Rogério Coli da CUNHA ¹, Francisco Antonio DUPAS ²,
Nívea Adriana Dias PONS ², José Galizia TUNDISI ³

(1) Pós-Graduação em Engenharia da Energia, Instituto de Recursos Naturais / Núcleo de Estudos Ambientais, Planejamento Territorial e Geomática, Universidade Federal de Itajubá. Rua Antônio Simão Mauad, n. 646 – BPS. CEP 37500-356. Itajubá, MG. Endereço eletrônico: rccoli@yahoo.com.br

(2) Instituto de Recursos Naturais / Núcleo de Estudos Ambientais, Planejamento Territorial e Geomática, Universidade Federal de Itajubá. Avenida BPS, n. 1303 – Pinheirinho. CEP 37500-903. Itajubá, MG. Endereços eletrônicos: dupas@unifei.edu.br ; npons@unifei.edu.br

(3) Instituto Internacional de Ecologia. Rua Bento Carlos, n. 750. CEP 13560-660. São Carlos, SP. Endereço eletrônico: tundisi@iie.com.br

Introdução
Lógica Fuzzy AHP
Área de Estudo
Materiais e Métodos
 Variáveis Determinantes Para a Aplicação
 Determinação das Fragilidades das Variáveis
 Índice de Dissecação do Relevo
 Declividade
 Pluviosidade
 Geologia
 Cobertura do Solo
 Pedologia
 Sobreposição Ponderada das Fragilidades Ambientais
 Zoneamentos das Vulnerabilidades Ambientais
Resultados e Discussão
Considerações Finais
Agradecimentos
Referências Bibliográficas

RESUMO – O presente trabalho apresenta a comparação e análise das influências das classes das variáveis ambientais na determinação da vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do ribeirão do Feijão, São Carlos – SP (Brasil). Neste estudo foram utilizados dois modelos da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. O emprego da lógica Fuzzy – AHP, com auxílio de sistemas de informações geográficas, permitiu associar os diversos graus de suscetibilidade das classes das variáveis de morfogênese e pedogênese. Com a aplicação das metodologias, realizou-se a sobreposição ponderada dos planos de informação referentes ao relevo, à pedologia, a cobertura do solo, à geologia e pluviosidade, obtendo-se os dois mapas-sínteses da fragilidade ambiental. Os mesmos foram divididos em cinco classes de vulnerabilidade representando um risco de 0 a 100%, gerando-se assim os zoneamentos à vulnerabilidade ambiental com apoio nos índices de dissecação de relevo e nas classes de declividades. As classes instável e instabilidade emergente dos respectivos zoneamentos foram analisadas e comparadas com as variáveis e suas classes de cada modelo aplicado. Esta comparação permitiu observar as influências de cada uma na determinação das diferentes vulnerabilidades ambientais da bacia hidrográfica estudada.

Palavras-chave: vulnerabilidade ambiental, fragilidade ambiental, lógica Fuzzy - AHP, zoneamento ambiental.

ABSTRACT – R.C. da Cunha, F.A. Dupas, N.A.D. Pons, J.G. Tundisi - *Analysis of influence of environmental variables using fuzzy inference and zoning of vulnerabilities. Case study of basin of the river of the Feijão, São Carlos – SP.* This paper presents a comparison and analysis of the influences of the classes of environmental variables in determining the environmental vulnerability of basin of the Feijão River, São Carlos - SP (Brazil). This study used two models of the fragility of both natural and anthropogenic environment. The use of fuzzy logic - AHP with the aid of geographic information systems, enabled to make an association between the many degrees of susceptibility of the classes of morphogenesis and pedogenesis variables. With the application of methods, it was carried out the weighted superposition of information layers for the relief, for the soil conditions, for the land use, for the geology and for the rainfall. Thereby, two maps, summaries of environmental fragility, were made. The maps were divided into five classes of vulnerabilities means a risk of 0-100%. So, the zoning to environmental vulnerability was made, with the support on both the indices of the relief dissection and on the slopes classes. The unstable and instability emerging classes from their zoning was analyzed and compared with the variables and their classes for each model applied. This comparison allowed to observe the influences of each on the determination of the different environmental vulnerabilities of the basin studied.

Keywords: environmental fragility, fuzzy logic - AHP, risk, and environmental zoning.

INTRODUÇÃO

As intervenções humanas nos ambientes provocaram complexas mudanças que alteraram a dinâmica que a natureza levou anos para atingir o seu equilíbrio. A ruptura dessa harmonia intensifica a complexidade ambiental em que vivemos, nos conduzindo a trabalhar a partir dos processos de degradação já em desenvolvimento. Dessa forma, obtemos desafios ainda maiores para buscar soluções que apontem mecanismos que relacionem as possíveis causas e, ao mesmo tempo, entender os processos que levam a acentuar os problemas ambientais.

Sendo assim, a busca de soluções torna-se relevante as adequações de metodologias e ferramentas para trabalhar o planejamento de unidades ambientais que apontem perspectivas mais coerentes e duradouras para a proteção, preservação e conservação das diversidades de paisagem e unidades de paisagem, sobre a superfície terrestre (Guerra & Marçal 2006 segundo Pereira, 2009).

Segundo Pereira (2009), a identificação dos

ambientes naturais e suas fragilidades proporcionam uma melhor definição das diretrizes e ações a serem implementadas no espaço físico-territorial. Para isso, as propostas dos futuros cenários de desenvolvimento sustentável, necessitam de modelos que simulem a integração dos processos da dinâmica espacial em bacias hidrográficas (Conway & Lathrop, 2005).

Portanto, o presente trabalho tem por finalidade, aplicar e comparar duas metodologias (Ross, 1994) da análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados, alicerçadas por dois diferentes modelos que utilizam parâmetros geomorfológicos e morfométricos na bacia hidrográfica do ribeirão do Feijão, São Carlos (SP), resultando em dois mapas-sínteses de zoneamentos à vulnerabilidade ambiental. Na comparação das diferenças apresentadas entre os dois modelos, foram investigadas as influências das variáveis de pedogênese (cobertura do solo, geologia e solos) e morfogênese (declividade, geomorfologia e pluviosidade).

LÓGICA FUZZY – AHP

Geralmente na execução de álgebras de mapas são empregadas operações booleanas, onde as mesmas possuem limiares nítidos e rígidos que, por sua vez, não representam os fenômenos naturais com todas suas características. Os resultados obtidos sugerem que os métodos Booleanos estão muito mais sujeitos à propagação de erros em modelamentos do que os equivalentes Fuzzy. Estes, podem reduzir drasticamente a propagação de erros através de modelos lógicos, fornecendo informações confiáveis (Burrough & Mcdonnell, 1998).

A lógica ou inferência Fuzzy está contida na categoria de análises de mapas não cumulativos, ou seja, análises de mapas integrados, ao invés de mapas fundidos gerados pela álgebra Booleana. A lógica Fuzzy pode ser definida como, a parte da lógica matemática dedicada aos princípios formais do raciocínio incerto ou aproximado, portanto mais próxima do pensamento humano e da linguagem natural (Paula & Souza, 2007). Já a álgebra de mapas que utiliza lógica Booleana, expressa seus resultados de forma binária, não sendo possível a condição “talvez”. Embora seja prático, não é o mais adequado, pois, o ideal é que as evidências que representam importância relativa diferente, recebam pesos de diferentes valores e não sejam tratadas igualmente (Câmara et al. 2001).

A natureza não possui limites rígidos e estáticos, portanto para a análise ambiental em Geomática, é

necessário as técnicas de inferências geográficas Fuzzy a fim de representar de maneira mais complexa os fenômenos naturais. Reforçado por Silva (2001), que relata sobre “os limites entre superfícies contínuas não ocorrem bruscamente na grande maioria das vezes”. Assim, quando da diferenciação de relevo suave e íngreme, percebe-se uma gradual passagem de uma característica para outra, e para se modelar essas características, aplica-se a lógica Fuzzy, que possibilitará a captura do conhecimento próximo ao “modelo cognitivo”, significando que, o processo de aquisição do conhecimento é mais fácil, mais confiável e menos sujeito a erros não identificados (Ruhoff, 2006).

Atualmente existem vários operadores de inferência espacial para a integração dos dados, dentre as quais se destacam os modelos Bayesianos, Redes Neurais, Média ponderada, e o processo analítico hierárquico-AHP (Ruhoff, 2004).

Para avaliar e decidir as melhores alternativas propostas em um ambiente de Sistema de Informações Geográficas é utilizada uma técnica conhecida como AHP – Processo Analítico Hierárquico. A AHP é uma teoria com base matemática que permite organizar e avaliar a importância relativa entre critérios e medir a consistência dos julgamentos (Câmara et al., 2001).

Segundo Tanaka & Entani (2007), o processo analítico hierárquico é um método útil nos problemas da tomada de decisão multicritério, sendo usado para

calcular os pesos dos critérios por pares de comparações e tornando mais pesado o estabelecimento da matriz. A importância relativa dos critérios é obtida consultando e examinando as opiniões de peritos (Câmara et al., 2001).

Os elementos das matrizes da comparação são medidas relativas dadas por um responsável pelas decisões, sendo assim, os pesos podem refletir subjetivamente no problema real de decisão. O ideal seria que os pesos globais do intervalo fossem obtidos igualmente como probabilidades do intervalo de modo que sejam normalizados para reduzir a redundância. O intervalo normalizado são informações úteis para uma decisão final no sentido que refletem julgamentos incertos de um responsável pelas decisões como intervalos sem redundância (Tanaka & Entani, 2007).

Ainda assim, Câmara et al. (2001) afirmam que partir do estabelecimento de critérios de comparação para cada combinação de fatores, é possível determinar um conjunto ótimo de pesos que podem ser utilizados para a combinação dos diferentes mapas tendo como vantagem a habilidade de avaliar graus de potencialidade em vez de apenas avaliar presença ou ausência da potencialidade.

Dessa forma, a determinação dos pesos das variáveis ambientais é calculada pela matriz de comparação pareada do processo analítico hierárquico – AHP. A técnica classifica e transforma os dados para um espaço de referência entre [0 e 1], ou seja, entre [0 e 100%]. O resultado será, ao invés de um mapa temático com limites rígidos, uma superfície de decisão numérica que representa uma variação contínua, ou seja, uma dinâmica numérica espacial (Barbosa et al., 2001 segundo Ruhoff, 2006).

Segundo Paula & Souza (2007), este tipo de classificação transforma os dados para um espaço de referência onde são processados pela combinação numérica da lógica Fuzzy resultando em uma superfície de decisão, classificando as áreas mais ou menos vulneráveis.

Sendo assim, as classes das variáveis foram analisadas e comparadas entre si com um critério de importância relativa que indicará a intensidade da fragilidade utilizando-se das inferências geográficas Fuzzy – AHP (Câmara et al., 2001; Paula & Souza, 2007). As mais estáveis apresentarão valores mais próximos de 0,1, as intermediárias ao redor de 0,5 e as mais vulneráveis estarão próximas de 0,9, conforme Tabela 1.

TABELA 1. Escala de valores AHP para comparação pareada.
Fonte: (Barbosa & Cordeiro, 2001).

Intensidade de importância	Definição e Explicação
0,1	Importância igual – os dois fatores contribuem igualmente para o objetivo
0,3	Importância moderada – um fator é ligeiramente mais importante que o outro
0,5	Importância essencial – um fator é claramente mais importante que o outro
0,7	Importância demonstrada – um fator é fortemente favorecido e sua maior relevância foi demonstrada na prática
0,9	Importância extrema – a evidência que diferencia os fatores é da maior ordem possível
0,2; 0,4; 0,6; 0,8	Valores intermediários – possibilidade de compromissos adicionais entre julgamentos

ÁREA DE ESTUDO

A cidade de São Carlos está localizada na região centro-oeste do estado de São Paulo (Figura 1), sendo recortada ao meio pela rodovia Washington Luiz no sentido SE/NW. Possui baixo gradiente fluvial com vales amplos e planícies aluviais relativamente extensas. A vegetação primitiva foi rapidamente dizimada, sobretudo pelo avanço da pecuária, cultura canavieira, citricultura e reflorestamentos (Nishiyama, 1991).

A geologia regional compõe a Bacia Sedimentar do Paraná, onde algumas das formações afloram, tais como: Formação Botucatu, Serra Geral, e Sedimentos Cenozóicos. Já a província geomorfológica, compõe as Cuestas Basálticas (Zuquette, 1981). A bacia hidrográfica do ribeirão do Feijão possui uma área de aproximadamente 22.240 hectares e é um manancial urbano fundamental para a cidade de São Carlos.

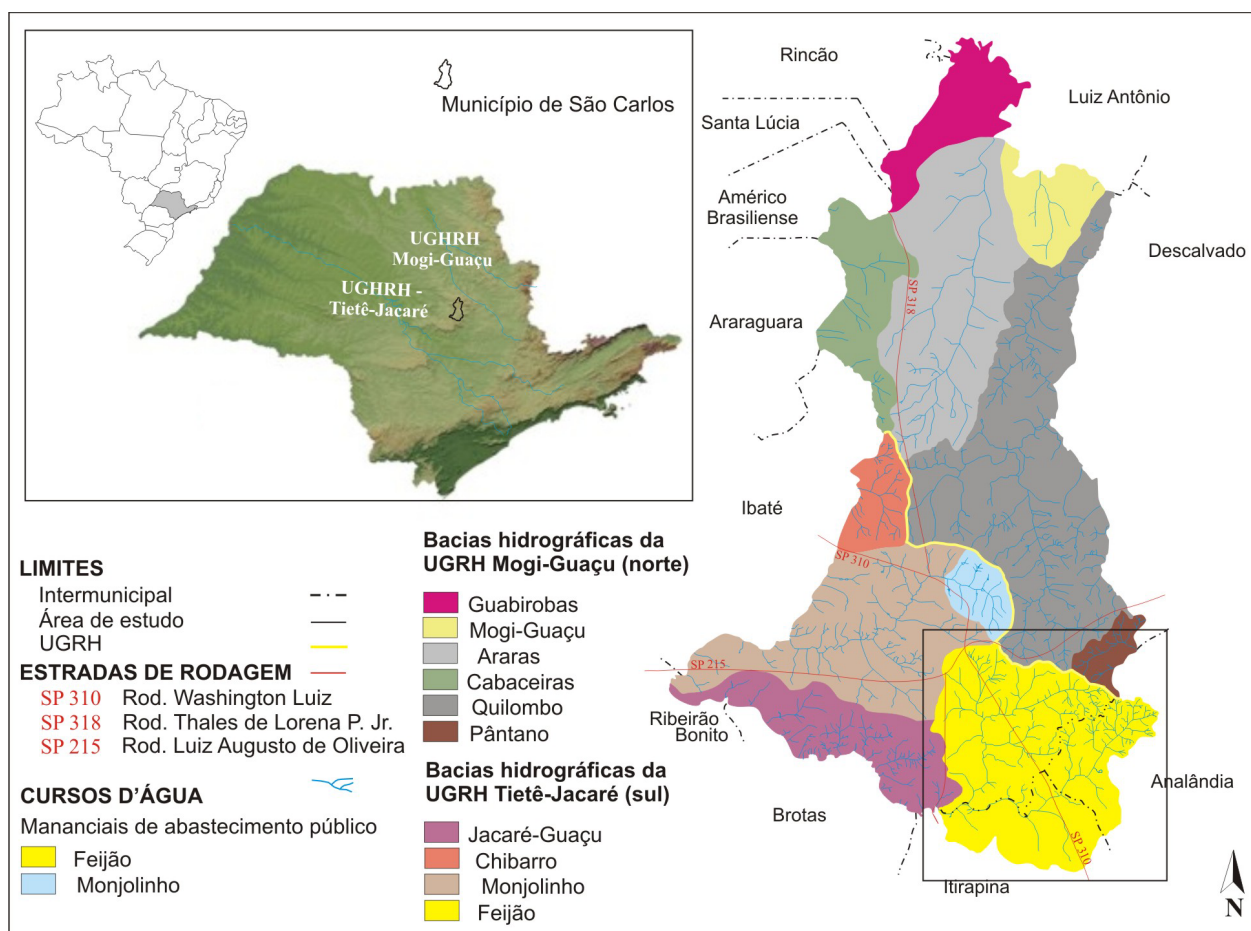


FIGURA 1. Sub-bacias que compõem a bacia hidrográfica do município de São Carlos/SP. Fonte: modificado de Tundisi et al. (2007).

MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais empregados para a elaboração da pesquisa estão descritos nas Tabelas 2, 3 e 4.

Todos os elementos cartográficos adotados para a elaboração dos mapas seguem as bases do Sistema Brasileiro Geodésico, adotando o Datum planimétrico Córrego Alegre, que usa o elipsóide de Hayford, com a projeção UTM referente ao Fuso 23 e altimétrico do marégrafo de Imbituba.

VARIÁVEIS DETERMINANTES PARA A APLICAÇÃO

Para a elaboração das unidades de fragilidade dos ambientes naturais, são necessários levantamentos básicos de relevo, solos, cobertura vegetal e pluviosidade. Esses elementos tratados de forma integrada possibilitam obter um diagnóstico das diferentes categorias hierárquicas de fragilidade (Spörl & Ross, 2004).

Serão descritos as ponderações de todas as classes das variáveis determinantes para aplicação. Portanto, para se elaborar o presente trabalho, utilizou-se da metodologia por meio dos dois modelos, um com apoio nos índices de dissecação do relevo e, o outro, com

apoio nas classes de declividade, para análise empírica comparativa das variáveis determinantes da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados e a comparação das influências destas variáveis (pluviosidade, geologia, cobertura do solo e pedologia) no risco ambiental (adaptado de Ross, 1994; Ruhoff, 2004).

DETERMINAÇÃO DAS FRAGILIDADES DAS VARIÁVEIS

As determinações das fragilidades naturais, via sobreposição ponderada, necessitam que sejam inferidos os pesos Fuzzy sobre as classes das variáveis dos índices de dissecação do relevo, declividade, pluviosidade, geologia, cobertura do solo e pedologia, de acordo com suas características em cinco categorias: Muito Fraca (0,1), Fraca (0,3), Média (0,5), Forte (0,7) e Muito Forte (0,9).

Índice de Dissecação do Relevo

As feições geomorfológicas serviram como padrões morfométricos dos valores médios do entalhamento dos vales e da dimensão interfluvial no qual, a partir da matriz dos índices de dissecação de relevo,

determinou-se a fragilidade das classes das variáveis, conforme as Tabelas 5 e 6 (Dantas, 2007).

Declividade

A variável de declividade foi classificada nos intervalos já consagrados dos estudos de Capacidade de Uso/Aptidão Agrícola associados aos valores já conhecidos de limites críticos de geotecnia, conforme mostrado na Tabela 7 (Spörl & Ross, 2004).

As hierarquizações das Tabelas 6 e 7 levaram em consideração a intensidade dos processos erosivos, os riscos de escorregamentos/deslizamentos e a velocidade de transformação do relevo (Furrier, 2007).

Pluviosidade

Segundo Dantas (2007), a quantidade de chuvas e o modo como estas se distribuem ao longo do ano são decisivos no intemperismo. As chuvas exercem uma forte ação mecânica em solos com pouca cobertura vegetal e, quando associadas a relevos acentuados, ocasiona uma enorme velocidade de escoamento superficial, podendo ter os fatores litológicos e pedológicos ainda mais favoráveis a erosão (Ruhoff, 2004).

Na Tabela 8, o valor da intensidade pluviométrica leva em consideração a razão entre a pluviosidade anual e o período de chuvas, chegando a um valor empírico

da vulnerabilidade (Dantas, 2007).

Geologia

As vulnerabilidades dos processos erosivos em formações geológicas são apresentadas na Tabela 9, no qual considera os graus de agregação das partículas e a resistência aos processos erosivos (Ruhoff et al., 2005).

Cobertura do Solo

Segundo Dantas (2007), as áreas com alto grau de proteção aos solos têm um tipo de cobertura vegetal que evita que as chuvas tenham uma ação erosiva sobre os solos mantendo-os estáveis. Ross (1990, 1994) e Oliveira & Chaves (2009) propuseram uma hierarquização da cobertura vegetal obedecendo à ordem decrescente quanto à capacidade de proteção aos solos conforme mostrado na Tabela 10.

Pedologia

Na Tabela 11, na hierarquização das classes de erodibilidade dos solos, considerou-se o escoamento superficial difuso e concentrado. O tipo de solo e suas características intrínsecas (textura, estrutura, porosidade, profundidade e pedregosidade) fornecem a maior ou menor resistência do mesmo ao processo de erosão (Ross, 1994, segundo Ruhoff, 2004).

TABELA 2. Características das Cartas.

Cartas	Escala	Fonte
Topográfica de São Carlos (SF-23-Y-A-I-1)	1:50.000	(IBGE, 1972)
Topográfica de Corumbataí (SF-23-Y-A-I-2)	1:50.000	(IBGE, 1972)
Geológica (SF-23-Y-A-I)	1:100.000	(Nishiyama, 1991)
Geomorfológica (SF-23-Y-A-I)	1:100.000	(Nishiyama, 1991)
Pedológica (SF-23-Y-A-I)	1:100.000	(Oliveira & Prado, 1984)

TABELA 3. Aplicativos.

Aplicativos	Utilização
Globalmapper 11	Digitalização de vetores
IDRISI Andes 15.0	Reclassificação matricial Fuzzy
Spring 5.0	Classificação supervisionada
ArcGis 9.2 e CorelDRAW X3	Plotagem
GrADS 2.0	Mapa pluviométrico
MS-Office	Textos, gráficos e tabelas

TABELA 4. Características da imagem ALOS.

Imagem				
Sensor	Resolução espacial	Bandas	Intervalo espectral	Fonte
AVNIR-2	10 metros	1	0,42 - 0,50 μm	Satélite ALOS 12/11/2006
		2	0,52 - 0,60 μm	
		3	0,61 - 0,69 μm	

TABELA 5. Matriz dos índices de dissecação do relevo.

Fonte: Modificado de Ross (2001).

Inter-relação		Dimensão Interfluvial Média				
Entalhamento Médio dos Vales		>3750 m	1750 a 3750 m	750 a 3750 m	250 a 750 m	<250m
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
<40 m	(1)	11	12	13	14	15
40 a 80 m	(2)	21	22	23	24	25
80 a 160 m	(3)	31	32	33	34	35
160 a 240 m	(4)	41	42	43	44	45
>240 m	(5)	51	52	53	54	55

TABELA 6. Importância dos índices de dissecação do relevo nos processos erosivos e sua inferência Fuzzy - AHP. Fonte: Modificado de Ross (1994).

Classes de Fragilidade	Índice de dissecação do relevo	Fuzzy - AHP
Muito baixo	11	0,1
Baixo	21, 22, 12	0,3
Médio	31, 32, 33, 13, 23	0,5
Alto	41, 42, 43, 44, 14, 24, 34	0,7
Muito alto	51, 52, 53, 54, 55, 15, 25, 35, 45	0,9

TABELA 7. Importância das classes de declividades nos processos erosivos e sua inferência Fuzzy - AHP. Fonte: Modificado de Ross (1994).

Classes de Fragilidade	Classes de Declividade	Fuzzy - AHP
Muito fraco	Até 6%	0,1
Fraco	De 6 a 12%	0,3
Médio	De 12 a 20%	0,5
Forte	De 20 a 30%	0,7
Muito forte	Acima de 30%	0,9

TABELA 8. Importância dos índices pluviométricos nos processos erosivos e sua inferência Fuzzy - AHP. Fonte: Modificado de Ross (2001).

Classes de Fragilidade	Características Pluviométricas	Fuzzy AHP
Muito fraco	Situação pluviométrica com distribuição regular ao longo do ano, com volumes anuais não muito superiores a 1.000 mm/ano	0,1
Fraco	Situação pluviométrica com distribuição regular ao longo do ano, com volumes anuais não muito superiores a 2.000 mm/ano	0,3
Médio	Situação pluviométrica com distribuição anual desigual, com períodos secos entre 2 e 3 meses	0,5
Forte	Situação pluviométrica com distribuição anual desigual, com períodos secos entre 3 e 6 meses e alta concentração das chuvas nos períodos chuvosos	0,7
Muito forte	Situação pluviométrica com distribuição regular, ou não, ao longo do ano, com grandes volumes anuais ultrapassando 2500 mm/ano; ou ainda, comportamentos pluviométricos irregulares ao longo do ano, com episódios de chuvas de alta intensidade e volumes anuais baixos, geralmente abaixo de 900 mm/ano (semi-árido)	0,9

TABELA 9. Importância das formações geológicas no processo erosivo e sua inferência Fuzzy - AHP. Fonte: Modificado de Ross (1994).

Classes de Fragilidade	Classes de Formações Geológicas	Fuzzy - AHP
Muito baixo	Riolito Serra Geral	0,1
Baixo	Basalto Serra Geral	0,3
Médio	Formação Rosário do Sul	0,5
Alto	Formação Botucatu	0,7
Muito alto	Formação Aluvial	0,9

TABELA 10. Importância da cobertura vegetal nos processos erosivos e sua inferência Fuzzy - AHP. Fonte: Modificado de Ross (1994).

Classes de Fragilidade	Classes de Cobertura do Solo	Fuzzy AHP
Muito fraco	Florestas e matas naturais com biodiversidade	0,1
Fraco	Formações arbustivas naturais, matas secundárias, cerrados e capoeiras	0,3
Médio	Cultivos de ciclos longos, pastagens com baixo pisoteio de gado, silvicultura	0,5
Forte	Culturas de ciclo longo com baixa densidade, culturas de ciclo curto	0,7
Muito forte	Áreas desmatadas, solo exposto, agricultura não-conservacionista	0,9

TABELA 11. Importância dos tipos de solos na ocorrência de processos erosivos e sua inferência Fuzzy - AHP. Fonte: Modificado de Ross (1994).

Classes de Fragilidade	Classes de Solos	Fuzzy AHP
Muito fraco	Latossolo roxo, Latossolo vermelho escuro e vermelho amarelo de textura argilosa	0,1
Fraco	Latossolo Amarelo e vermelho, de textura média argilosa	0,3
Médio	Latossolo vermelho amarelo, Terra roxa, Terra Bruna, solos Podzólicos vermelho amarelo de textura média argilosa	0,5
Forte	Podzólicos vermelho amarelo de textura médio-arenosa e Cambissolos	0,7
Muito forte	Podzólicos, litólicos e areia quartzosas	0,9

SOBREPOSIÇÃO PONDERADA DAS FRAGILIDADES AMBIENTAIS

Após estabelecer a classificação da fragilidade destes seis planos de informação, foram realizadas duas sobreposições ponderadas com o índice de dissecação do relevo e com a declividade representada nos quadros 2.3 da Figura 2. A partir desse procedimento, foram gerados dois mapas-síntese de fragilidade ambiental demonstrados nos quadros 2.4 da Figura 2. Nestes, os resultados foram mapas integrados que demonstram um sistema dinâmico, integrando um modelo celular automatizado que prognostica a

mudança permitindo analisar o comportamento da vulnerabilidade ambiental (He et al., 2005 segundo Mao et al., 2007).

ZONEAMENTO DAS VULNERABILIDADES AMBIENTAIS

A vulnerabilidade ambiental refere-se ao conjunto de fatores ambientais de mesma natureza que, diante de atividades ocorrentes ou que venham se manifestar poderá sofrer adversidades e afetar de forma vital, total ou parcial, a estabilidade ecológica da região em que ocorre. Dessa forma, para a determinação dos riscos, alguns elementos devem ser considerados, principal-

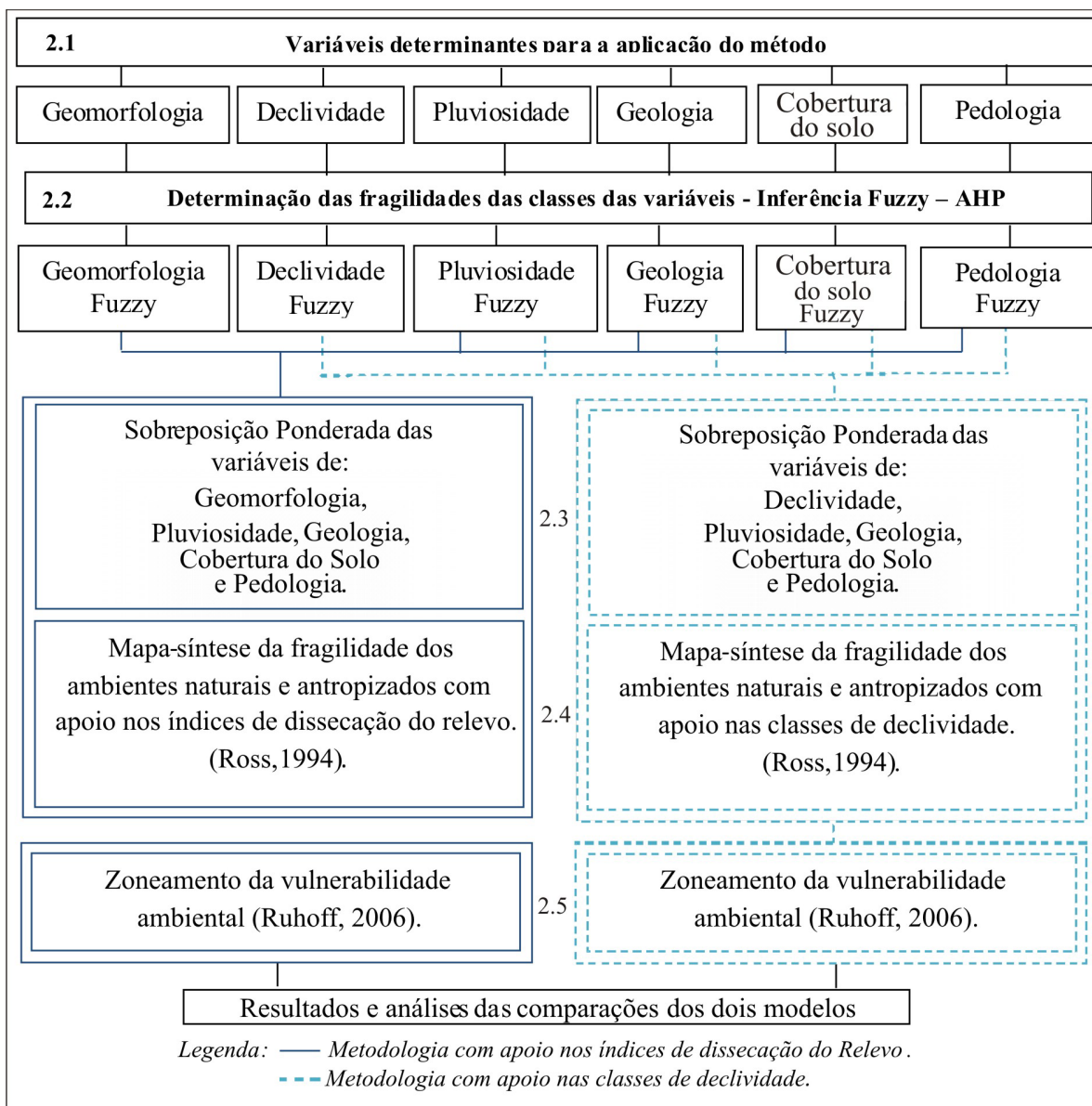


FIGURA 2. Fluxograma do método para obtenção do comparativo entre variáveis de classes para os dois modelos na determinação da comparação das influências das variáveis no risco ambiental.

TABELA 12. Classes de zoneamentos à vulnerabilidade transformada em riscos ambientais. Fonte: Ruhoff et al. (2005).

Classes de Zoneamento à Vulnerabilidade Ambiental	Risco Ambiental
Estável	Até 20%
Estabilidade Moderada	Entre 20 e 40%
Instabilidade Moderada	Entre 40 e 60%
Instável	Entre 60 e 80%
Instabilidade Emergente	Acima de 80%

mente, a suscetibilidade da área e a vulnerabilidade dos sistemas ali existentes (Pereira, 2009).

Conforme Oliveira (2004), o zoneamento da vulnerabilidade é um instrumento com respostas essencialmente ambientais, logo dinâmicas, e que não se propõe a ser fechado e estanque. Desta forma, para este trabalho, a partir da divisão da amplitude dos valores Fuzzy dos mapas-sínteses, foram geradas as classes de vulnerabilidade da bacia hidrográfica e seu risco ambiental, permitindo assim analisar e comparar os efeitos potenciais na natureza e na paisagem de acordo com as tendências da sociedade (adaptado de Nijs & Crommentuijn, 2004).

Tendo origem em Tricart (1977), Lago et al. (2009) avaliam o processo dinâmico de vulnerabilidade em bacias hidrográficas, classificando em unidades ecodinâmicas estáveis e instáveis, em vários graus, desde muito fraca a muito forte. Também neste trabalho, fundamentado em Ross (1994) que utiliza mapas-sínteses oriundos da fragilidade ambiental, os resultados foram dois zoneamentos da vulnerabilidade ambiental

com apoio nos índices de dissecação do relevo e das classes de declividade, representados pelas caixas 2.5 na Figura 2.

Assim, utilizando-se os critérios estabelecidos por Ruhoff et al. (2005), os zoneamentos das vulnerabilidades ambientais foram classificados de maneira sistemática em cinco classes de risco: estável, moderadamente estável, estabilidade emergente, instável e instabilidade emergente transformadas em riscos ambientais, conforme mostrado na Tabela 12.

Na Figura 2 é demonstrado o fluxograma do método através de subitens. São mostradas as etapas para obtenção do comparativo entre variáveis de classes para os dois modelos na determinação da comparação das influências das variáveis no risco ambiental.

Na Figura 3, é apresentada por meio de mapas, a descrição das variáveis utilizadas para o comparativo, sendo eles os de geomorfologia, cobertura do solo, pluviosidade, geologia e pedologia a fim de subsidiar o entendimento das metodologias aplicadas dos dois modelos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Figuras 4 e 5 são apresentados os resultados dos zoneamentos das vulnerabilidades ambientais que tiveram apoio nos índices de dissecação do relevo e das classes de declividade, respectivamente, e com pluviosidade constante em toda a bacia.

Na Figura 4 pode ser observado que, em relação à Figura 5, ela apresenta polígonos regulares nas classes moderadamente estável, moderadamente instável e na instável. Esta ocorrência tem a ver com o tipo de atividade antrópica (cobertura do solo) dentro da bacia e condicionada também às demais variáveis determinantes que foram aplicadas nos dois modelos (Figura 3).

Tomando-se como exemplos [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8] e demais polígonos existentes na classe estável, moderadamente estável, moderadamente instável e instável, a regularidade dos mesmos na Figura 4, que não se encontra na Figura 5, verifica-se que em [1] o polígono na classe estável que definiu seu perímetro foi determinado na pastagem (Figura 3E), mesmo encontrando-se pastagem na classe moderadamente estável como pode ser visto em [2]. Esta variação de classe pode ser atribuída às demais variáveis determinantes da Figura 3.

Em [3] e [4], como também nas demais áreas urbanas, também apresentam polígonos regulares em classes moderadamente estável e moderadamente instável em função também da variabilidade da localização das demais variáveis determinantes.

Em [5] a cobertura do solo apresenta solo exposto na classe moderadamente instável em função das variáveis determinantes 3(A, C, D, E e F). Contudo, como em [5], em [6] também apresenta cobertura de solo com solo exposto, apresenta uma parcela do polígono na classe estável e a outra parcela na classe moderadamente estável, indicando claramente que apesar da topografia apresentar baixa e regular declividade (Figura 3B), a pedologia (PV) e a cobertura do solo foram os pontos determinantes para sua delimitação.

Em [7], onde está localizada a SP-310 (Figura 1) na direção NW/SE aparece com classe moderadamente instável até próximo ao ribeirão do Feijão devido à constância das variáveis determinantes de geomorfologia, de topografia, de pedologia e de geologia. Contudo, a SE a partir do ribeirão do Feijão, apresenta uma variação pedológica de LE e PV que faz a condição de moderadamente instável visto no trecho NW passarem para condição de moderadamente estável e estável.

Em [8], onde está localizada a linha de abastecimento de energia na direção SE a partir da borda da bacia, da mesma maneira que em [7], apresenta classe moderadamente estável e é interrompida por classe predominantemente estável e, continuando a moderadamente instável logo em seguida. Neste caso, esta variabilidade de classes podem ser atribuídas às variáveis determinantes pedologia e geologia, destacando-se

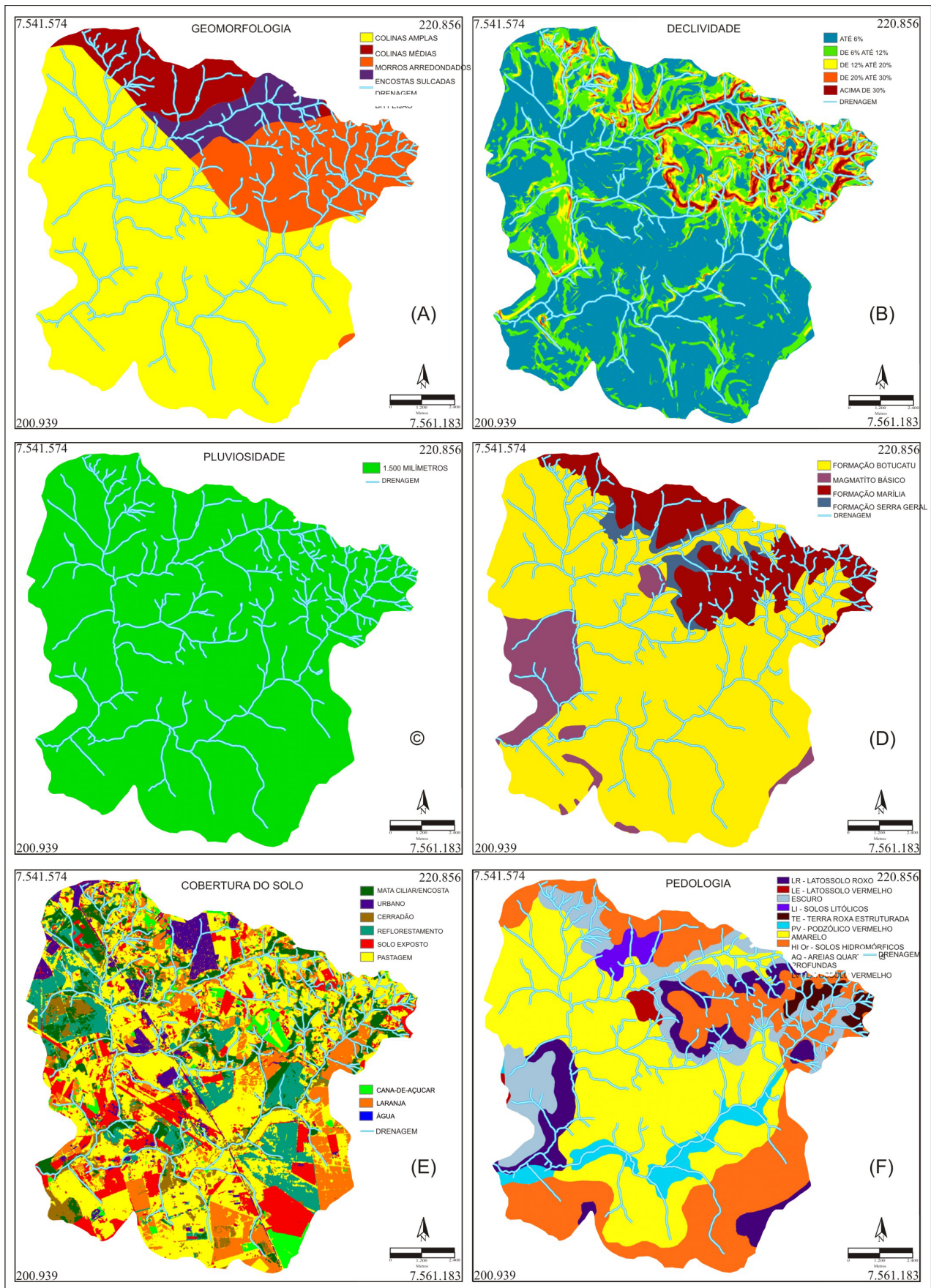


FIGURA 3. Variáveis determinantes para aplicação dos dois modelos.

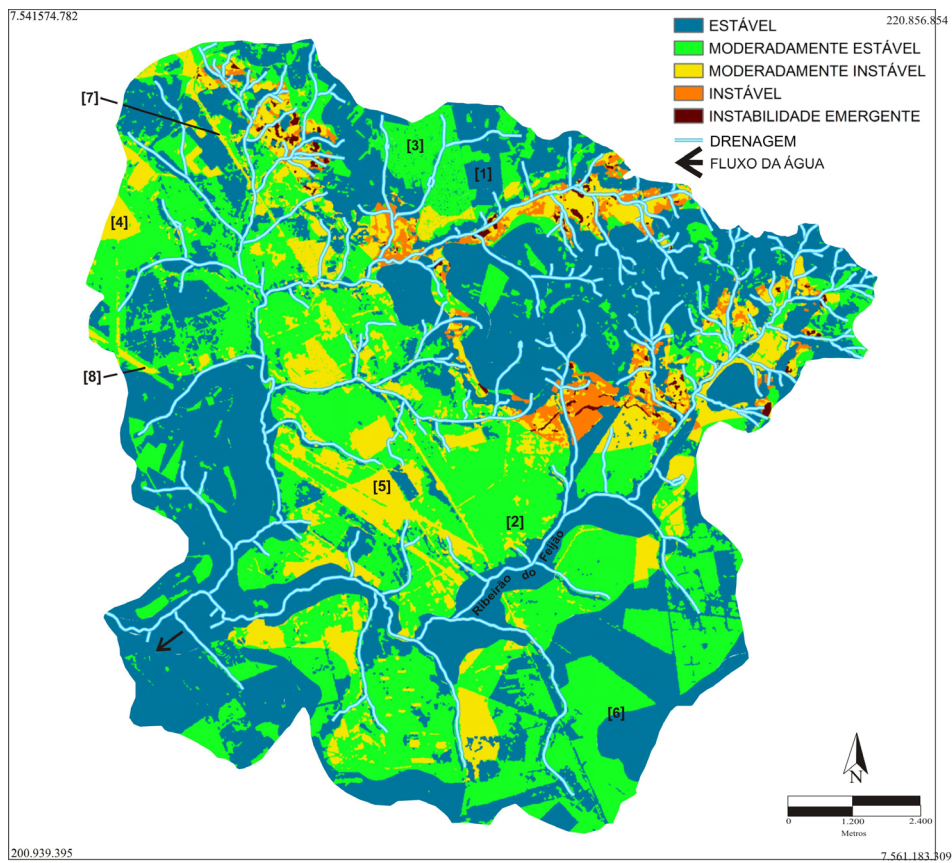


FIGURA 4. Zoneamento da vulnerabilidade ambiental com apoio nos índices de dissecação do relevo (1).

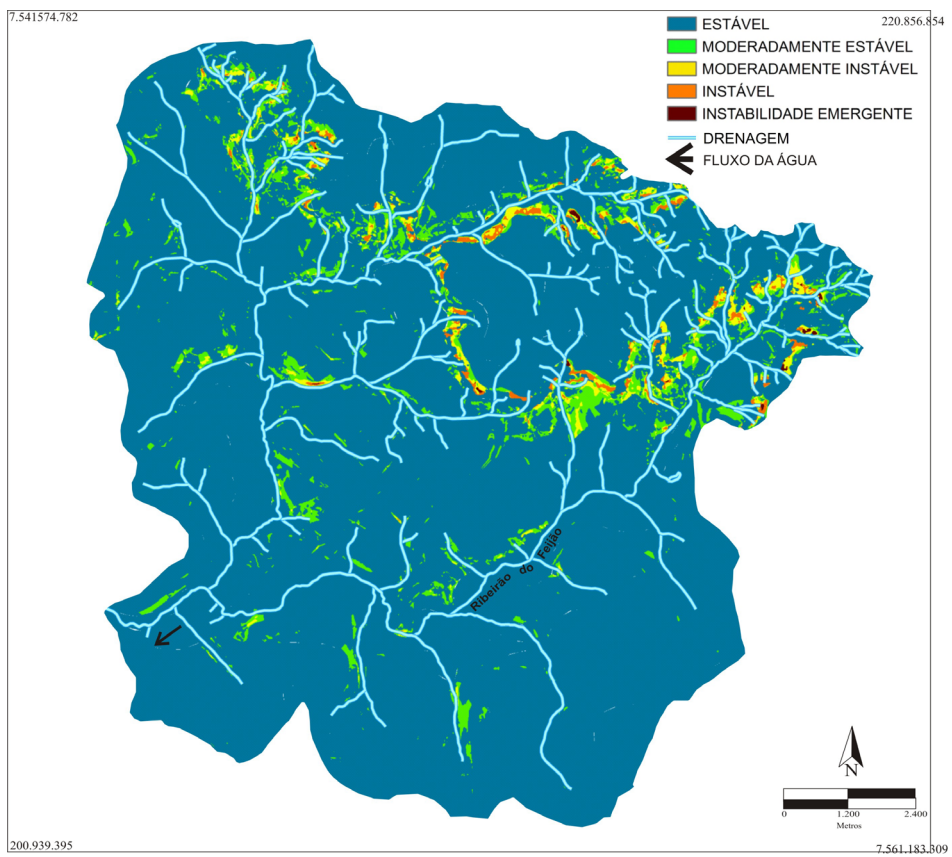


FIGURA 5. Zoneamento da vulnerabilidade ambiental com apoio nas classes de declividade (2).

que, apesar do pequeno trecho com pequenas variações de declividades um pouco mais acentuadas, a geologia com migmatitos básicos e a pedologia com PVe HI Or, são os maiores responsáveis por tais mudanças de classes de vulnerabilidade ambiental.

Na Figura 5, que considera o zoneamento da vulnerabilidade ambiental com apoio nas classes de declividade, pode ser observado que ela não apresenta polígonos regulares em nenhuma das classes. A não existência de polígonos regulares tem a ver com a menor sensibilidade que o modelo tem em considerar as variáveis determinantes (Figura 3) e aos tipos de atividades antrópicas (cobertura do solo) dentro da bacia.

Desta forma, como podem ser observados na Figura 6, os resultados do comparativo entre as áreas das classes dos dois zoneamentos da vulnerabilidade ambiental. Destaca-se que o modelo de dissecação do relevo apresentou sensibilidade mais elevada à restrição na consideração das variáveis determinantes, havendo uma distribuição percentual maior em cada uma delas.

Também para efeito de análise dos resultados para verificação da sensibilidade de cada modelo às variáveis determinantes, por serem as áreas críticas, considerou-se classes com riscos ambientais >60% (Tabela 9), ou seja, instável e de instabilidade emergente que resultou na Tabela 13.

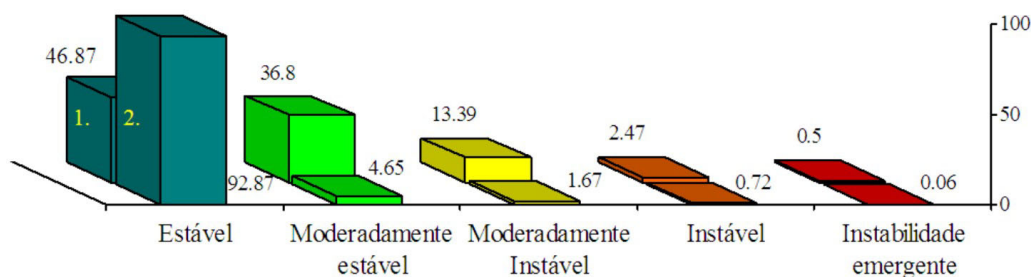
Verifica-se uma maior quantidade de área do modelo baseado no índice de do relevo na classe instável (2,5%) e na instabilidade emergente (0,5%), mostrando restrições mais amplas que o modelo apoiado na declividade.

Mesmo com valores das áreas de zoneamento distintos dos dois modelos, observou-se que o risco acima de 60% ocorre sempre nas mesmas classes das variáveis, o que permitiu uma análise individual da influência de cada uma das classes das variáveis na determinação da vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica.

Estes resultados mostram, por meio da comparação entre os modelos algumas diferenças das influências das classes das variáveis na determinação das áreas instáveis e instabilidade emergente, conforme a Tabela 14 e também da Figura 7.

Para as classes de geomorfologia empregadas, temos a classe Encostas Sulcadas por Vales Subparalela sendo a maior influenciadora com 16,4% seguido da classe de Morros Arredondados com 8,5% e, posteriormente, por Colinas Médias com 6,7%. Para o zoneamento, com apoio nas classes de declividade, obteve-se uma maior influência as declividades acima de 30% (12,6%) e, posteriormente, a de 20% a 30% (10,7%).

Já na variável cobertura do solo a classe de cultivo de laranja foi a que mais influenciou nos dois modelos



(1) Área das classes de zoneamento da vulnerabilidade ambiental com apoio nos índices de dissecação do relevo; (2) Área das classes de zoneamento da vulnerabilidade ambiental com apoio nas classes de declividade.

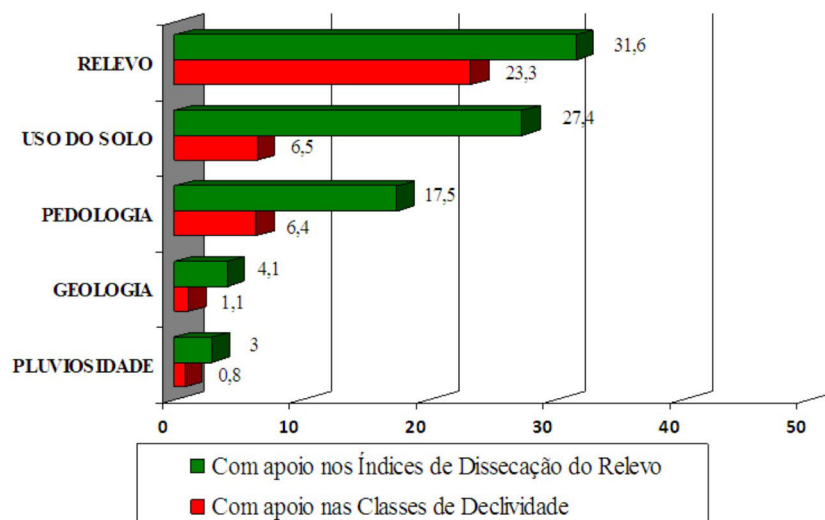
FIGURA 6. Distribuição das classes do zoneamento da vulnerabilidade ambiental (%) utilizando-se os dois modelos empíricos de Ross (1994).

TABELA 13. Área das classes instável e instabilidade emergente do zoneamento da vulnerabilidade ambiental com apoio nos índices de dissecação do relevo e declividade.

Classes de zoneamento da vulnerabilidade ambiental	Índice de Dissecação do Relevo		Classes de Declividade	
	Hectares	(%)	Hectares	(%)
Instável	551,3	2,5	160,9	0,7
Instabilidade Emergente	109,9	0,5	13,3	0,1
Total	661,2	3,0	174,2	0,8

TABELA 14. Áreas totais das classes das variáveis e as incidências do risco acima de 60% dos dois modelos aplicados de vulnerabilidade ambiental.

Classes das Variáveis	Área (%)	1 (%)	2 (%)
<i>Geomorfologia</i>			
Colinas médias	8,7	6,7	-
Morros arredondados	17,4	8,5	-
Encostas sulcadas por vales subparalelos	5,6	16,4	-
<i>Declividade</i>			
De 20% até 30%	4,0	-	10,7
Acima de 30%	2,9	-	12,6
<i>Cobertura do solo</i>			
Urbano	4,9	1,5	0,5
Solo Exposto	12,8	3,3	1,0
Cana-de-açúcar	3,1	6,2	0,2
Laranja	13,8	16,5	4,8
<i>Pedologia</i>			
LI - Solos Litólicos	11,3	12,8	5,4
PV - Podzólico Vermelho Amarelo	1,7	0,9	0,6
AQ – Areias Quartzosas Profundas	42,8	3,6	0,4
<i>Geologia</i>			
Formação Botucatu	72,6	4,1	1,1
<i>Pluviosidade</i>			
1.500 mm	100	3,0	0,8



(1) Área em porcentagem de incidência de risco >60% com apoio nos índices de dissecação do relevo;
 (2) Área em porcentagem de incidência de risco >60% com apoio nas classes de declividade.

FIGURA 7. Comparação (%) das influências das variáveis sobre a classe instável e instabilidade emergente do zoneamento da vulnerabilidade ambiental.

aplicados (16,5% e 4,8%). As demais classes determinaram diferentemente, sendo que no modelo com apoio nos índices de dissecação do relevo, obteve-se a segunda classe de maior influência a cana-de-açúcar (6,2%), seguido do solo exposto (3,3%) e, por último, a classe de urbano (1,5%). No modelo com apoio nas classes de declividade, após a classe de cultivo de laranja, o solo exposto (1,0%), foi a segunda classe de maior influência, seguida da classe de urbano (0,5%) e, posteriormente, de cana-de-açúcar (0,2%).

A variável pedologia para a classe de solo Litólico foi a de maior influência, em comum para os dois modelos com 12,8% e 5,4%, respectivamente. A segunda classe que mais influenciou no modelo de dissecação do relevo foi a Areias Quartzosas Profundas (3,6%), seguida da classe de solo Podzólico Vermelho Amarelo com 0,9%. Já no modelo com apoio nas classes de declividade, obteve-se o contrário, a classe de solo Podzólico Vermelho Amarelo (0,6%) influenciou mais que as Areias Quartzosas Profundas (0,4%).

A influência da geologia resultou sobre a classe da formação Botucatu 4,1% e 1,1%. Na variável de Pluviosidade na classe de 1.500 milímetros a influência foi de 3,0 e 0,8%. Para este caso, ambas influenciando praticamente na mesma proporção dos riscos mapeados.

Na Figura 7 é mostrada a determinação em escala decrescente (%) os graus de influência de cada uma das variáveis nos dois zoneamentos da vulnerabilidade ambiental frente às classes de instabilidade e instabilidade emergente (>60%). Observou-se que as variáveis de relevo foram as mais significantes em ambos os modelos (31,6% e 23,3%), seguido da cobertura do solo (27,4% e 6,5%), pedologia (17,5% e 6,4%), geologia (4,1% e 1,1%) e pluviosidade (3,0% e 0,8%). Portanto, as variáveis de relevo foram as que apresentaram as menores discrepâncias (8,3%). Já a cobertura do solo apresentou as maiores diferenças com 20,9%, seguido da pedologia com 11,1%, geologia com 3,0% e pluviosidade com 2,2%.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação de modelos baseados em conceitos, embora forneçam resultados aproximados devido à subjetividade inerente ao processo de avaliação da realidade, devem ser sempre confrontados com os dados observados e coletados em campo buscando apontar qual deles se ajusta melhor à área estudada, contribuindo, via retro análise, para a calibração e o aperfeiçoamento de modelos de análise da vulnerabilidade ambiental.

Portanto, para a avaliação mais coerente sobre a influência dos modelos de análise de vulnerabilidade ambiental da referida bacia hidrográfica, sugere-se que sejam também correlacionados problemas de erosão, perda de solos, deslizamentos, perda de qualidade das águas de superfície, variação das características sedimentológicas, entre outras metodologias, a fim de se obter uma abordagem cada vez mais sistêmica e integrada, considerando os reais fluxos de matéria e energia responsáveis pela configuração atual da respectiva unidade ecodinâmica. A associação destas propostas, concomitante a resultados de outras metodologias e análises *in loco*, determinarão novas considerações mais específicas, aperfeiçoando, com auxílio da geomática, as modelagens ambientais. A integração de mais variáveis aos modelos, além da ampliação de sua complexidade, permitirá construir cenários cada vez mais condizentes com a complexidade da realidade das bacias hidrográficas. Dessa forma, acredita-se que, com os zoneamentos cada vez

mais consistentes, os mesmos permitirão uma regulamentação do espaço geográfico a fim de se explorar as potencialidades locais e regionais buscando conservar a estabilidade dos ambientes naturais.

As comparações e análises apresentadas procuraram determinar o quanto cada uma destas variáveis e suas respectivas classes contribuem para se estabelecer o grau de vulnerabilidade da bacia hidrográfica do ribeirão do Feijão. Verificou-se também que o uso do solo e relevo são as variáveis, nos dois modelos, mais importantes quando se deseja minimizar impactos sobre a aceleração dos processos erosivos em bacias hidrográficas. Destaca-se também que, enquanto o solo está coberto por cobertura vegetal adequada as demais variáveis determinantes não se mostram com tanta influência sobre os processos erosivos. Exemplo pode ser visto quando uma parcela está coberta com vegetação em um determinado tipo de solo, relevo e geologia, quando ela perde essa cobertura ou a reduz, a pluviosidade passa a interferir direta e fortemente como agente desagregador do solo e, tendo o relevo como variável determinante na aceleração dos processos erosivos. Concluindo-se que a cobertura vegetal é determinante na minimização dos impactos advindos dos processos erosivos e, também, consideram-se destacadamente a grande importância que tem o planejamento de uso do solo integrado aos demais instrumentos de gestão ambiental e de recursos hídricos para manejo de bacias hidrográficas.

AGRADECIMENTOS

À Capes pela disponibilização da bolsa de mestrado. À Fapesp - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo financiamento de bolsas e auxílios à pesquisa para o processo 98/10924-3 e demais processos ligados ao projeto de Políticas Públicas. Ao IIE - Instituto Internacional de Ecologia, pela disponibilização dos dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BARBOSA, C.C.F. & CORDEIRO, J.P.C. Manual de Referência em LEGAL. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, M.V.M. (Coords.), **Introdução à Ciência da Geoinformação. Apêndice A**. São José dos Campos: INPE, p. 325-345, 2001.
2. BURROUGH, P.A. & MCDONNELL, R.A. **Principles of Geographic Information Systems**. Oxford: Oxford University, 352 p., 1998.
3. CÂMARA, C.; MOREIRA, F.R.; BARBOSA FILHO, C. R.A.; BÖNISCH, S. Técnicas de Inferência Geográfica. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, M.V.M. (Coords.), **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: INPE, p. 241-288, 2001.
4. CÂMARA, G. & MEDEIROS, J.S. Geoprocessamento para Projetos Ambientais. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A.M.V. (Coords.), **Introdução a Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: INPE, p. 289-320. 2001.
5. CONWAY, T.M. & LATHROP, R.G. Alternative land use regulations and environmental impacts: assessing future land use in an urbanizing watershed. **Landscape and Urban Planning**, v. 71, n. 1, p. 1-15, 2005.
6. DANTAS, A.S. **Mapa preliminar da fragilidade ambiental no Estado de Sergipe**. Aracaju, 2007. 83 p. Monografia (Especialização em Geologia Sedimentar) – Universidade Federal de Sergipe.
7. FURRIER, M. **Caracterização geomorfológica e do meio físico da folha João Pessoa - 1:100.000**. São Paulo, 2007. Tese (Doutorado em Geografia) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo.
8. LAGO, W.J.S.; ARAÚJO, E.P.; TELES, M.G.L. Vulnerabilidade natural à erosão na Região do Baixo Parnaíba-MA. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14, 2009, Natal. **Anais...** Natal: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais / INPE, 2009, p. 3975-3980.
9. MAO, G.; WANG, J.; YU, Y.; GUO, H.; QIN, X.; L.V., X.; LIU, Y. An integrated GIS-based analysis system for land-use management of lake areas in urban fringe. **Landscape and Urban Planning**, v. 82, n. 4, 2007.
10. NIJS, T.C.M. & CROMMENTUIJN, R.N.L. Constructing land-use maps of the Netherlands in 2030. **Journal of Environmental Management**, v. 72, p. 35-42, 2004.
11. NISHIYAMA, L. **Mapeamento Geotécnico preliminar da quadrícula de São Carlos, SP**. São Paulo, 1991. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
12. OLIVEIRA, I.S.D. **A contribuição do zoneamento ecológico econômico na avaliação de impacto ambiental: bases e propostas metodológicas**. São Carlos, 2004. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
13. OLIVEIRA J.B. & PRADO, H. **Levantamento Pedológico Semi-detalhado do Estado de São Paulo: Quadrícula de São Carlos – SP**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas / IAC, 188 p., 1984.
14. OLIVEIRA, J.H.M. & CHAVES, J.M. Fragilidade ambiental de um setor do raso da Catarina-BA e entorno utilizando geoprocessamento (álgebra simples de mapas-sobreposição ponderada). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 13, 2009, Viçosa. **Anais...** Viçosa: Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes – CCH, 2009, v. 1, p. 1-13.
15. PAULA, E.M.S. & SOUZA, M.J.N. Lógica Fuzzy como técnica de apoio ao Zoneamento Ambiental. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Instituto de Pesquisas Espaciais / INPE, 2007, p. 2979-2984.
16. PEREIRA, K.N. **Avaliação da Fragilidade Ambiental na Microbacia do Ribeirão de Imaruí/SC: uma análise comparativa entre o modelo da Fragilidade Empírica dos Ambientes e o Método da Equação Universal de Perda de Solo Revisada (RUSLE)**. Santa Catarina, 2009. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina.
17. ROSS, J.L.S. **Geomorfologia: Ambiente e Planejamento**. São Paulo: Contexto, 85 p., 1990.
18. ROSS, J.L.S. Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, USP. São Paulo, n. 8, p. 63-74, 1994.
19. ROSS, J.L.S. Aplicabilidade do conhecimento Geomorfológico nos Projetos de Planejamento. In: GUERRA, A.J. & CUNHA, S.B. (Coords.), **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 4ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p. 365-391, 2001.
20. RUHOFF, A.L. **Gerenciamento de recursos hídricos em bacias hidrográficas: modelagem ambiental com simulação de cenários preservacionistas**. Santa Maria, 2004. Dissertação (Mestrado em Geomática) – Universidade Federal de Santa Maria.
21. RUHOFF, A.L. Gerenciamento de recursos hídricos na bacia do Arroio Grande, RS: Zoneamento através de inferência Geográfica Fuzzy. In: SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL, 2006, Campo Grande. **Anais...** Campo Grande: Embrapa Informática Agropecuária/Instituto de Pesquisas Espaciais, 2006, p. 136,144.
22. RUHOFF, A.L.; SOUZA, B.S.P.; GIOTTO, E.; PEREIRA, R.S. Lógica Fuzzy e Zoneamento ambiental da Bacia do Arroio Grande. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, 2005, Goiânia. **Anais...** Goiânia: Instituto Nacional de Pesquisa Espacial / INPE, 2005, p. 2355-2362.
23. SILVA, J.X. **Geoprocessamento para análise ambiental**. Rio de Janeiro: D5 Produção Gráfica, p. 228, 2001.
24. SPÖRL, C. & ROSS, J.L.S. Análise comparativa da fragilidade ambiental com aplicação de três modelos. **Espaço e Tempo**, GEOSP, n. 15, p. 39-49, 2004.
25. TANAKA, H. & ENTANI, T. Interval estimations of global weights in AHP by upper Approximation. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 158, n. 17, p. 1913-1921, 2007.

26. TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística/SUPREN, 31 p., 1977.
27. TUNDISI, J.G.; TUNDISI, T.M.; DUPAS, F.A., SILVA E SOUZA, A. Uso atual e uso potencial do solo no município de São Carlos, SP - base do planejamento urbano e rural. **Relatório Final** de Projeto de Políticas Públicas da FAPESP, proc. 98/10924-3, 2007.
28. ZUQUETTE, L.V. **Mapeamento Geotécinco preliminar na região de São Carlos**. São Carlos, 1981. 86 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

*Manuscrito Recebido em: 12 de agosto de 2010
Revisado e Aceito em: 29 de abril de 2011*