

Susceptibilidade a erosão utilizando o processo de análise hierárquica (AHP) e sistema de informação geográfica

Erosion susceptibility using the hierarchical analysis process (AHP) and geographic information system

Willian Geraldo da Silva¹; Vinícius Morais Machado²; Manuel Victor Silva Chagas³; William Menezes Ferreira Flores⁴

¹ Aluno do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária do Centro Universitário de Patos de Minas - UNIPAM.
E-mail: williang18@hotmail.com

² Professor no curso de Engenharia Ambiental e Sanitária do Centro Universitário de Patos de Minas - UNIPAM. Mestre em Ciências Florestais. Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM). Campus Diamantina – MG.

³ Engenheiro Ambiental e Sanitarista. Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho. Centro Universitário de Patos de Minas – UNIPAM.

⁴ Engenheiro Ambiental e Sanitarista. Especialista em Gestão Licenciamento e Auditoria Ambiental. Universidade Norte de Paraná - UNOPAR.

Resumo: A erosão é uma das maiores causas de depauperamento dos solos no mundo, causando a perda de produtividade, o avanço das fronteiras agrícolas, o assoreamento e a contaminação dos corpos d'água e a perda da biodiversidade. O presente estudo tem como objetivo identificar áreas sujeitas à susceptibilidade erosiva na sub-bacia do Córrego do Sapé, por meio do uso de técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto. A área de estudo localiza-se no município de Lagoa Formosa – MG, na mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, Estado de Minas Gerais, entre as coordenadas geográficas 46°27' e 46°33'30" de longitude, e entre 18°32' e 18°35' de latitude, possuindo uma área de aproximadamente 2.745,00 hectares. Os mapas de precipitação pluviométrica, pedológico, uso e ocupação do solo e declividade foram elaborados no ArcGis 10.3 e sobrepostos após a determinação dos pesos estatísticos ponderados por meio do método AHP, atribuindo notas aos atributos das classes, sendo que, quanto maior susceptibilidade à erosão o atributo apresentar, maior será o seu peso. Com a elaboração do mapa de susceptibilidade erosiva da sub-bacia, foi possível visualizar espacialmente as áreas que necessitam de melhor planejamento, visando à conservação dos recursos ambientais.

Palavras-chave: Geoprocessamento. Análise multicritério. Sub-bacia Sapé.

Abstract: Erosion is one of the major causes of land depletion in the world, causing loss of productivity, the advancement of agricultural frontiers, silting up and contamination of water

bodies, and the loss of biodiversity. This study aims to identify areas subject to erosive susceptibility in the sub-basin of the Sapé Stream, through the use of GIS and remote sensing techniques. The study area is located in Lagoa Formosa - MG in the In the mesoregion of the Triângulo Mineiro and Alto Paranaíba, State of Minas Gerais, between the geographical coordinates $46^{\circ} 27'$ and $46^{\circ} 33'30''$ longitude, and between $18^{\circ} 32'$ and $18^{\circ} 35'$ latitude, with an area of approximately 2745.00 hectares. The pluviometric maps, pedological maps, land use maps, and slope maps were elaborated in ArcGis 10.3 and overlapped after the determination of the weighted statistical weights by means of the AHP method, assigning scores to the attributes of the classes, being that, the greater susceptibility to erosion the attribute presents, the greater its weight. With the elaboration of the map of erosive susceptibility of the sub-basin, it was possible to visualize the areas that need better planning, aiming at the conservation of environmental resources.

Keywords: Geoprocessing. Multi-criteria analysis. Sub-basin Sapé.

Introdução

As questões ambientais estão entre as mais importantes com as quais tomadores de decisões se deparam hoje em dia, e sua análise e compreensão requerem uma elucubração sobre os valores e ideais humanos adotados até o momento, sobretudo no que diz respeito à relação homem/natureza.

Diversos impactos podem ser observados em consequência da ação antrópica nas paisagens naturais, entre eles: a supressão da vegetação natural e a crescente impermeabilização da área urbana que possibilitam a ocorrência de erosão das encostas. A erosão é um fenômeno natural que ocorre constantemente na superfície terrestre, sendo definida pelo transporte, deslocamento e deposição contínua de partículas do solo de um determinado lugar para outro (MAGALHÃES *et al.*, 2012).

Para tanto, cada vez mais pesquisadores desenvolvem metodologias para estimar a perda de solo em diversos locais experimentais distintos. Uma das ferramentas que vem sendo utilizada com bastante frequência é a modelagem de dados, associando tipos de solo, declividade e uso e ocupação da terra, por meio de ferramentas computacionais auxiliadas pelos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e Sensoriamento Remoto.

Para sintetizar as características ambientais, a utilização do SIG é fundamental, pois integra um grande número de variáveis simultaneamente, de forma a produzir informações intermediárias e permitirem a inclusão de novos dados, bem como a grande capacidade de manipulação dos dados armazenados.

Nesse sentido, uma proposta para manipular esse grande número de variáveis é o Processo Analítico Hierárquico (Analytical Hierarchical Process - AHP) de Saaty (1991), que possibilita ponderar e qualificar a importância relativa de cada variável. Para Prochmann (2014), a técnica é baseada na lógica da comparação aos pares em relação a uma meta ou critério. Tal processo permite organizar, avaliar a importância relativa de cada variável e medir a consistência dos julgamentos. Dessa forma, é possível diminuir a subjetividade na hierarquização.

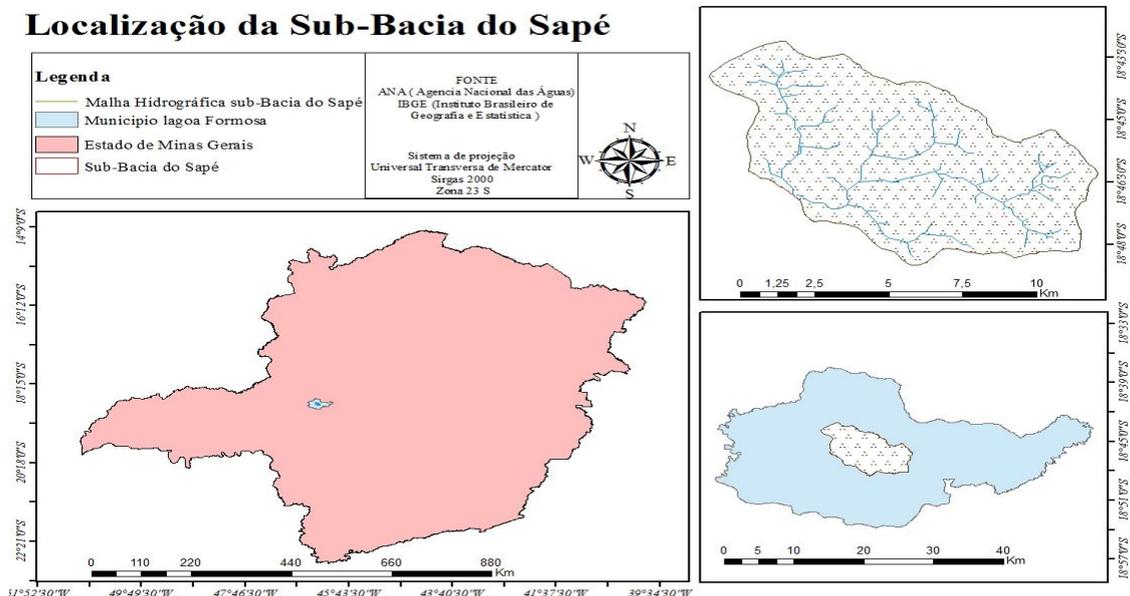
Assim, o trabalho propõe construir um modelo otimizado e eficaz para prospectar áreas mais susceptíveis à erosão, utilizando a análise multicritério integrada

em SIG, recorrendo ao método Analytic Hierarchy Process (AHP), implementado ao software ArcGIS 10.3, na sub-bacia hidrográfica do Córrego do Sapé, localizada no município de Lagoa Formosa/MG.

Material e métodos

O estudo foi desenvolvido na sub-bacia hidrográfica do Córrego do Sapé, localizada na porção leste do município de Lagoa Formosa, mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba, oeste do estado de Minas Gerais. Encontra-se nos domínios da bacia hidrográfica do Rio Paranaíba, situada entre as coordenadas geográficas 18° 46' 51", latitude Sul e a 46° 22' 57", longitude Oeste. A sub-bacia possui uma extensão territorial de, aproximadamente, 80,42 km² (Figura 1).

Figura 1 – Localização da Sub-Bacia Hidrográfica do Córrego do Sapé



Procedimentos metodológicos

Toda a manipulação dos dados e a elaboração de mapas foram feitas por meio do software ARCGIS 10.3 e suas extensões, versão de teste disponibilizada no site da ESRI (*Environmental Systems Research Institute*).

Para almejar o objetivo do trabalho, foram necessárias etapas intermediárias que forneceram a base para o produto final. Entre os produtos intermediários, têm-se os mapas de declividade, tipologia dos solos, precipitação pluviométrica e uso e ocupação do solo. Outra etapa intermediária fundamental foi a classificação dos mapas gerados a partir da metodologia de Análise Hierárquica (AHP).

Declividade

O mapa de declividade foi gerado por meio das imagens de entrada que representam o MDE (Modelo Digital de Elevação), obtidas a partir da iniciativa TOPODATA-INPE, que oferece dados das variáveis geomorfométricas locais, derivadas de dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) articulados a partir da folha topográfica do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) SE-23Y-B, em escala 1:250.000 e com resolução espacial de 90 metros, disponibilizada pela EMBRAPA Monitoramento por Satélite (EMBRAPA, 2006).

Tipologia de solos

Para o levantamento da tipologia de solos, foram utilizadas as bases de dados disponíveis no SIG Geominas 2011, trabalho desenvolvido pelo Departamento de Informática (DPI) da Universidade Federal de Viçosa (UFV).

Mapa de uso e ocupação do solo

Para confecção do mapa, foi utilizado um mosaico com imagens de alta resolução do Google Earth Pro datadas, em 22/01/2016. Essa versão permite que as imagens sejam salvas com qualidade superior (4800 pixel). As imagens foram salvas no formato bitmap e, posteriormente, foram convertidas, no ambiente SIG, para o formato *Raster*, para georreferenciamento e correções. As mesmas foram classificadas pelo método supervisionado, caracterizada por um conhecimento prévio do analista sobre a área de estudo (fotointerpretação, análise de fotos e mapas etc.).

Mapa de precipitação pluviométrica

O mapa de pluviometria foi elaborado de acordo com os levantamentos históricos meteorológicos sobre as chuvas dos últimos 30 anos disponíveis no banco de dados da ANA (2015), apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados de Estações Pluviométricas no entorno da área de estudo

ID	Município	Estação	Operadora	Código da Estação	X	Y	Precipitação (mm)
1	Tiros	Tiros	CPRM	01845014	-18,7	46,465	1210,47
2	Guimarânia	Guimarânia	CPRM	01846004	-18,85	46,729	1139,58
3	Patos de Minas	Santana de Patos	ANA	01846007	-18,83	46,275	1229,73
4	Patos de Minas	Leal de Minas	ANA	01846017	-18,77	-46-48	1143,03
5	Patos de Minas	Major Porto	ANA	01846003	-18,61	-46,18	1269,60
6	Conquista	Conquista	ANA	01947002	-18,72	46,304	1235,07

O procedimento realizado para a elaboração do mapa de precipitação é dado por duas etapas: a organização dos dados das estações climatológicas, adicionando esses dados no software, seguido da interpolação dos dados. Essa interpolação foi realizada pela ferramenta IDW (Inverse Distance Weighting), disponível no software ArcGIS versão 10.3, por meio da extensão Spatial Analyst Tools.

Analytic Hierarchy Process (AHP)

A nota definida para o atributo da classe segue uma classificação de importância no episódio de erodibilidade, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Notas adotadas para reclassificação das variáveis

Grau de Erodibilidade	Intervalo de Classe
Muito Baixa	1
Baixa	2
Média	3
Alta	4
Muito Alta	5

A próxima etapa do procedimento foi baseada na relevância dos critérios estabelecidos, em que os mesmos foram comparados entre si. A definição das importâncias relativas aos atributos no processo de suscetibilidade à erosão foi segundo o que recomendam Freitas *et al.* (2012), Bertoni e Neto (2008) e Fushita *et al.* (2011), além do conhecimento das condições naturais da sub-bacia. A matriz para cruzamento dos critérios pode ser observada na Tabela 3.

Tabela 3 – Matriz de comparação pareada – Método AHP

Fatores	Precipitação	Pedologia	Uso do Solo	Declividade
Precipitação	1	1/3	1/5	1/7
Pedologia	3	3	1/3	1/5
Uso do Solo	5	5	1	1/3
Declividade	7	7	3	1

Essa matriz determina o quanto o critério da coluna esquerda é mais importante em relação a cada critério correspondente na linha superior e, quando confrontado com ele mesmo, a única possibilidade de valor será 1.

Para confirmar se os pesos estatísticos calculados são aceitáveis, calculou-se a razão de consistência (RC) que, de acordo com Saaty (1991), deve apresentar valor menor do que 0,10 (10%), e é obtida pela seguinte equação:

$$Rc = \frac{IC}{IR}$$

Em que:

IC é o Índice de consistência;

IR é o índice de consistência randômico (Tabela 4)

O IC mede o quanto o autovalor máximo ($\lambda_{\text{máx}}$) da matriz se afasta da ordem (n) dessa matriz e pode ser calculado pela equação a seguir:

$$IC = \frac{\lambda_{\text{máx}} - n}{n - 1}$$

Quanto mais próximo o autovalor máximo for de n, maior a coerência das comparações. O IR (Tabela 4) representa um valor que foi obtido experimentalmente com base na escala fundamental proposta por Saaty (1991).

Tabela 4 – Índice de consistência randômico

Ordem	3	4	5	6	7	8	9	10
IR	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fonte: Adaptado de Saaty (1991).

Mapa de Erodibilidade por meio do geoprocessamento

O mapa de suscetibilidade erosiva foi confeccionado com base nas quatro variáveis geradas anteriormente: Precipitação Pluviométrica, Pedologia, Uso e Ocupação do Solo e Declividade. Para o cálculo, foi aplicado um modelo matemático expresso pela equação a seguir, atribuindo os pesos estatísticos calculados e verificados anteriormente, com as variáveis já reclassificadas de acordo com seu grau de influência no evento.

$$\text{Susceptibilidade Erosiva} = \text{PrePluv} * 0,06 + \text{Pedol} * 0,12 + \text{Uso} * 0,26 + \text{Decliv} * 0,56$$

Em que:

PrePluv = Precipitação Pluviométrica

Pedol = Pedologia

Uso = Uso e Ocupação do Solo

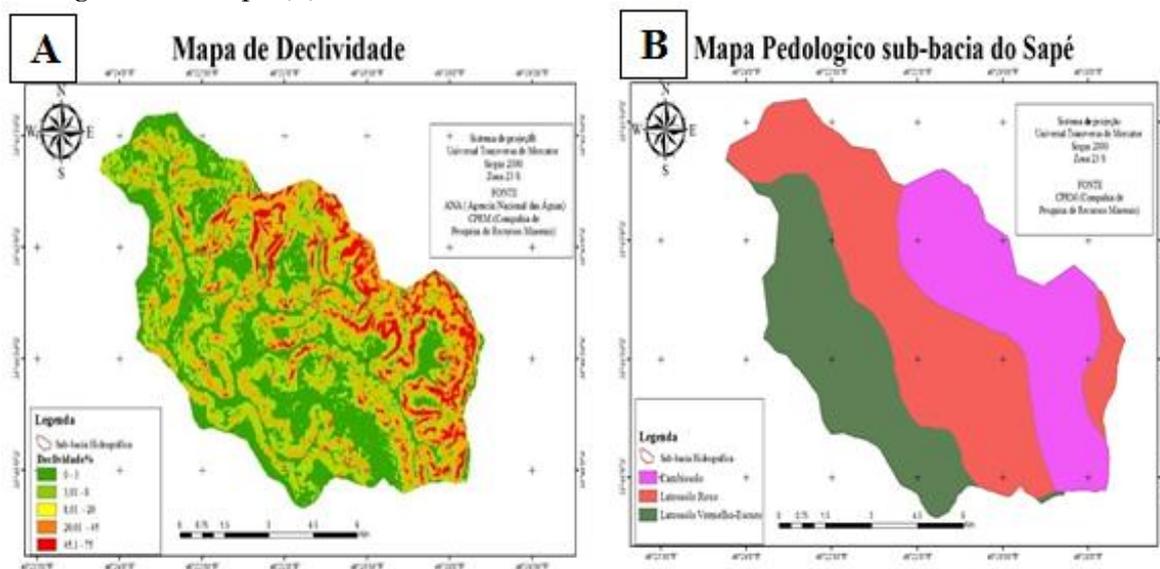
Decliv = Declividade

Para se realizar a álgebra de mapas, as variáveis foram padronizadas quanto ao formato e tamanho de pixels. A classificação pedológica e uso e ocupação do solo foram gerados como vetores, sendo necessária sua conversão para o formato matricial. A conversão foi realizada no ambiente SIG (ArcGis 10.3). Após a uniformização das variáveis e definição de notas dos atributos das classes, todos os mapas foram reclassificados individualmente no software supracitado, de acordo com as notas atribuídas anteriormente. De posse de todos esses dados e com os pesos de cada fator, cada camada de dado ou *layer* foi sobreposta uma sobre as outras para se efetuar os cálculos entre elas. Contudo, antes de se efetuar os cálculos entre os resultados finais dos fatores, foi necessário aplicar a operação *Reclass* entre essas camadas, pois o modelo desenvolvido só aceita valores inteiros. Com as variáveis já reclassificadas de acordo com seu grau de influência no evento, a sobreposição destas finalmente denomina-se as áreas susceptíveis a erosão.

Resultados e discussão

Seguindo procedimentos metodológicos, obtiveram-se os mapas de declividade (Figura 2 A) e tipologia dos solos (Figura 2 B) para a sub-bacia do Sapé.

Figura 2 – Mapa de índices de declividade (A), Mapa Pedológico da sub-bacia hidrográfica do Sapé (B)



Na classificação da declividade, observa-se a predominância da classe 3,08 a 8%, assim mostrando-se ser uma sub-bacia suave e ondulada. De acordo com Amorim *et al.* (2001), quanto maior a declividade, maior a velocidade de escoamento, maior o volume de sedimentos carreados e, assim, maior a erosão. Baseando-se nesses argumentos, foram definidas as ponderações, apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Notas para a variável declividade

Declividade (%)	Intervalo de Classe
0 - 3	1
3,01 - 8	2
8,01 - 20	3
20,01 - 45	4
45,1 - 75	5

As maiores declividades, que favorecem o processo erosivo, receberam os maiores pesos na ponderação realizada (máximo = peso 5).

Para Fushita *et al.* (2011), os Latossolos argilosos são os de menor erodibilidade, pois, além de serem bastante profundos, são compostos em grande parte por argilas, auferindo, assim, características de maiores permeabilidades. As notas dos solos estão apresentadas na tabela a seguir.

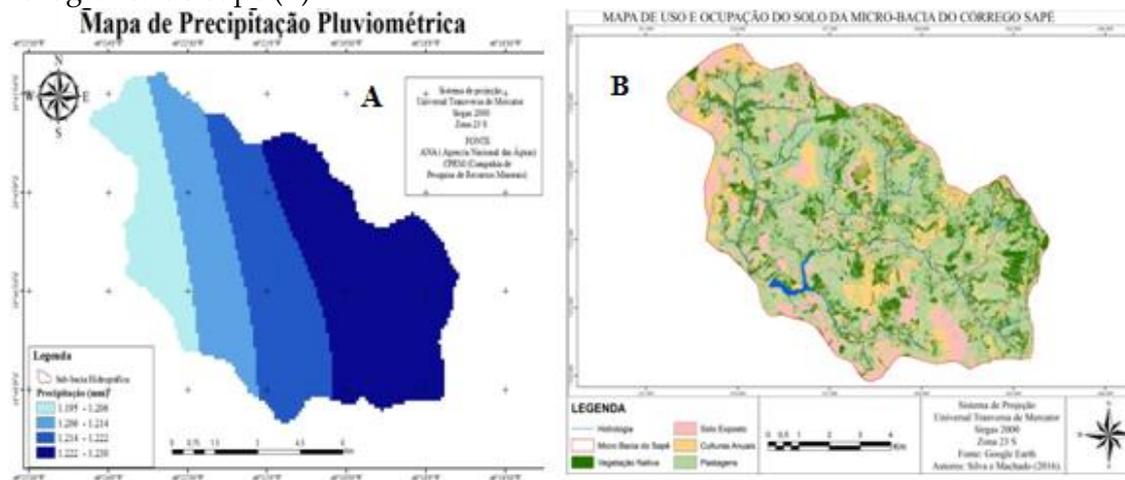
Tabela 6 – Notas adotadas para a variável pedologia

Pedologia	Nota
<i>Latossolo Vermelho escuro</i>	2
<i>Latossolo rocho</i>	3
<i>Cambissolo</i>	4

Aos cambissolos foi atribuída maior nota em relação às outras duas classes pedológicas em virtude de serem identificados em sua maioria no relevo fortemente ondulado (20-45%) e montanhoso e por serem mais rasos, fatores que inviabilizam a infiltração da água, estando, assim, mais susceptíveis às enxurradas, favorecendo a erosão.

Seguindo procedimentos metodológicos, obtiveram-se os mapas de precipitação pluviométrica (Figura 3 A) e de usos do solo (Figura 3 B) para a sub-bacia do Sapé.

Figura 3 – Mapa de Precipitação Pluviométrica (A), Mapa Uso do solo da sub-bacia hidrográfica do Sapé (B)



O mapa pluviométrico demonstra que as maiores precipitações da sub-bacia se encontram na região sudeste. O fator chuva é um índice numérico que expressa a capacidade da chuva, em dada localidade, de causar erosão em uma área sem proteção. Partindo desse pressuposto, foram atribuídas as maiores notas para as maiores precipitações (Tabela 7).

Tabela 7 – Notas adotadas para a variável Precipitação pluviométrica

Precipitação (mm)	Nota
1195	2
1206	3
1222	4
1230	5

Os diferentes usos do solo da área de estudo podem ser visualizados na Tabela 8. As regiões de mata nativa e várzea apresentam menor potencial de erosão devido à proteção que o uso do solo oferece e, por esse motivo, receberam menor peso. Já a região de campos e pastagem corresponde a zonas com potencial de médio a alta, devido à concentração de fluxo pelo tipo de manejo e pela exposição do solo feita por essas práticas. Dessa maneira, adotaram-se os seguintes padrões de ponderação (Tabela 8):

Tabela 8 – Notas adotadas para a variável Uso do solo

Uso do Solo	Nota
Vegetação Nativa	1
Pastagem	2
Culturas Anuais	3
Solo exposto	4

A cobertura vegetal é a defesa natural de um terreno contra a erosão. O efeito da vegetação propicia a proteção direta contra as gotas de chuva, dispersão da água, diminuição da velocidade de escoamento da enxurrada pelo atrito na superfície (AMORIM, 2001). Ao solo exposto, foi atribuída maior nota, o solo desnudo fica exposto aos intemperes, sendo desagregado com maior facilidade e, conseqüentemente, mais susceptível à erosão.

A ponderação feita neste trabalho mostrou que áreas ocupadas por pastagem apresentam baixa fragilidade. Entretanto, segundo Fushita *et al.* (2011), é importante ressaltar que há riscos pontuais nessas áreas em virtude do pisoteamento do gado em conjunto com o escoamento superficial.

Mapa de Erodibilidade pelo método AHP

A partir da metodologia proposta para a determinação das áreas mais vulneráveis à suscetibilidade erosiva na sub-Bacia do Córrego do Sapé, aplicando técnicas de geoprocessamento e análise AHP, foi plausível avaliar as extensões mais frágeis a sofrer erosão. O método AHP utilizado para a determinação dos pesos estatísticos com base nos atributos das variáveis (Tabela 8) para confeccionar o mapa final foram admitidos a partir dos resultados obtidos no cálculo da razão de consistência, a qual foi inferior a 10%, valor limite permitido. Os resultados dos cálculos dos pesos estatísticos (P_n) de cada fator contribuinte são mostrados na tabela a seguir.

Tabela 9 – Comparação pareada e ponderações dos principais componentes ambientais que interferem na *susceptibilidade* à erosão da sub-bacia hidrográfica do Sapé pelo AHP

Fatores	Precipitação	Pedologia	Uso do Solo	Declividade	Peso de importância calculado
Precipitação	1	0,33	0,2	0,14	0,055022
Pedologia	3	1	0,33	0,2	0,117786
Uso do Solo	5	3	1	0,33	0,263378
Declividade	7	5	3	1	0,563813

Cálculo do Índice de Consistência:

$$IC = \frac{4,1185 - 4}{4-1} = 0,0395$$

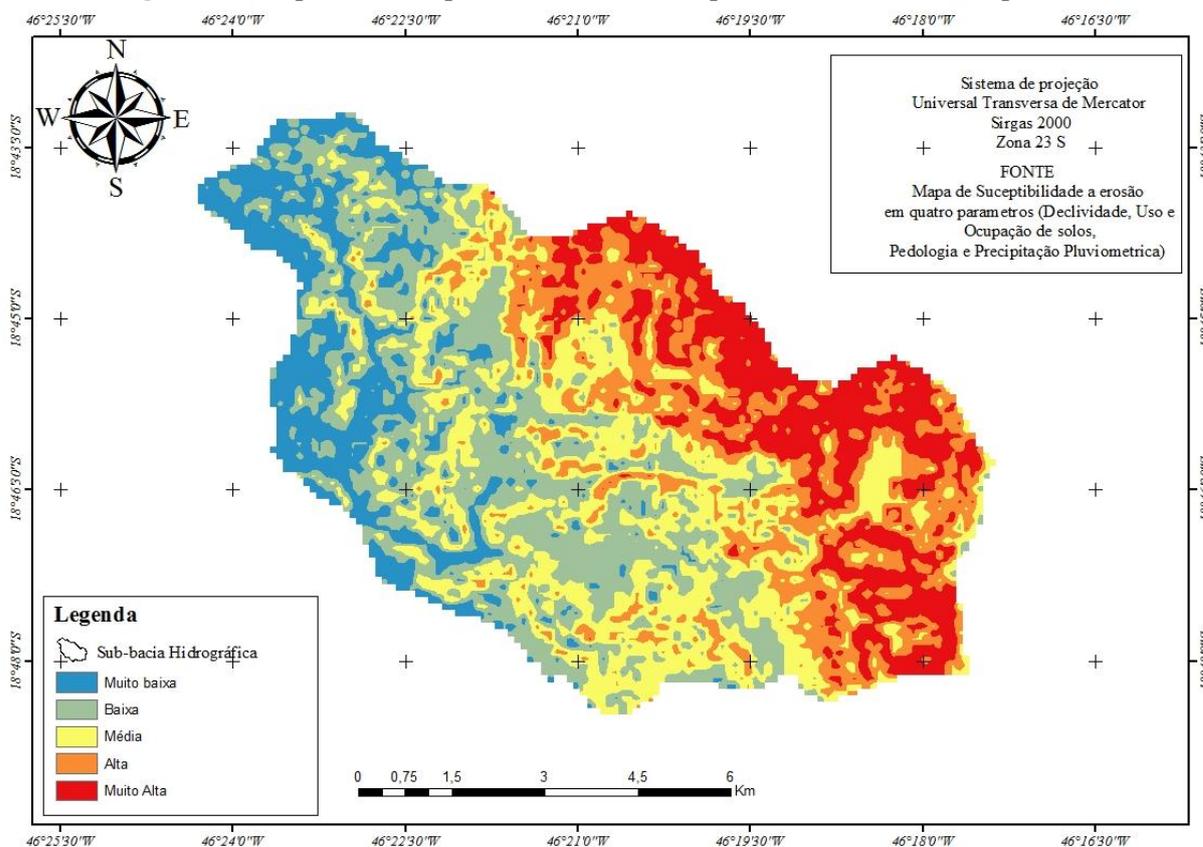
Ao fim do processo anterior, a verificação dos pesos tornou-se finalizada, já que não ultrapassaram a razão de consistência 0,1.

Equação Razão consistência:

$$Rc = \frac{0,0395}{0,9} = 0,438$$

O resultado da álgebra de mapas, de acordo com as variáveis levantadas, foi o mapa de suscetibilidade erosiva. O produto obtido foi reclassificado em cinco intervalos idênticos, adequando a simbologia às classes pré-definidas, como pode ser observado no mapa a seguir.

Figura 4 – Mapa de susceptibilidade a erosão para a sub-bacia do Sapé



A partir do mapa obtido, é possível verificar os locais com elevada probabilidade de ocorrência de erosão. A predominância foi da classe de média susceptibilidade erosiva, em que a combinação dos fatores obedeceu a uma mediana, justificando maior parte da sub-bacia inserida nessa classe.

Como pode ser observado na Figura 4, os locais com susceptibilidade alta a erosão confrontaram com características, como elevadas declividades, ou incipiente e embasamento geológico que propicia risco à erosão, que influenciaram demasiadamente os valores de vulnerabilidade. A contribuição desses fatores foi relativamente grande para essa classe e o peso recebido na matriz de correlação foi determinante para a predominância nesta classe de risco à erosão.

A classe de susceptibilidade a erosão baixa se mostrou mais influenciada pelo fator unidade de mapeamento com os componentes Latossolo vermelho escuro e Latossolo roxo, seguido da ocupação com pastagem a qual foi considerada com potencial baixo.

Somadas as classes de susceptibilidade média, alta e muito alta, 67,26 % da sub-bacia possui grau relevante de instabilidade à erosão (Figura 4). Assim, os usos do solo aceleraram os processos erosivos e promoveram impactos ambientais negativos diretos e indiretos.

A partir do produto de erodibilidade, é possível identificar com maior precisão o grau de influência de cada variável na composição do episódio de susceptibilidade erosiva na área de estudo e, ainda, pontuar os locais de maior potencial erosivo da Sub-

Bacia do Sapé, bem como diagnosticar quais as áreas dentro de uma bacia hidrográfica requerem maior atenção quanto ao manejo empregado, visando a melhor interação entre o homem e o meio ambiente, dando ênfase ao uso mais racional dos recursos naturais e evitando seu depauperamento qualiquantitativo.

Conclusão

Este estudo permitiu comprovar o grande potencial do SIG na integração de dados geocodificados, decorrentes da possibilidade de automatização de cruzamentos complexos de informações, é a elevada precisão do produto final e a economia de tempo em relação aos métodos tradicionais de análise.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS - ANA. *Hidroweb: Sistemas de informações hidrológicas*. Brasília, 2015.

AMORIM, R. S. S.; DEMETRIUS, D. D.; PRUSKI, F. F.; MATOS, A. T. Influência da Declividade do solo e da energia cinética da chuva simuladas no processo de erosão em sulcos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.5, n.1, p.124-130, 2001.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. *Conservação do Solo*. 6. ed. São Paulo: Ícone, 2008. 355 p.

CPRM. *Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais*, 1998. Carta Geológica Guaratinguetá. São Paulo: Superintendência Regional CPRM. 1 mapa. Escala 1: 250.000

EMBRAPA. *Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária*, 2006. Sistema brasileiro de classificação de solos. 1 ed. CNPS - Centro Nacional de Pesquisas de Solos, Rio de Janeiro, 2006.

FREITAS, D.A.F, SILVA, M.L.N., CASTRO, N.E.A., CARDOSO, D.P., DIAS, A.C., CARVALHO, G.J., 2012. *Modelagem da proteção do solo por plantas de cobertura no sul de Minas Gerais*. *Agroambiente* 6, 117-123, 2012.

FUSHITA, A.T., CAMARGO-BORTOLIN, L.H.G., ARANTES, E.M., MOREIRA, M.A.A., CANÇADO, C.J., LORANDI, R., 2011. Fragilidade ambiental associada ao risco potencial de erosão de uma área da região geoeconômica médio Mogi Guaçu superior (SP). *Revista Brasileira de Cartografia* 63, 609-618, 2011.

MAGALHÃES, I. A. L. NERY, C. V. ZANETTI, S. S. PENA, F. E. R. AVELINO, R. A. A SANTOS, A. R. *Uso de geotecnologias para estimativa de perda solo e identificação das áreas susceptíveis a erosão laminar na sub-bacia hidrográfica do rio vieira, município de Montes Claros, MG*. *Cadernos de Geociências*, v. 9, n. 2, p. 74-84, 2012.

PROCHMANN, J. R. *Análise espacial da susceptibilidade a inundações na bacia hidrográfica do córrego grande, Florianópolis – SC*. 2014. 88 f. Monografia (Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Curso de graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

SAATY, T.S. *Método de análise hierárquica*. São Paulo: McGraw-Hill/Makron Books, 1991. 367 p.