



**Sensibilidade da ponderação em fatores usados em avaliação multicritério ambiental para análise de fragilidades em bacia hidrográfica**

TREVISAN, Mario Luiz<sup>1</sup>, PADILHA, Damáris Gonçalves<sup>2</sup>, CRUZ, Rafael Cabral<sup>3</sup>

<sup>1</sup>DEPG/UFSM/eletroduto@gmail.com

<sup>2</sup>GERHI/UFSM/damarispadilha@gmail.com

<sup>3</sup>GERHI/UNIPAMPA/rafaelcabralcruz@gmail.com

**RESUMO**

Uma avaliação multicritério (AMC) tem como objetivo atribuir uma nota a um modelamento constituído de uma quantidade selecionada de fatores ponderáveis. A nota é obtida através da ponderação dos fatores, resultando em um índice ou cenário. Sob o enfoque ambiental, uma das considerações possíveis é a fragilidade do ambiente relativa aos impactos causados pela implantação de um empreendimento. Portanto, para maximizar a eficácia da AMC, é necessário que tanto a escolha dos fatores componentes do modelo quanto sua ponderação conduza à realidade do ambiente em questão. Um dos princípios básicos prescritos para a AMC consiste na combinação linear ponderada dos critérios, portanto a atribuição de pesos é crítica, uma vez que pode influenciar no resultado. Neste sentido, com o objetivo de refinar o processo de tomada de decisão com auxílio multicritério foi desenvolvido um método para avaliar a sensibilidade da ponderação. O fundamento deste método está descrito neste artigo.

Palavras-chave: Análise Sensibilidade, Avaliação Multicritério, Bacia Hidrográfica

Temática: Impacto Ambiental

**ABSTRACT**

*A multicriteria evaluation (MCE) is to assign a note to one modeling consists of a selected number of factors overlooked. The note is obtained by weighting the factors, resulting in an index or scenario. Under the environmental focus, one of the considerations is the potential fragility of the environment on the impacts caused by the deployment of an enterprise. Therefore, to maximize the effectiveness of the AMC, it is necessary that both the choice of the component factors of the model as its weighting leads to the reality of the environment in question. One of the basic principles prescribed for the AMC is the linear combination of weighted criteria, so the assignment of weights is critical, since it can influence the outcome. In this sense, in order to refine the process of decision making with multicriteria aid was developed a method to evaluate the sensitivity of the weighting. The foundation of this method is described in this article.*

*Key-words: Sensitivity Analysis, Multicriteria Evaluation, Basin Watershed*

*Theme Area: Environmental Impact*



## **1. Fragilidade em Bacia Hidrográfica**

A resolução 01/86 do CONAMA define impacto ambiental como qualquer alteração das propriedades químicas, físicas e biológicas do meio ambiente, causadas por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas.

Para Moreira (2009), o que caracteriza o impacto ambiental não é qualquer alteração nas propriedades do ambiente, mas as alterações que provoquem o desequilíbrio das relações constitutivas do ambiente, tais como as alterações que excedam a capacidade de absorção do ambiente considerado.

Já a fragilidade ambiental, segundo Ghezzi (2003), diz respeito à susceptibilidade de dano que o meio ambiente pode sofrer, sendo que, a poluição também é um atributo para a fragilidade. Portanto, a fragilidade ambiental refere-se a áreas sensíveis a impactos ambientais, tendo baixa capacidade de recuperação.

Assim qualquer perturbação dos padrões e processos na bacia hidrográfica pode provocar uma degradação na qualidade ambiental da mesma (meios terrestre e aquático, barreiras físicas ou qualitativas, permeáveis ou impermeáveis).

Quando se faz análise ambiental buscando recursos de geoprocessamento digital em imagens raster, as fragilidades são notas atribuídas para variáveis indicadoras dos processos e que podem ser mapeadas na escala do estudo. Essas notas espacializadas permitem identificar as áreas com maior ou menor vulnerabilidade às perturbações, permitindo discriminar regiões mais ou menos aptas a receber alterações antrópicas. (MMA, 2009)

## **2. Seleção de Variáveis do Modelo**

Considerando-se que a construção de um modelo representante de uma bacia de forma sintética, porém sem perda de informações relevantes, a seleção das variáveis do modelo é de crucial importância, uma vez que são elas que descrevem o *status* de padrões e processos ambientais que respondem a um determinado regime de perturbações (MMA, 2009). Portanto, um modelo consistente deve estar apto a mostrar um resultado muito semelhante às condições naturais, desde que suas variáveis tenham sido pensadas adequadamente.

## **3. Avaliação Multicritério**

Em avaliação multicritério um modelo deve ser apto a responder em forma de cenários futuros em função de alterações nas variáveis, ou seja, a construção dos mapas-síntese a partir das variáveis consiste no objetivo fundamental de uma avaliação multicritério. As variáveis também podem ser chamadas de fatores, representadas em mapas temáticos.

No contexto deste trabalho, a palavra avaliação remete à atribuição de pesos – ou valoração – dos mapas temáticos, denominados fatores, de modo a que se construa um conjunto de mapas cujos pesos somam 1 (um), formando um vetor de valores, resultando num mapa-síntese particular e único para aquele contexto. Variando-se os pesos dos fatores, haverá uma modificação final no mapa-síntese, constituindo-se em um cenário alternativo.

Pode-se também construir sub-modelos para a composição de um dos fatores do modelo geral, porém sempre com a mesma sistemática.

## **4. Análise de Sensibilidade**

### **4.1 Modelagem conceitual**

O conceito de sensibilidade – para este estudo – considera as diferenças entre os mapas resultantes de processamento da avaliação multicritério quando se faz a variação do peso de um fator mantendo-se os demais iguais. A Figura 4.1 exemplifica de modo genérico este processo. Nela são mostrados fatores  $[F_1 \text{ a } F_n]$ , esquematizando-se uma variação de  $F_4$  enquanto os demais são mantidos com pesos iguais para cada etapa.

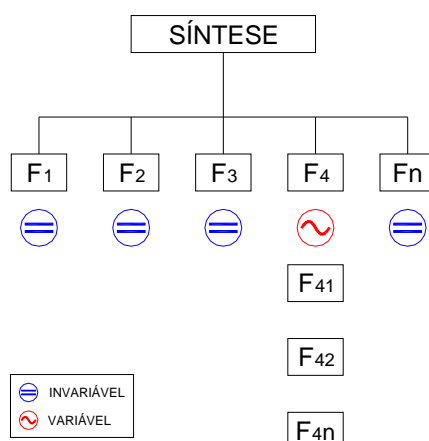


Figura 4.1 – Esquema da modelagem da sensibilidade

Estas tabelas de pesos em função do número de fatores são sintetizadas e generalizadas pela Equação 4.1. Esta equação determina o vetor de pesos, cujo somatório deve ser 1.

$$w + \sum_{i=1}^{nf-1} [(1-w)/(nf-1)] = 1 \quad (4.1)$$

em que:

w = peso decimal atribuído ao fator

(w = 0,1 a 0,5, com intervalo de 0,1)

nf = número total de fatores

Para um conjunto de 5 fatores como o mostrado na Figura 4.1, a distribuição resultante do cálculo dada pela Equação 4.1 é mostrada na Tabela 4.1. Esta tabela apresenta os valores da ponderação para o fator variável e para os demais, de modo a somarem sempre 1 (um), como prescreve uma avaliação multicritério.

A variação dos pesos é arbitrária, porém, para equilibrar tempo e volume de processamento *versus* preciosismo nos resultados, optou-se por variar os pesos de um fator num intervalo de unidade decimal.

Outros intervalos podem ser adotados, porém sempre lembrando que, na prática, não é conveniente atribuir pesos muito altos, para não supervalorizar um fator.

Tabela 4.1 – Distribuição dos pesos para cinco fatores

5 FATORES	PESO				
Fator 1 fixo	0,225	0,2	0,175	0,15	0,125
Fator 2 fixo	0,225	0,2	0,175	0,15	0,125
Fator 3 fixo	0,225	0,2	0,175	0,15	0,125
<b>Fator 4 sob variação</b>	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,3</b>	<b>0,4</b>	<b>0,5</b>
Fator 5 fixo	0,225	0,2	0,175	0,15	0,125
$\Sigma$	1	1	1	1	1

Após todos os pesos serem atribuídos a todos os fatores obtém-se um conjunto ponderado de  $n$  fatores vezes  $p$  pesos. A partir deste conjunto é feita a análise de sensibilidade, obtida pela correlação entre um cenário homogêneo – em que os pesos dos fatores são iguais – e os demais cenários ponderados.



#### 4.2 O cenário homogêneo

Cenário homogêneo é aquele resultante da composição dos fatores com mesmo peso, sendo a obtenção deste dividindo-se 1 pelo número total de fatores. Este cenário é relevante exatamente devido a sua “neutralidade” multicriterial, uma vez que nenhum dos fatores apresenta-se mais importante que os demais.

#### 4.3 Correlação para análise de sensibilidade

A correlação é usada para determinar se há relacionamento entre duas variáveis. A presença de uma correlação pode conduzir-nos a um método para estimar uma variável a partir de outra. Por exemplo: estimar o volume de uma árvore pelo seu diâmetro

A correlação nunca pode ser maior do que 1 ou menor do que menos 1. Uma correlação próxima a zero indica que as duas variáveis não estão relacionadas. Uma correlação positiva indica que as duas variáveis movem juntas, e a relação é tão mais forte quanto mais a correlação se aproxima de um. Uma correlação negativa indica que as duas variáveis movem-se em direções opostas, e que a relação também fica mais forte quanto mais próxima de menos 1 a correlação ficar. Duas variáveis que estão perfeitamente correlacionadas positivamente ( $r = 1$ ) movem-se essencialmente em perfeita proporção na mesma direção, enquanto dois conjuntos que estão perfeitamente correlacionados negativamente movem-se em perfeita proporção em direções opostas (BERTOLO, 2009)

Obtidas todas as correlações entre o cenário homogêneo e os demais, tabulam-se os dados conforme mostra a Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Tabulação das correlações: homogêneo e mapas ponderados

		CORRELAÇÃO						
		PESO	Hom	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
CORRELAÇÃO	O	Hom	1	C <sub>h1</sub>	C <sub>h2</sub>	C <sub>h3</sub>	C <sub>h4</sub>	C <sub>h5</sub>
		0,1		1	C <sub>12</sub>	C <sub>13</sub>	C <sub>14</sub>	C <sub>15</sub>
		0,2			1	C <sub>23</sub>	C <sub>24</sub>	C <sub>25</sub>
		0,3				1	C <sub>34</sub>	C <sub>35</sub>
		0,4					1	C <sub>45</sub>
		0,5						1

Nesta tabela, a linha que mostra os valores [ $C_{h1}$  a  $C_{h5}$ ] é que vai revelar numericamente, sob o enfoque do geoprocessamento *raster* para avaliação multicritério, a variação do correlacionamento com o cenário homogêneo (Hom). Para facilitar a visualização, transcrevem-se os valores para um gráfico como se vê na Figura 4.2.

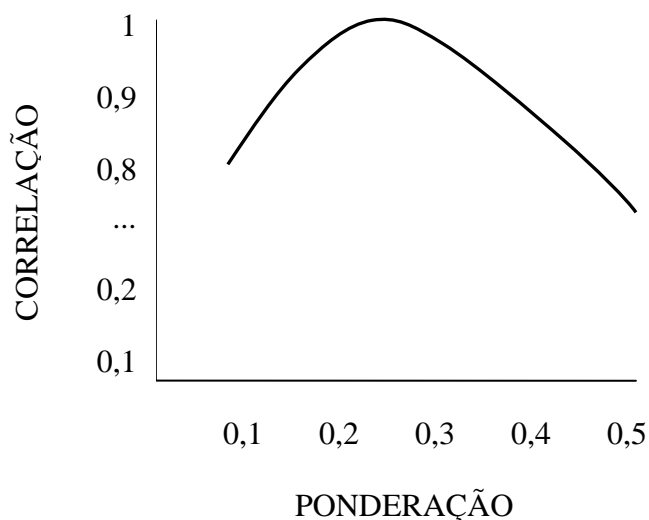


Figura 4.2 – Correlação *versus* Ponderação

Isto, em suma, consiste num modo de avaliar a sensibilidade dos cenários ponderados, uma vez que, quanto menor a correlação entre um cenário e o cenário homogêneo, mais discriminante ele é. Esta discriminância é relevante para auxiliar no reajustamento dos pesos dos fatores cumprindo a função de subsidiar a tomada de decisão. Portanto, conclui-se que este gráfico é um ótimo Indicador de Sensibilidade.

## 5. Síntese de aplicação

A síntese de aplicação consiste numa demonstração numérica do método, utilizando-se de pequenas matrizes 4x4 onde cada célula pode ser considerada um *pixel* no terreno (Figura 5.1). Estas matrizes simulam três fatores “rasterizados”: FATOR 1, FATOR 2 e FATOR 3, os quais demonstram fragilidades numa escala de 0 a 255. Escalonou-se a fragilidade em três níveis: alta, média e baixa. Considerou-se a hipótese de implantar algum tipo de atividade impactante, de modo que os valores mais baixos (entre 0 e 85) são demonstrativos de alta fragilidade e os intermediários (entre 86 e 170) exigem que se estude melhor a possibilidade da implantação. Os valores mais altos (171 a 255) indicam menor fragilidade, consequentemente, maior favorabilidade à implantação do empreendimento.

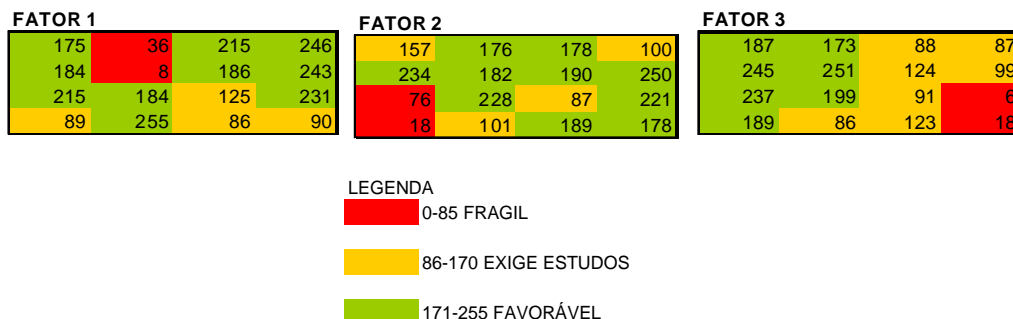


Figura 5.1 – Fatores matriciais escalonados de 0 a 255

A matriz vista na Figura 5.2 é o resultado de uma ponderação homogênea em que os pesos multiplicadores dos três fatores são iguais a 0,333.



HOMOGÊNEO				
172.83	128.21	160.17	144.19	
220.78	146.85	166.5	197.14	
175.82	203.46	100.9	152.51	
98.568	147.19	132.53	95.238	

Figura 5.2 – Matriz ponderada homogênea

As matrizes vistas na Figura 5.3 são resultantes das ponderações prescritas pela Equação 4.1 para os três fatores.

PESOS	PONDERAÇÃO DO FATOR 1				PONDERAÇÃO DO FATOR 2				PONDERAÇÃO DO FATOR 3			
<b>0,1</b>	172.3	160.65	141.2	108.75	178.6	111.65	154.15	159.85	168.1	112.7	185.65	164.4
	233.95	195.65	159.9	181.35	216.45	134.75	158.5	178.9	212.6	110.6	181.6	231.75
	162.35	210.55	92.6	125.25	211	195.15	105.9	128.75	154.65	205.3	104.5	204
	102.05	109.65	149	97.2	126.9	163.55	112.95	66.4	67.05	168.8	136.05	122.4
<b>0,2</b>	172.6	146.8	149.4	124	176.2	118.8	156.8	153.2	151.5	102.1	166	147.1
	228.4	174.8	162.8	188.2	218.4	140	162	186.8	191.7	101.1	162.8	207.1
	168.2	207.6	96.2	137	196	198.8	103.8	139	140.1	184.7	93.9	181.4
	100.6	125.8	142	96.4	114.8	156.6	121.4	78.8	61.7	151	122.3	109
<b>0,3</b>	172.9	132.95	157.6	139.25	173.8	125.95	159.45	146.55	172.3	126.1	163.95	147.2
	222.85	153.95	165.7	195.05	220.35	145.25	165.5	194.7	219.8	141.8	168.8	202.25
	174.05	204.65	99.8	148.75	181	202.45	101.7	149.25	172.95	203.9	101.5	160
	99.15	141.95	135	95.6	102.7	149.65	129.85	91.2	94.15	150.4	133.15	99.2
<b>0,4</b>	173.2	119.1	165.8	154.5	171.4	133.1	162.1	139.9	174.4	132.8	153.1	138.6
	217.3	133.1	168.6	201.9	222.3	150.5	169	202.6	223.4	157.4	162.4	187.5
	179.9	201.7	103.4	160.5	166	206.1	99.6	159.5	182.1	203.2	100	138
	97.7	158.1	128	94.8	90.6	142.7	138.3	103.6	107.7	141.2	131.7	87.6
<b>0,5</b>	173.5	105.25	174	169.75	169	140.25	164.75	133.25	176.5	139.5	142.25	130
	211.75	112.25	171.5	208.75	224.25	155.75	172.5	210.5	227	173	156	172.75
	185.75	198.75	107	172.25	151	209.75	97.5	169.75	191.25	202.5	98.5	116
	96.25	174.25	121	94	78.5	135.75	146.75	116	121.25	132	130.25	76

Figura 5.3 – Conjunto dos fatores sistematicamente ponderados

A seguir, obtem-se o correlacionamento (Correlação disponível no software MICROSOFT OFFICE EXCEL®) entre estas matrizes ponderadas dos fatores com a matriz ponderada homogênea (e também entre elas). A Figura 5.4 mostra esta síntese.

CORRELAÇÕES DO FATOR 1						
	H	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
H	1	0,8364	0,9384	0,9959	0,9845	0,916
0,1		1	0,9743	0,8824	0,7274	0,5463
0,2			1	0,9658	0,8634	0,7211
0,3				1	0,9647	0,8762
0,4					1	0,9722
0,5						1

CORRELAÇÕES DO FATOR 2						
	H	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
H	1	0,8901	0,9602	0,9974	0,9898	0,9415
0,1		1	0,982	0,9207	0,8161	0,6845
0,2			1	0,9778	0,9106	0,8099
0,3				1	0,9769	0,9147
0,4					1	0,9799
0,5						1

CORRELAÇÕES DO FATOR 3						
	H	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
H	1	0,8469	0,8577	0,9956	0,9822	0,8982
0,1		1	0,9998	0,8928	0,7318	0,5269
0,2			1	0,9019	0,7457	0,5443
0,3				1	0,9604	0,8533
0,4					1	0,9648
0,5						1

Figura 5.4 – Matrizes dos valores de correlação



A partir das correlações tabuladas na primeira linha das matrizes obtém-se o gráfico visto na Figura 5.5, que demonstra as diversas variações correlacionais entre os fatores ponderados quando comparados com sua ponderação homogênea.

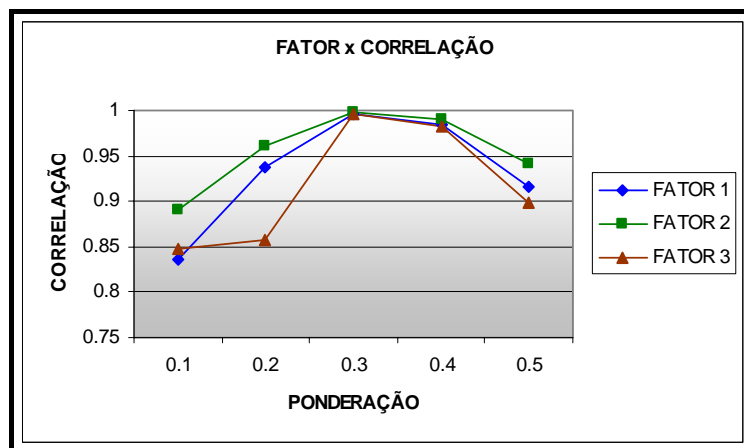


Figura 5.5 – Curvas de correlação Ponderação Sistemática x Ponderação Homogênea para os 3 fatores

A análise das curvas deste gráfico permite comparar, discutir e, caso conveniente, redistribuir os pesos dos fatores para obtenção de cenários geoprocessados mais aptos à tomada de decisão.

## 6. Discussão dos resultados

A análise das curvas dos fatores mostrada no gráfico da Figura 5.5 é a seguinte:

- A ponderação de todos os três fatores apresenta alta correlação com o homogêneo (acima de 0,83);
- A ponderação do fator 1 e do fator 2 tem sequência semelhante, o que leva à sugestão de discutir sobre uma possível “fusão” entre os mesmos, ou a supressão de um deles;
- A ponderação do fator 3 segue sua maior discriminância até o peso 0,2, enquanto as demais aumentam;
- O número de fatores influencia na atribuição de pesos, sendo recomendável evitar os pesos no intervalo próximo à homogeneidade (lembrando que esta é igual a 1 dividido pelo número de fatores), pois sempre resultará em uma ponderação não discriminante.

## 7. Considerações finais

Este trabalho demonstrou o fundamento do geoprocessamento digital para avaliação multicritério como apoio à tomada de decisão com o uso de mapas rasterizados;

Foi possível descrever e demonstrar a análise de sensibilidade da ponderação dos fatores pelo processo matemático matricial que fundamenta a tecnologia raster;

Os diferentes cenários obtidos da avaliação multicritério são refinados pela análise de sensibilidade;

Finalmente, agrega-se mais um bom subsídio à tomada de decisão, sempre objetivando minimizar impactos sobre o ambiente derivados da implantação de empreendimentos em bacias hidrográficas.

## 8. Referências e Bibliografia

BERTOLO, L.A. <Disponível em < [http://bertolo.pro.br/AdminFin/StatFile/Manual\\_Estatistica.htm](http://bertolo.pro.br/AdminFin/StatFile/Manual_Estatistica.htm)>, Acesso em novembro de 2009



CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil). Resolução n.001, de 23 de janeiro de 1986, Considerando a necessidade de se estabelecerem as definições, as responsabilidades, os critérios básicos e as diretrizes gerais para uso e implementação da Avaliação de Impacto Ambiental como um dos instrumentos da Política Nacional do Meio Ambiente, **Diário Oficial [da] República do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 17 de fevereiro de 1986.

GHEZZI, A. O. **Avaliação e mapeamento da fragilidade ambiental da Bacia do Rio Xaxim, Bahia de Antonina – PR, com o auxílio de geoprocessamento**. 2003. 57f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Desenvolvimento metodológico e tecnológico para avaliação ambiental integrada aplicada ao processo de análise de viabilidade de hidrelétricas – FRAG-RIO**. Relatório: Etapa 1 convênio FINEP/UFSM/UNIPAMPA. 2009. Santa Maria: FATEC/UNIPAMPA/UFSM. **FRAGRIO**.

MOREIRA, A. C. M. L. **Conceitos de ambiente e de impacto ambiental aplicáveis ao meio urbano**. Disponível em < [http://lproweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/spm/usu\\_doc/moreira6-Conceito\\_impacto\\_urbano.pdf](http://lproweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/spm/usu_doc/moreira6-Conceito_impacto_urbano.pdf)>, Acesso em outubro de 2009.