

## UTILIZAÇÃO DO MÉTODO AHP PARA DETERMINAÇÃO DE UM MODELO MATEMÁTICO PARA O MAPEAMENTO DAS ÁREAS DE RISCOS DE INUNDAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ALEGRE, ES

*Gabriel Graciliano Guzzo Rosa<sup>1</sup>, Alexandre Rosa dos Santos<sup>2</sup>, Telma Machado de Oliveira Peluzio<sup>1</sup>, Romário Mariano<sup>2</sup>.*

<sup>1</sup>UFES/Departamento de Engenharia Florestal, Alegre-ES, [gabrielfloresta@yahoo.com.br](mailto:gabrielfloresta@yahoo.com.br); [tmpeluzio@hotmail.com](mailto:tmpeluzio@hotmail.com)

<sup>2</sup>UFES/Departamento de Geografia, Vitória-ES, [mundogeomatica@yahoo.com.br](mailto:mundogeomatica@yahoo.com.br); [romariogeo@hotmail.com](mailto:romariogeo@hotmail.com)

**Resumo-** O presente estudo teve por objetivo utilizar o método AHP para determinação de um modelo matemático para o mapeamento das áreas de riscos de inundação na bacia hidrográfica do rio Alegre, ES, localizada entre as latitudes 20° 46' e 20° 55' Sul e longitudes 41° 28' e 41° 37' Oeste de Greenwich, utilizando uma metodologia proposta por Saaty (1977). Foi utilizada aerofoto, obtida em setembro de 2007, que serviu como base para o mapeamento de classes ambientais (uso e ocupação do solo, altitude, declividade, pedologia e precipitação pluviométrica média para o verão). Estas classes foram reclassificadas em relação à susceptibilidade à inundação, sendo posteriormente determinados os pesos estatísticos do modelo de riscos de inundação baseado no método AHP proposto por Saaty (1977). Com o emprego dessa metodologia, reorganizaram-se as classes em estudo, dispondo-as, de acordo com o risco de inundação entre os níveis baixo-baixíssimo risco, médio-baixo risco, médio risco, alto-médio risco, altíssimo-alto risco. Finalmente, foi realizado um estudo estatístico correlacionando as áreas de inundação com cada classe introduzida no modelo. A maior área mapeada pertence à classe de médio risco (MR), apresentando 52,57%, seguida pela classe de alto-médio risco (A-MR), responsável por 32,39% da área.

**Palavras-chaves:** Inundação, bacia hidrográfica, mapeamento.

**Área do Conhecimento:** Ciências Exatas e da Terra

### Introdução

A região da bacia hidrográfica do rio Alegre sofreu nas últimas quatro décadas, um grande e contínuo processo de ocupação desordenada do solo, provocando diversos impactos negativos ao meio ambiente como a degradação e fragmentação da cobertura vegetal consumida progressivamente pela ocupação antrópica, por meio da construção e implementação da malha viária, áreas habitacionais, áreas agrícolas e pastagens.

É importante relevar que existe uma diferença entre os fenômenos inundação e enchente (DEFESA CIVIL NACIONAL, 1996). A inundação é o transbordamento da água da calha normal de rios, mares, lagos e açudes, ou acúmulo de água por drenagem deficiente, em áreas não habitualmente submersas, enquanto que a enchente é a elevação do nível de água de um rio, acima de sua vazão normal.

O aumento da densidade populacional de uma comunidade traz problemas de ordem quantitativa na demanda de água para abastecimento público, aumento na geração de resíduos sólidos, poluição dos rios e lençol freático, deterioração da qualidade dos corpos d'água e da qualidade do ar, o que gera problemas de poluição ambiental. Já o aumento da densidade de ocupação por edificações e obras

de infra-estrutura viária, por sua vez, traz como consequência direta o aumento das áreas impermeáveis, modificando o sistema de drenagem anteriormente existente, incrementando a velocidade de escoamento superficial, reduzindo o tempo de pico de enchentes, amplificando a vazão desses picos, e reduzindo as vazões de recarga do lençol freático, contribuindo também para aumento das áreas de inundação (ENOMOTO, 2004).

Segundo a Defesa Civil Nacional (1996) as inundações podem ser previstas e em alguns casos são graduais. Estas últimas são intensificadas por variáveis climatológicas de médio e longo prazo e pouco influenciáveis por variações diárias de tempo. Relacionando-se, assim, muito mais com períodos demorados de chuvas contínuas do que com chuvas intensas e concentradas, caracterizando-se por sua abrangência e grande extensão.

Segundo Tucci (2004) as principais condições naturais para a ocorrência de inundações são relevo, tipo de precipitação, cobertura vegetal e capacidade de drenagem. Já as principais condições artificiais são obras hidráulicas, urbanização, desmatamentos, reflorestamento e uso agrícola.

Na pesquisa a ser realizada, foram utilizadas técnicas de Sistemas de Informações Geográficas

(SIG) sendo adaptadas ao Método Analítico Hierárquico (AHP) proposto por Saaty (1977) para o mapeamento das áreas de riscos de inundação na bacia hidrográfica do rio Alegre, ES.

## Metodologia

A bacia hidrográfica do rio Alegre está situada no município de Alegre, extremo Sul do Estado do Espírito Santo, entre as latitudes 20° 46' e 20° 55' Sul e longitudes 41° 28' e 41° 37' Oeste de Greewinch. Com uma área de aproximadamente 208,2 km<sup>2</sup>, pertence à bacia hidrográfica do rio Itapemirim, sendo o seu curso d'água principal o rio Alegre. A primeira etapa do trabalho foi a digitalização em tela das classes ambientais possíveis de serem afetadas pela inundação, baseado num mosaico aerofotogramétrico de setembro de 2007 na escala 1:35.000.

*Etapa 1 - Mosaicagem das aerofotos:* A aerofoto de setembro de 2007, foi cedida pelo Instituto Estadual de meio Ambiente (IEMA), sendo georreferenciada e mosaicada pelo Sistema de Informação Geográfica (SIG) ArcGIS 9.2.

*Etapa 2 - Elaboração dos mapas temáticos em classes ambientais:* foram elaborados os mapas de altitude (1), declividade (2), precipitação média para o Verão (3), uso e ocupação do solo (4) e pedologia (5). Os dados vetoriais de curvas de nível e pontos de controle obtidos por GPS, utilizadas para elaboração dos mapas matriciais de altitude (1) e declividade (2) foram extraídos de cartas digitais disponibilizadas pelo IBGE na escala 1:50.000 e trabalhos de campo. Para elaboração do mapa matricial de precipitação pluviométrica média para os meses de Verão, foram utilizados dados de precipitação pluviométrica (série de 30 anos) das estações climatológicas da região de estudo oriundas da INCAPER (Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural), ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) e NEDTEC-CCA-UFES (Núcleo de Estudos e Difusão de Tecnologia em Floresta, Recursos Hídricos e Agricultura Sustentável, do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo) que foram interpolados no SIG ArcGIS 9.2 pelo método do Inverso do Quadrado da Distância (IQD) gerando o mapa matricial de precipitação pluviométrica (3). O mapa de uso e ocupação do solo (4) foi elaborado por meio da fotointerpretação em tela das classes de uso e ocupação representativas da área de estudo, sendo posteriormente, convertidas para o formato matricial. O mapa de pedologia foi obtido já no formato digital vetorial oriundo de trabalhos anteriormente realizados para a área de estudo.

*Etapa 3 - Ponderação das 05 (cinco) variáveis ambientais no SIG IDRISI 32:* De acordo

com a metodologia proposta por Rosot (1989), cada uma das 05 classes citadas anteriormente, representaram um nível diferente de informação geográfica e, de acordo com sua importância relativa para o aumento ou decréscimo do risco de incêndio, estas foram padronizadas usando o comando *FUZZY*, que permite o reescalonamento das variáveis ambientais para uma escala linear crescente que varia de 0 a 255, sendo que há uma entrada com o menor e o maior valor da variável ambiental em estudo. Valores mais próximos de 255 representam maior impacto da variável ambiental, enquanto que os valores mais próximos de 0 representam menor impacto.

*Etapa 4 - Determinação dos pesos estatísticos do modelo de risco de inundação:* Para representar de forma mais real as condições ambientais encontradas na bacia hidrográfica do rio Alegre, foi utilizado o método AHP proposto por Saaty (1977) visando determinar os pesos estatísticos do modelo. Por meio da decisão do problema em níveis hierárquicos, este método determina por meio da síntese dos valores dos agentes de decisão, uma medida global para cada alternativa, priorizando-as ou classificando-as ao finalizar o método (GOMES et. al., 2004).

A hierarquização elabora um modelo da realidade e visualiza a interação dos componentes do sistema que divididos em níveis, garante confiança e flexibilidade. Assim, os níveis deste sistema hierarquizado podem ser facilmente representados na forma de matriz, onde linhas e colunas são componentes do sistema. Essa matriz é chamada de matriz de comparação par a par, matriz dominante ou, ainda, matriz de decisão (SAATY, 1977).

Visto que os julgamentos humanos tendem a inconsistência, Saaty (1977) criou uma escala em que os valores assumidos vão de 1 (igual importância) a 9 (importância absoluta). Porque, de acordo com as pesquisas deste autor, seria impossível um indivíduo comparar simultaneamente mais que  $7 \pm 2$  elementos (Tabela 1). Assim, os elementos da matriz podem ser facilmente julgados de acordo com o seu grau de importância dentro da hierarquia admitida, sabendo-se que cada elemento indica quanto o fator da coluna da esquerda é mais importante em relação a cada fator correspondente na linha superior, portanto, quando um fator é julgado com ele mesmo, o único resultado possível é 1 (um) (COUTINHO, 2004).

Um ponto importante em relação as matrizes é a sua consistência. Saaty (1977) propõe uma forma de medi-las, por meio da razão de consistência (RC), afirmando que quanto maior o valor de RC maior será a inconsistência. Assim, para que a matriz seja considerada consistente, RC deve apresentar valor nulo se a matriz for de ordem 2, porém RC deve ter valor menor que 0,05

se a matriz for de ordem 3, já para matrizes de ordem 4, RC deve ser menor de 0,09, e para matrizes de ordem maior que 4 uma inconsistência igual ou menor que 0,10 é considerada aceitável. Porém, o RC é apenas um fator de alerta. A manipulação de valores ou julgamentos que forcem o enquadramento da matriz a consistência é desvantajosa, visto que a manipulação de valores ou pesos não corresponderá à realidade apesar de responderem ao rigor matemático. (JESEN, 1984).

Tabela 1. Escala fundamental de Saaty (1977).

Importância	Definição	Explicação
1	Igual importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância pequena	O julgamento favorece levemente uma atividade em relação à outra.
5	Importância grande ou essencial	O julgamento favorece fortemente uma atividade em relação à outra.
7	Importância muito grande	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra.
9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação à outra.
2,4,6,8	Valores intermediários	Quando há uma condição de compromisso entre as duas definições.

Fonte: Saaty (1977), adaptado.

A determinação dos pesos estatísticos foi realizada no SIG IDRISI 32 utilizando o comando *WEIGHT*.

*Etapa 5 - Combinação linear ponderada dos mapas representativos das variáveis ambientais:* Nesta etapa os mapas já ponderados de 0 a 255 bytes foram multiplicados pelos seus respectivos pesos e posteriormente somados utilizando o comando *RASTER CALCULATOR* (calculadora raster) do SIG ArcGIS 9.2. A equação abaixo mostra o modelo de Índice de Risco de Inundação (IRI) utilizado, sendo que os pesos das variáveis ambientais são mostrados na Tabela 2.

$$IRI = x_1 \text{Declividade} + x_2 \text{Altitude} + x_3 \text{Precipitação} + x_4 \text{Uso e ocupação} + x_5 \text{Pedologia}$$

Em que,  $x_1, x_2, x_3, x_4$  e  $x_5$  serão os pesos estatísticos, variando de 0 a 1.

A combinação e integração destas variáveis por meio do modelo possibilitaram a definição de classes de índices de risco de inundação para a área de estudo. Cada variável representou um nível diferente de informação geográfica e de acordo com sua importância relativa para o aumento ou decréscimo do risco de inundação,

sendo divididas em níveis variando de baixo-baixíssimo risco, médio-baixo risco, médio risco, alto-médio risco e altíssimo-alto risco (SILVA & Z Aidan, 2004).

Tabela 2. Valores dos coeficientes  $x_1, x_2, x_3, x_4$  e  $x_5$  obtidos mediante sistema matricial.

Variáveis	Classe	Valor
Declividade	$x_1$	0,5128
Altitude	$x_2$	0,2615
Precipitação para o Verão	$x_3$	0,1290
Uso e ocupação do solo	$x_4$	0,0634
Pedologia	$x_5$	0,0333
TOTAL	-	1,0000
Razão de consistência (RC)	-	0,05 (consistência aceitável)

## Resultados

O mapa das área de Risco de Inundação encontra-se na Figura 1, enquanto os resultados numéricos encontram-se no Tabela 3.

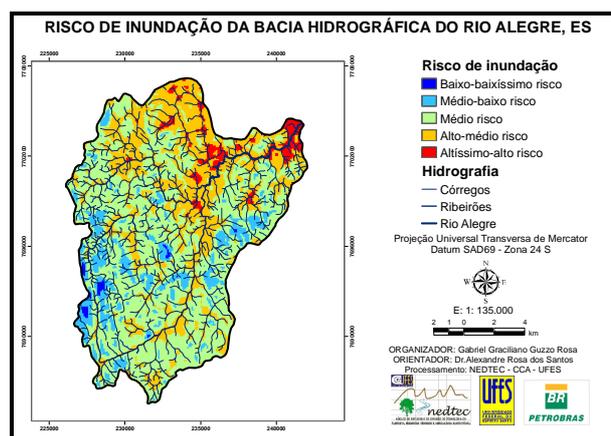


Figura 1. Risco de Inundação da Bacia Hidrográfica do Rio Alegre.

Tabela 3. Resultado do nº de pixels, da área (ha) e do % relativo ao total, dentro das classes de risco de inundação da bacia hidrográfica do rio Alegre. Em que: baixo-baixíssimo risco (B-BR), médio-baixo risco(M-BR), médio risco(MR), alto-médio risco(A-MR), e alto-altíssimo risco (A-MR).

Classes	Verão (2007)		
	Pixels	Área (ha)	% do total
B-BR	114	114	0,55
M-BR	2154	2154	10,35
MR	10945	10945	52,57
A-MR	6743	6743	32,39
A-AR	862	862	4,14
<b>Totais</b>	<b>20818</b>	<b>20818</b>	<b>100,00%</b>

## Discussão

Na Figura 1 percebe-se, claramente, a definição das várias classes estudadas, reafirmando o potencial de uso do ferramental metodológico em questão. A maior área mapeada pertence à classe de médio risco (MR), apresentando 52,57%, seguida pela classe de alto-médio risco (A-MR), responsável por 32,39% da área. Esse resultado é justificado por meio da avaliação realizada nas classes ambientais de maior peso, declividade e altitude respectivamente, que demonstram que a área de estudo apresenta declividades acentuadas, relevo irregular e altitudes medianas. Nota-se que a menor área mapeada refere-se à classe de baixo-baixíssimo risco (B-BR), responsável por apenas 0,55%, e que a classe de médio-baixo risco é responsável por 10,35%. Numericamente estas observações demonstram que a bacia hidrográfica do rio Alegre apresenta maior proporção de áreas suscetíveis à inundação, do que áreas pouco suscetíveis, já que as classes de alto-médio risco (A-MR) e alto-altíssimo risco (A-MR) respondem por 32,39% e 4,14% da área respectivamente. Uma observação importante a ser feita, é que as áreas edificadas apresentam médio a altíssimo risco de inundação, essa informação é importante pois podem ser tomadas medidas preventivas para minimização desse risco, visto que a água representa um grande carreador de doenças.

## Conclusão

Nas condições em que os estudos foram conduzidos, a análise dos resultados permitiu-se apresentar as seguintes conclusões:

- O ferramental metodológico permite a obtenção de mapas de inundação com clara identificação das classes de risco;
- As classes de médio risco e alto-médio risco são as que englobam o maior percentual da área da bacia;
- Nas áreas com terreno fortemente ondulado (20-40%), ocorrência de pastagem e altitude entre 620-720 m, temos a presença recorrente da classe de médio risco, que é a classe de maior área.
- A área de baixo-baixíssimo risco representou um pequeno quantitativo do total da área da bacia, devido à área de estudo apresentar declividade acentuada, altitudes medianas, que são classes ambientais de maiores pesos;
- Medidas preventivas contra inundações nas áreas edificadas devem ser realizadas devido ao médio e altíssimo risco apresentado nessas

áreas, uma opção é a construção de canais de drenagem.

## Referências

- DEFESA CIVIL NACIONAL. **Manual de Desastres**. Brasília: Ministério do planejamento e orçamento, 1996.
- COUTINHO, L.M. **As queimadas e seu papel ecológico**. Brasil Florestal, 10(44): 1980. 7 -23.
- ENOMOTO, C.F. **Método para elaboração de mapas de inundação: estudo de caso na bacia do rio Palmital, Paraná**. 2004. Dissertação (Mestre em Engenharia de recursos hídricos e ambiental) – Setor de tecnologia. Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2004.
- GOMES, L. F. A.M. et al.. **Tomada de Decisões em Cenários Complexos**. São Paulo: Pioneira, 2004.
- JESEN. R. E. An Alternative Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures. **Journal of Mathematical Psychology**, v. 28, n 3, p. 317-332, 1984.
- SAATY, T. L. A. **Scaling method for priorities in hierarchical structures**. Journal of mathematical psychology, 15, p. 234-281, 1977.
- ROSOT, M. A., BARCZAK, C. L. e COSTA, D. M. B. **Análise da vulnerabilidade do manguezal do Itacorubi à ações antrópicas utilizando imagens de satélite e técnicas de geoprocessamento**. Florianópolis. Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. 2000. Disponível em: <<http://www.geodesia.ufsc.br>>. 2003.
- SILVA, J. X., ZAIDAN, R. T. **Geoprocessamento & análise ambiental: Aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p. 143-177, 2004.
- TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e aplicação**. 3ª ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2004.