

Mapas de fragilidade ambiental utilizando o processo de análise hierárquica (AHP) e sistema de informação geográfica (SIG).

Filipe Biaggioni Quessada Gimenes¹
Oswaldo Augusto Filho¹

¹Escola de Engenharia de São Carlos – USP
Av. Trabalhador São Carlense, 400, CEP 13566-590 – São Carlos – SP, Brasil
filipe.gimenes@usp.br, oafilho@sc.usp.br

Abstract. *Currently there are different definitions to the concept of environmental fragility; it complicates its application and makes difficult to compare between different methods. This work addresses the main definitions to this concept and suggests which one is the most proper. Besides, a method related to this definition is proposed to evaluate the levels of environmental fragility. The proposed method is also applied to show the results that may be obtained. The method was applied in a pilot study to illustrate its main steps and show its limitations. The analysis were developed in a sector of the São Paulo - Brasília oil pipeline (OSBRA), using digital topographic map at the scale of 1:10,000. A Geographical Information System (GIS) software was used to perform the analysis and it was used the Analytic Hierarchy Process (AHP) method to assign the weights. It was important to use the AHP method, because it reduces the subjectivity of the weight assignment. The obtained results elucidate the environmental fragility concept and show the importance of the weight assignment and selection of the attributes used in the method. Moreover, the final map provided to evaluate the method sensitivity. The final map also shows the potential of the method to be used in environmental impact assessment.*

Palavras-chave: *environmental impact assessment, weight assignment, OSBRA oil pipeline, environmental modelling, avaliação de impacto ambiental, ponderação, oleoduto OSBRA, modelagem ambiental.*

1. Introdução

O mapa de fragilidade ambiental consiste no zoneamento do território em diferentes níveis hierárquicos, que representam os diferentes graus de fragilidade. Permite definir quais áreas são mais frágeis e podem ser mais afetadas por mudanças da dinâmica natural existente. Tem grande potencial para ser utilizado em estudos de impacto ambiental.

Ratcliffe (1971) descreve fragilidade como uma medida da sensibilidade intrínseca de um ecossistema às pressões ambientais (especialmente mudanças de gestão), combinada com a exposição à ameaça que poderia perturbar o equilíbrio existente. Smith e Theberge (1986) definem fragilidade como o oposto à estabilidade, sendo estabilidade a velocidade com que um sistema retorna ao equilíbrio após uma perturbação. Os autores ainda destacam que a fragilidade pode ser natural ou induzida pelo ser humano e que a natural pode ser devida a fatores internos ou externos.

Estas definições consideram fragilidade como a desestabilização de um ecossistema, dada uma perturbação, que pode ser natural ou antrópica. E que para ser avaliada deve ser identificada a perturbação em questão e os principais atributos que poderão ser afetados, tanto bióticos (fauna, flora) como abióticos (solo, recursos hídricos, etc.), dependendo do caso.

Goldsmith (1983) define uma área frágil como uma área com elevada sensibilidade inerente, como uma área alagada, uma duna costeira e regiões montanhosas, que são potencialmente instáveis. É feita ainda a distinção entre fragilidade e vulnerabilidade, assumindo que uma área é inerentemente frágil, mas é vulnerável a uma ameaça externa como mudança no uso do solo, por exemplo (Goldsmith, op. cit.).

De acordo com a definição deste autor, fragilidade é aquela devida apenas a fatores intrínsecos e esta fragilidade associada a perturbações provocadas por ações antrópicas é a vulnerabilidade do ambiente.

No Brasil, Ross (1994) introduziu o conceito de fragilidade ambiental em seu estudo intitulado Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados. O autor afirma que a fragilidade dos ambientes naturais, dada uma intervenção antrópica, depende de

suas características genéticas. A princípio, os ambientes naturais se encontravam em equilíbrio dinâmico até o início progressivo das intervenções humanas na exploração de recursos naturais.

Percebe-se que há uma confusão geral dos termos relacionados à fragilidade ambiental, tanto internacionalmente quanto nacionalmente. Na maioria dos casos em que se procura diferenciar esses termos, os autores acabam sendo incoerentes com as definições. Um exemplo é denominar de fragilidade ambiental algo que considera apenas os aspectos físicos do meio ambiente.

Observando as primeiras definições do termo fragilidade encontradas na literatura científica internacional verifica-se um consenso que a fragilidade de um ambiente se traduz pela desestabilização de um equilíbrio dinâmico preexistente. As divergências entre as definições se encontram nos fatores que causam este desequilíbrio.

Alguns autores consideram que a fragilidade é devida a fatores internos e externos, enquanto outros consideram que é apenas devido a fatores internos, sendo uma propriedade intrínseca do sistema. O presente trabalho adota como definição de fragilidade ambiental a desestabilização do equilíbrio dinâmico existente no ambiente, e que esta é uma característica intrínseca do meio ambiente.

O presente artigo se relaciona a uma pesquisa de mestrado em andamento, que se intitula “Mapas de Fragilidade Ambiental: Análise e Aplicação no Oleoduto São Paulo – Brasília (OSBRA), Trecho São Simão a Ribeirão Preto, SP”. Nesta pesquisa foi feito um levantamento sistemático a cerca do conceito de fragilidade ambiental, bem como dos métodos de avaliação dos níveis de fragilidade ambiental, a fim de permitir sua aplicação em um trecho do oleoduto OSBRA.

O objetivo deste trabalho é abordar aspectos relacionados à definição do conceito de fragilidade ambiental, além de apresentar o método para avaliar os níveis da fragilidade ambiental. Todas as análises foram realizadas em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG). Foi utilizado o método de Processo Analítico Hierárquico (AHP), proposto por Saaty (1980), visando reduzir a subjetividade das análises.

É importante ressaltar que existem diferentes métodos de mapeamento cartográfico, com diferentes terminologias associadas a eles. Dessa forma, neste trabalho foi feita uma escolha em relação aos termos utilizados em cartografia de carta e mapa. Os produtos cartográficos gerados neste trabalho receberam a denominação de Mapa, de acordo com a classificação de Mathewson e Font (1974). Os documentos de outros autores, citados no trabalho, receberam o nome original da publicação.

1.1 Área de Estudo

A área de estudo (Longitude 48°W, Latitude 22°S) compreende 205,8 km² e abrange 48,5 km de extensão e uma zona de amplitude de 2 km de cada lado do oleoduto São Paulo - Brasília (OSBRA), no trecho entre os municípios de São Simão a Ribeirão Preto, no estado de São Paulo (Figura 1).

Como a área de estudo total apresentava regiões muito homogêneas em relação a todos os atributos analisados neste trabalho, após terem sido realizados alguns ensaios piloto na área toda, reduziu-se a área de estudo para, aproximadamente, 40% da total, com 18 km de extensão. Esta área final engloba todos os tipos de usos e também todos os materiais inconsolidados, desta forma, garante-se que será possível verificar a sensibilidade do método para as diferentes características da área.



Figura 1. Localização da área de estudo.

2. Metodologia de Trabalho

O método adotado neste trabalho consiste basicamente nas seguintes etapas:

a) Planejamento: nesta etapa foi feita a definição dos objetivos do trabalho, bem como realizada uma pesquisa bibliográfica preliminar e foram estabelecidas as principais atividades a serem executadas;

b) Revisão Bibliográfica: foi realizada a revisão bibliográfica sistemática sobre os temas técnico-científicos principais abordados pelo estudo, a fim de possibilitar embasamento teórico para aplicação do método;

c) Aplicação do método: o método foi aplicado utilizando apenas dois mapas intermediários e o método de Processo de Análise Hierárquica (AHP), permitindo ilustrar o procedimento de geração do Mapa de Fragilidade Ambiental;

d) Análise dos resultados: após aplicação do método, os resultados obtidos foram avaliados em função do se esperava;

e) Conclusões: com os resultados avaliados foi possível elaborar as conclusões, evidenciando a relevância de estudos de fragilidade ambiental, bem como mostrando a sensibilidade do método adotado.

O método para análise da fragilidade ambiental foi desenvolvido pautado pelo conceito adotado como mais adequado. Portanto, analisou-se a fragilidade ambiental considerando apenas fatores intrínsecos ao meio ambiente, e buscando, na medida do possível, englobar aspectos do meio físico, biótico e socioeconômico.

Foi utilizada uma abordagem dedutiva, partindo do mais geral para o mais específico. Portanto, para gerar o Mapa de Fragilidade Ambiental são necessários mapas geotécnicos intermediários que avaliam a suscetibilidade da área para os diferentes processos físicos que possam ocorrer (endógenos e exógenos) e também mapas de suscetibilidade dos elementos bióticos e socioeconômicos existentes.

A princípio foram elencados todos os processos possíveis de ocorrer no meio ambiente, porém alguns deles foram descartados por não ocorrerem na área de estudo, perdendo o sentido de analisá-los. Um exemplo é o processo endógeno de sismos, que não se aplica na área.

Logo, os mapas intermediários considerados na área de estudo foram os seguintes: Suscetibilidade à Erosão, Suscetibilidade a Movimentos de Massa, Suscetibilidade à Corrosividade, Suscetibilidade ao Escoamento Superficial, Suscetibilidade a Eventos Climáticos Intensos, Suscetibilidade à Colapsividade e Suscetibilidade dos Fatores Bióticos e Socioeconômicos.

Após terem sido definidos os mapas geotécnicos a serem considerados na área de estudo, foram definidos os atributos que deveriam ser analisados para geração desses mapas. Esses atributos foram definidos adaptando-se o método proposto por Zuquette (1987). Em relação aos atributos do mapa de suscetibilidade dos elementos bióticos e socioeconômicos, esses foram definidos a partir do mapa de uso e ocupação, considerando as diferentes ocupações humanas, atividades econômicas desenvolvidas e a presença de áreas naturais ou legalmente protegidas.

Finalmente, foram definidas as classes dos atributos previamente definidos. Alguns atributos já tinham suas classes previamente definidas (limitadas pela ocorrência na área) como é o caso da concavidade, materiais inconsolidados, uso, além de alguns valores numéricos como área da bacia, por exemplo.

As classes de declividade para erosão foram definidas baseadas no método de capacidade de uso do solo e as para movimentos de massa nas classes discutidas por Augusto Filho (2001). As classes de declividade para escoamento superficial foram adaptadas do proposto pela Embrapa (1979), ainda para o escoamento superficial as classes de tipo de solo foram agrupadas e classificadas de acordo o método proposto pelo Serviço de Conservação de Solos do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (SCS-USDA).

As faixas de variação de nível d'água foram agrupadas em cinco considerando-se níveis raso, médio e profundo, com classes intermediárias entre raso e médio e médio e profundo. Os valores de eventos climáticos intensos foram extraídos do banco de dados digital disponível no Sistema de Informações para o Gerenciamento de recursos Hídricos do Estado de São Paulo – SigRH (2012).

Uma vez definidos os atributos e classes de atributos a serem analisados foi necessário atribuir pesos a cada um deles. O método selecionado para realizar tal tarefa foi o Método de Processo de Análise Hierárquica (AHP) proposto por Saaty (1980), pois ao utilizá-lo se garante consistência em todas as ponderações realizadas.

Portanto, foram elaboradas matrizes para cada mapa a ser gerado correlacionando de forma pareada os atributos e as classes de atributo, de forma a permitir a análise da importância relativa de cada um dos fatores e obter os pesos finais.

Esses pesos finais foram então atribuídos a cada classe de atributo, no software ArcGIS 9.3, em uma tabela de atributos para ser possível realizar operações matemáticas para sobreposição dos fatores de interesse para cada mapa intermediário. O método matemático utilizado para realizar a sobreposição foi o de soma ponderada, discutido por Soares (2006).

As operações de soma ponderada foram realizadas com a ferramenta de álgebra de mapa *Single Output Map Algebra* (disponível no software ArcGIS 9.3) para geração de cada mapa intermediário. As notas finais obtidas foram agrupadas em cinco classes (Muito baixa, Baixa, Média, Alta e Muito Alta) e foi utilizado o método de classificação *Natural Breaks*.

Com os mapas intermediários gerados foi possível obter o Mapa de Fragilidade pela sobreposição destes mapas com uma operação de soma simples. Adicionalmente, podem-se realizar diferentes combinações de mapas intermediários para verificar-se a sensibilidade da área de estudo aos diferentes fatores de análise.

3. Resultados e Discussão

Neste artigo, além dos resultados a cerca do método para avaliar a fragilidade ambiental, são apresentados os resultados obtidos combinando dois dos mapas intermediários, o de Suscetibilidade à Erosão e o de Suscetibilidade dos Fatores Bióticos e Socioeconômicos.

Dessa forma, tão importante quanto os produtos cartográficos finais são os atributos utilizados no processo de geração dos mesmos. Portanto, na Figura 2 são mostrados os atributos, e suas respectivas classes, que devem ser utilizados para confecção dos mapas de suscetibilidade à erosão e de suscetibilidade dos fatores bióticos e socioeconômicos.

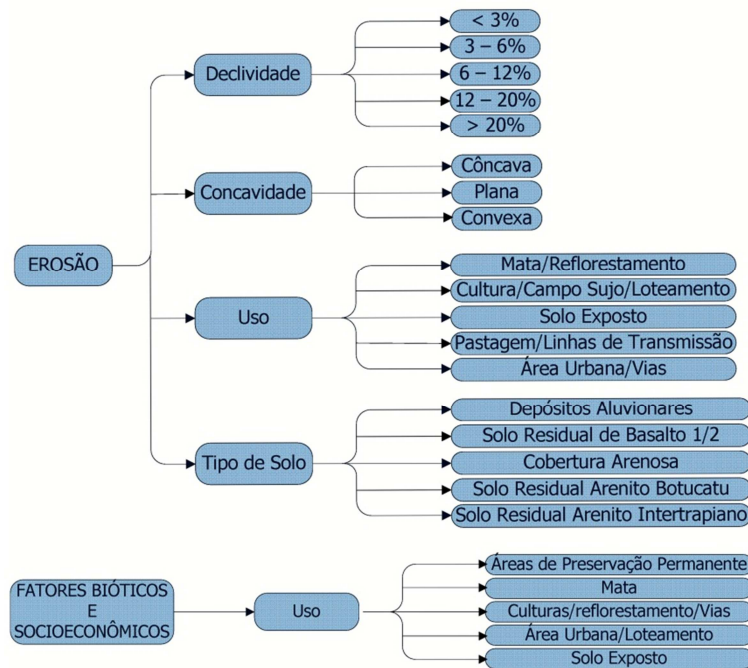


Figura 2. Atributos e classes de atributos definidos para os mapas intermediários.

Em relação aos atributos utilizados para elaboração do mapa de suscetibilidade à erosão, verifica-se que foram selecionados quatro, que foram considerados como os mais importantes para esta análise. E as classes de atributos foram agrupadas visando manter no mesmo grupo as classes que apresentassem potencial de escoamento/infiltração semelhantes.

De fato, quando se verifica o resultado obtido percebe-se que o mapa se mostra coerente com aquilo que era esperado. Portanto, nota-se a importância da seleção dos atributos, de forma que mesmo que não sejam utilizados todos os possíveis, é importante selecionar os mais representativos para gerar resultados próximos da realidade.

Já o atributo e suas classes referentes ao mapa de suscetibilidade dos fatores bióticos e socioeconômicos foram selecionados visando traduzir a importância dos elementos naturais existentes, bem como da ocupação antrópica e suas atividades desenvolvidas. Por isso, as classes de uso foram divididas separando áreas naturais existentes, legalmente protegidas, áreas de ocupação humana e também as áreas onde são desenvolvidas atividades econômicas.

Da mesma forma, a atribuição de pesos para os atributos e as classes de atributos é de vital importância para a qualidade final dos mapas gerados. Por isso, se faz necessário apresentar a estruturação das matrizes de ponderação do Método AHP, bem como os resultados de pesos finais obtidos. As ponderações foram realizadas pelos autores do trabalho.

Nas Figuras 3 e 4 são apresentadas as comparações paritárias, bem como os resultados obtidos (autovetores ou pesos) e também a análise da consistência das comparações, dada pela razão de consistência (RC).

Em relação à erosão (Figura 3), foi apresentada apenas a matriz de ponderação dos atributos, as matrizes referentes a cada classe de atributo foram omitidas para evitar repetições.

Ainda em relação à Figura 3, verifica-se que na análise da consistência obteve-se valor de RC de 0,12%, que pode ser considerado baixo já que o método considera até o limite de 10%, isto é, as comparações realizadas foram coerentes e geraram resultados confiáveis.

Os autovetores obtidos, que indicam a ordem de importância dos atributos, classificaram em primeiro lugar a Declividade (52%), seguida pelo Uso (27%), Tipo de Solo (14%) e por último a Concavidade (7%).

MATRIZ RECÍPROCA					
Atributos	Declividade	Concavidade	Uso	Tipo de Solo	
Declividade	1/1	7/1	2/1	4/1	
Concavidade	1/7	1/1	1/4	1/2	
Uso	1/2	4/1	1/1	2/1	
Tipo de Solo	1/4	2/1	1/2	1/1	
SOMA	1,89	14,00	3,75	7,50	

MATRIZ NORMALIZADA					
Atributos	Declividade	Concavidade	Uso	Tipo de Solo	AUTOVETOR
Declividade	0,53	0,50	0,53	0,53	0,52
Concavidade	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07
Uso	0,26	0,29	0,27	0,27	0,27
Tipo de Solo	0,13	0,14	0,13	0,13	0,14

VERIFICAÇÃO DE CONSISTÊNCIA	
Amáx	4,00
IC	0,00
ICR	0,90
RC	0,00 0,12%

Figura 3. Matriz AHP elaborada para erosão.

MATRIZ RECÍPROCA						
Classes de Uso	APP	Mata	Culturas / Reflorestamento / Estradas	Área Urbana/Loteamento	Solo Exposto	
APP	1/1	2/1	5/1	2/1	9/1	
Mata	1/2	1/1	3/1	1/1	7/1	
Culturas / Reflorestamento / Estradas	1/5	1/3	1/1	1/3	5/1	
Área Urbana/Loteamento	1/2	1/1	3/1	1/1	7/1	
Solo Exposto	1/9	1/7	1/5	1/7	1/1	
SOMA	2,31	4,48	12,20	4,48	29,00	

MATRIZ NORMALIZADA						
Classes de Uso	APP	Mata	Culturas / Reflorestamento / Vias	Área Urbana/Loteamento	Solo Exposto	AUTOVETOR
APP	0,43	0,45	0,41	0,45	0,31	0,41
Mata	0,22	0,22	0,25	0,22	0,24	0,23
Culturas / Reflorestamento / Estradas	0,09	0,07	0,08	0,07	0,17	0,10
Área Urbana/Loteamento	0,22	0,22	0,25	0,22	0,24	0,23
Solo Exposto	0,05	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03

VERIFICAÇÃO DE CONSISTÊNCIA	
Amáx	5,15
IC	0,04
ICR	1,12
RC	0,03 3,24%

Figura 4. Matriz AHP elaborada para fatores bióticos e socioeconômicos.

Em relação aos fatores bióticos e socioeconômicos (Figura 4), verificou-se que o valor de RC foi de 3,24%. Valor um pouco maior do que o obtido para erosão, mas ainda dentro do limite aceitável.

Quanto à ordem de importância dos atributos obteve-se em primeiro lugar Áreas de Preservação Permanente (40,9%), seguido por Mata (23%) e Área Urbana/Loteamento (23%), Culturas/Reflorestamento/Estradas (9,8%) e por último Solo Exposto (3,3%).

Finalmente, puderam ser gerados os mapas intermediários em questão, conforme o método descrito anteriormente e, esses foram então combinados e geraram o Mapa de Fragilidade Ambiental. Para permitir uma melhor visualização dos resultados, foi selecionada uma região na área de estudo para serem apresentados em detalhe ambos os mapas intermediários e também a combinação final que gerou o mapa de fragilidade ambiental. Estes resultados estão exibidos na Figura 5.

Como é possível observar nos mapas apresentados, o mapa de suscetibilidade à erosão apresenta áreas mais críticas nas declividades elevadas, como era de se esperar uma vez que este é o atributo com maior peso para este mapa (52%). De forma que o método utilizado para sobrepor os atributos (soma ponderada) foi eficiente, pois garantiu que os atributos mais importantes apresentassem maior influência.

Da mesma forma ocorreu no mapa de suscetibilidade dos fatores bióticos e socioeconômicos, no qual houve destaque para as áreas de preservação permanente (APP's) (40,9%), que pela ponderação realizada recebeu o valor mais elevado. Este resultado se mostra coerente, pois as APP's além de serem áreas que devem manter elementos naturais originais são áreas legalmente protegidas.

O mapa final representa bem a combinação dos mapas intermediários, na medida em que destaca as áreas mais críticas de cada mapa e amortiza as áreas intermediárias. Isto reflete que

os mapas intermediários apresentam a mesma importância (peso) na geração do mapa de fragilidade ambiental.

Além disso, o mapa de fragilidade ambiental, na medida em que combina os diferentes processos que podem ocorrer aos elementos bióticos e socioeconômicos afetados, representa as áreas que podem ser mais afetadas por mudanças da dinâmica natural existente devido a fatores intrínsecos. Este resultado é justamente o esperado, pois traduz fielmente a definição adotada neste trabalho.

É importante ressaltar que pelo método definido, a princípio, todos os mapas intermediários devem ser utilizados para elaboração do mapa final. Sendo que o apresentado neste artigo é apenas para ilustrar a aplicação do método, já que o objetivo primário do trabalho é apresentar o conceito e método de fragilidade ambiental. Podem ainda ser realizados testes com a combinação de diferentes mapas intermediários a fim de se verificar a sensibilidade do método e da área de estudo aos diferentes processos.

Cabe destacar ainda, que os mapas apresentados poderiam ter recebido tratamento cartográfico em relação à apresentação das áreas. Na medida em que existem fragmentos muito pequenos de determinadas classes, de forma que na escala apresentada eles se tornam pouco representativos. Esses fragmentos podem ser agrupados com um critério de área mínima e incorporados ao polígono de maior área no qual está contido. Gerando um mapa final com áreas mais contínuas e que possa ser mais facilmente utilizado para gestão ambiental e geotécnica da área.

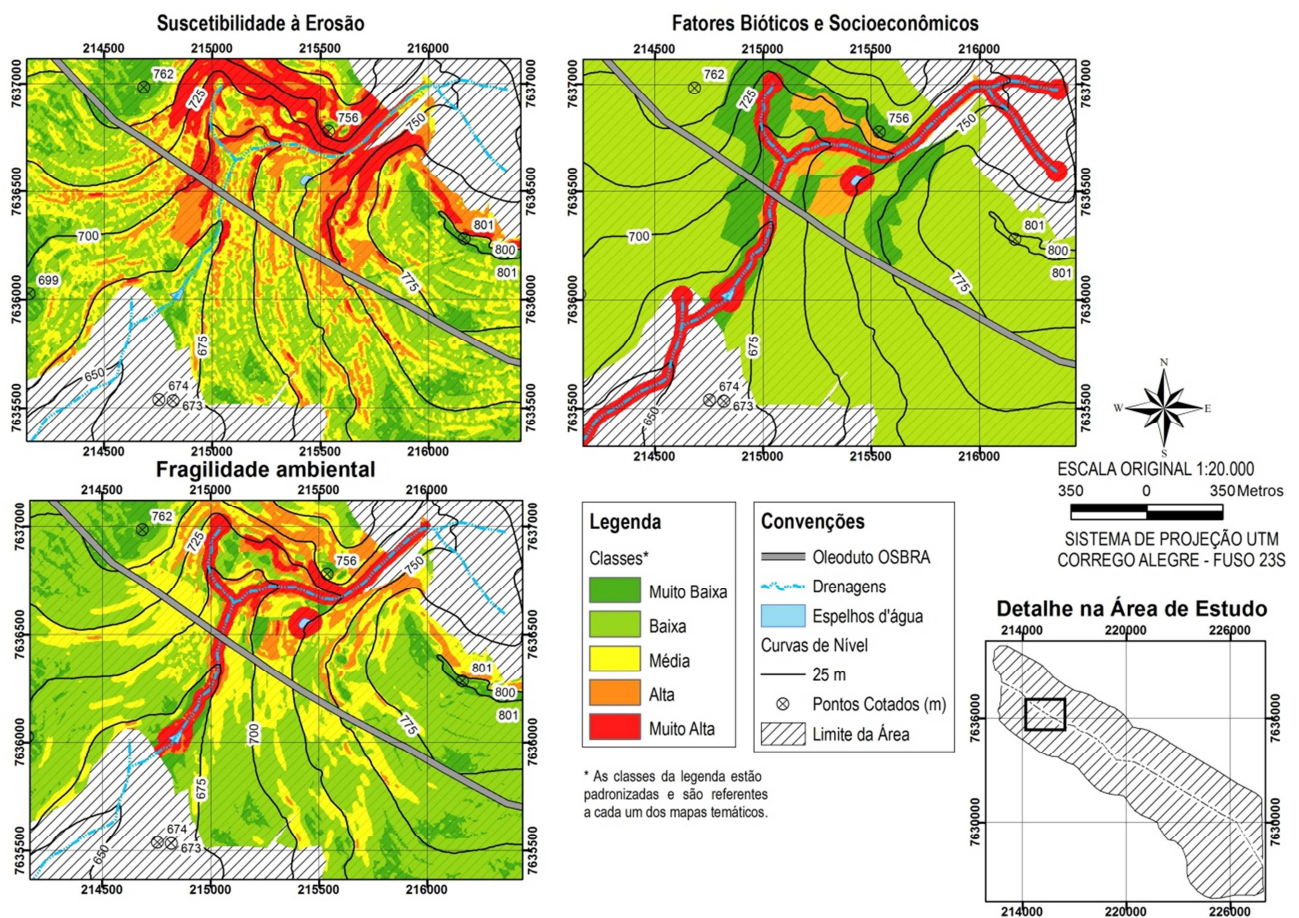


Figura 5. Mapas de erosão, fatores bióticos e socioeconômicos e de fragilidade ambiental.

4. Conclusões

Conclui-se que o conceito que melhor define o termo Fragilidade Ambiental é o que a considera a desestabilização do equilíbrio dinâmico existente no ambiente, e que esta é uma característica intrínseca do meio ambiente. Além disso, que para avaliar seus diferentes níveis é importante considerar, na medida do possível, aspectos do meio físico, biótico e socioeconômico.

Verificou-se também a importância da seleção cuidadosa de todos os atributos e classes de atributos que serão considerados na geração dos mapas geotécnicos. É necessário englobar todos os aspectos do meio ambiente, mas que também sejam coerentes com a área de estudo.

Além disso, o método de Processo de Análise Hierárquica (AHP) se mostrou bastante interessante para a classificação da importância relativa de cada atributo e obtenção dos pesos finais. Através desse método é possível assegurar-se que todos os julgamentos realizados foram coerentes, gerando resultados mais confiáveis.

O mapa de fragilidade ambiental gerado para ilustrar a aplicação do método se mostrou bastante condizente com os mapas intermediários usados para gerá-lo. Tal fato indica que o método proposto é adequado à definição conceitual defendida neste trabalho.

Agradecimentos. Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

Augusto Filho, O. **Carta de risco de escorregamentos quantificada em ambiente de SIG como subsídio para implantação de seguros em áreas urbanas: um ensaio em Caraguatatuba (SP)**. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista. Rio Claro. 2001. 196p.

Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. In: **Reunião Técnica de Levantamento de Solos**, 10. Rio de Janeiro - RJ. 1979. 83 p.

Goldsmith, F. B. *Evaluating Nature*. In: Warren A. e Goldsmith F.B. (eds.). **Conservation in Perspective**. John Wiley and Sons, Chichester. 1983. pp. 233-246.

Mathewson, C. e Font, R. G. Geologic environment: forgotten aspects in the land use planning process. **The Geological Society of America - Engineering Geology Case Histories**, 10:23-38. 1974.

Ratcliffe, D. A. *Criteria for the selection of nature reserves*. **Advancement of Sciences**, 27. 1971. pp. 294-296.

Ross, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**. Nº 8. 1994. pp. 63-74.

Saaty, T. L. **The Analytic Hierarchy Process**. McGraw Hill International. 1980.

Sistema de Informações para o Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo. Banco de dados Hidrometeorológicos. Disponível em http://www.sigrh.sp.gov.br/cgi-bin/sigrh_carrega.exe?f=/index/informe_files/dados_daee.html, último acesso em 26 de Abril de 2012.

Smith, P. G. R. e Theberge, J. B. *A review of criteria for evaluating natural areas*. **Environment Management** 10. 1986. pp. 715-734.

Soares, S. R. Gestão e Planejamento Ambiental. **Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis - SC. 2006.

Zuquette, L. V. **Análise crítica sobre cartografia geotécnica e proposta metodológica para as condições brasileiras**. Tese de Doutorado. EESC, São Carlos - SP. 1987. 673p.