

USO INTEGRADO DO MODELO SHALSTAB E ANÁLISE MULTICRITÉRIO PARA MAPEAMENTO DE ÁREAS SUSCEPTÍVEIS AOS ESCORREGAMENTOS DE TERRA NA BACIA DO RIBEIRÃO SÃO BARTOLOMEU, VIÇOSA - MG

*Integrated use of SHALSTAB Model and Multi-Criteria Evaluation for Mapping
Landslide Susceptibility Areas in São Bartolomeu Stream basin, Viçosa - MG*

**Darlan Miranda Nunes¹, Clívia Dias Coelho², Aline Bezerra de Souza³,
Maria Lúcia Calijuri¹ & Afonso de Paula dos Santos¹**

¹Universidade Federal de Viçosa - UFV

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil / Departamento de Engenharia Civil
Avenida P. H. Rolfs, s/n, Campus Universitário, 36570-000, Viçosa, MG, Brasil
{darlan.nunes, calijuri, afonso.santos}@ufv.br

²Universidade Federal de Viçosa - UFV

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola
Avenida P. H. Rolfs, s/n, Campus Universitário, 36570-000, Viçosa, MG, Brasil
clivia.coelho@ufv.br

³Universidade Federal do Cariri - UFCA

Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional Sustentável - PRODER
Av. Ten. R. Rocha, s/n, Cidade Universitária, 63000-000, Juazeiro do Norte, CE, Brasil
aline.bezerra@ufca.br

Recebido em 5 de Outubro, 2015/ Aceito em 22 de Agosto, 2016

Received on October 5, 2015/ Accepted on August 22, 2016

RESUMO

O acelerado processo de urbanização aliado à carência de políticas públicas direcionadas a um planejamento eficiente tem propiciado a ocupação de áreas geotecnicamente instáveis, contribuindo para a ocorrência de desastres naturais, tais como os escorregamentos de terra, que afetam direta ou indiretamente a população situada no entorno das áreas de risco. O presente trabalho tem como objetivo utilizar o potencial dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para o mapeamento de áreas susceptíveis aos escorregamentos de terra utilizando o modelo determinístico Shallow Slope Stability Model (SHALSTAB) integrado com a Análise Multicritério (MCE) na Bacia do Ribeirão São Bartolomeu, localizada no município de Viçosa, estado de Minas Gerais, Brasil. A metodologia adotada no desenvolvimento deste trabalho, combina os resultados obtidos aplicando o modelo SHALSTAB para cada tipo de solo predominante na bacia (Latosolo, Cambissolo e Argissolo) como um dos fatores condicionantes aos escorregamentos, ponderado juntamente com os fatores uso e ocupação da terra, distância de vias e forma de vertentes na MCE. Utilizando-se a técnica de comparação pelos pares AHP, gerou-se um conjunto de pesos relativos para cada um dos fatores, posteriormente agregados nos procedimentos de Combinação Linear Ponderada (WLC) e Média Ponderada Ordenada (OWA). Foram realizados três cenários OWA com baixo, médio e alto risco, todos com alta compensação. Tomando pontos de ocorrência de escorregamentos notificados a Defesa Civil do município de Viçosa, verificou-se que o melhor cenário foi aquele de baixo risco e alta compensação (risco: 0,63 e compensação: 80%), pois maiores quantidades destes pontos

de ocorrência coincidiram com as áreas de alta e muito alta instabilidade, obtidas integrando o modelo SHALSTAB e MCE, diferentemente da aplicação do modelo SHALSTAB individual. Observou-se também que as classes de média, alta e muito alta instabilidade se localizam próximas ou em áreas urbanas e nos solos do tipo Latossolo. Com os resultados obtidos neste trabalho, foi possível demonstrar que a integração entre o modelo SHALSTAB e MCE possibilita mapear áreas susceptíveis aos escorregamentos de terra de maneira mais coerente com a realidade, pois permite levar em consideração fatores naturais em conjunto com as ações antrópicas, ambos diretamente relacionadas à ocorrência dos escorregamentos.

Palavras chaves: Suscetibilidade, Escorregamentos de Terra, Modelo SHASTAB, Análise Multicritério, SIG.

ABSTRACT

The accelerated process of urbanization coupled with lack of public policies directed toward efficient planning, has led to the occupation of geotechnically unstable areas, contributing to the occurrence of natural disasters, such as landslides, which directly or indirectly affect the population located around the risk areas. This paper aims to use the potential of Geographic Information System (GIS) for mapping landslide susceptibility areas using the deterministic model Shallow Slope Stability Model (SHALSTAB) integrated with Multi Criteria Evaluation (MCE) in São Bartolomeu stream basin, located in Viçosa municipality, Minas Gerais State, Brazil. The methodology adopted in this work combines the results obtained by the SHALSTAB model for each predominant soil type in the basin (Latosols, Argisols and Cambisols) as one of conditioning factors to landslides, weighted with the factors of land use/cover, distance from roads and slopes profile classes in the MCE. Using the technique of comparing by pairs AHP, it was generated a set of relative weights for each factor, subsequently aggregated in the procedures of Weighted Linear Combination (WLC) and Ordered Weighted Average (OWA). Three OWA scenarios were performed with low, medium and high risk, all with high compensation. Taking the landslides occurrence points reported to the Civil Defense Department of Viçosa, it was found that the best scenario was that of low risk and high compensation (risk: 0.63 and compensation: 80%), because most of this points were identified in the areas of high and very high instability, obtained by integration of SHALSTAB model and MCE, unlike the application of the SHALSTAB model individually. It was also observed that the classes of medium, high and very high instability are located near or in urban areas and in the Latosols soil type. With the results of this work, was possible showed that the integration between SHALSTAB model and MCE enable mapping landslides susceptibility areas in a more coherent way with the reality, because it allows taking into account natural factors and human activities, both directly related to the occurrence of landslides.

Keywords: Susceptibility, Landslides, SHALSTAB Model, Multi-Criteria Evaluation, GIS.

1. INTRODUÇÃO

Os escorregamentos de terra fazem parte dos processos de superfície da terra e podem ser considerados como um dos tipos de desastres naturais mais perigosos, presentes em áreas montanhosas e serranas, causando danos às propriedades e, sobretudo, perda de vidas humanas (TIEN BUI *et al.*, 2012).

A identificação e mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamentos de terra são procedimentos importantes aos órgãos de defesa civil, permitindo criar planos de prevenção e gerenciamento deste tipo de desastre o quanto antes, bem como possibilita a elaboração de mapas de risco, estimativa de produção de sedimentos, etc.

Segundo Tominaga *et al.* (2009) no Brasil os principais fenômenos relacionados a desastres naturais estão associados à dinâmica externa

terrestre, tais como, inundação e enchentes, escorregamentos (reconhecidos também por deslizamentos ou ainda movimentos de massa) de solos e/ou rochas e tempestades. Geralmente, suas ocorrências estão relacionadas aos períodos chuvosos.

Os escorregamentos de terra ocorrem quando a força da gravidade é maior que a força de resistência do solo ou rocha formadora da encosta. O equilíbrio entre essas duas forças pode ser alterado por circunstâncias tanto naturais quanto artificiais, embora os elementos que afetam os escorregamentos ou a estabilidade de uma encosta são numerosos e variados, além de que interação de formas complexas e muitas vezes sutis (VARNES, 1984).

Através dos métodos de previsão de áreas susceptíveis a escorregamentos aliados ao advento dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), o planejamento urbano passou a beneficiar-

se de importantes instrumentos que podem auxiliar a elaboração de mapeamentos de áreas susceptíveis a escorregamentos, possibilitando o gerenciamento deste tipo de desastre natural, entre outros.

Dentre os principais métodos recorrentes na literatura para o mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamentos, destacam-se os métodos heurísticos, estatísticos e determinísticos (VAN WESTEN *et al.*, 1997; GUZZETTI *et al.*, 1999; BARREDO *et al.*, 2000, entre outros).

Pelo método heurístico, normalmente a previsão de áreas susceptíveis aos escorregamentos são obtidas a partir da combinação de vários fatores que geram condições de instabilidade, aos quais são atribuídos pesos a partir da experiência adquirida pelo analista. Segundo Van Westen *et al.* (1997), a principal crítica a este método se concentra na subjetividade, uma vez que um especialista experiente decide o tipo e grau de riscos presentes na área em análise, utilizando um tipo de mapeamento, seja de forma direta ou indireta.

No mapeamento direto, o grau de risco é mapeado diretamente em campo ou determinado posteriormente aos trabalhos de campo tendo como base um mapa geomorfológico detalhado. A abordagem indireta baseia-se em técnicas de integração de dados, como por exemplo, a técnica de suporte à decisão AHP (Analytical Hierarchy Process), onde o analista realiza a ponderação de uma série de parâmetros do terreno e classes pertencentes a estes parâmetros (BARREDO *et al.*, 2000).

Os métodos estatísticos visam uma menor subjetividade nos mapeamentos de áreas susceptíveis, permitindo uma melhor replicabilidade. De acordo com Guzzetti *et al.* (1999), estes métodos se apoiam no princípio de que fatores condicionantes a instabilidade (uso do solo, vegetação, declividade, geomorfologia, etc.) e distribuição dos escorregamentos em certo local no passado podem deflagrar ali novas ocorrências de escorregamentos no futuro. Neste contexto, Van Westen (2000) cita que algumas metodologias utilizadas na combinação de séries de dados para a confecção de mapas de suscetibilidade de escorregamentos são a lógica fuzzy e aproximações Bayesianas. Fernandes *et al.* (2001) menciona que os critérios e regras de

combinação de dados têm como base os padrões mensurados a partir de observações de campo, sendo a disponibilidade de extensos bancos de dados sobre os processos as serem previstos, imprescindível.

Por fim, a abordagem determinística tem como base os modelos de estabilidade, que levam em consideração os processos e leis físicas naturais, quantificando os graus de risco em valores absolutos através do cálculo do fator de segurança (BARREDO *et al.*, 2000; Gomes *et al.*, 2008). Conforme Listo (2011), o fator de segurança expressa a razão entre a resistência e a tensão de cisalhamento, sendo necessário fornecer aos modelos dados de entrada, tais como, espessura da camada do solo, resistência do solo (coesão e ângulo de atrito interno), condições de poro-pressão, parâmetros topográficos, etc.

Como exemplo de modelos matemáticos preditivos que utilizam bases físicas na determinação de áreas susceptíveis a escorregamentos destacam-se o SHALSTAB (Shallow Slope Stability Model) (MONTGOMERY & DIETRICH, 1994), SINMAP (Stability Index Mapping) (PACK *et al.*, 1998), TRIGRS (Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Model) (BAUM *et al.*, 2002), entre outros.

Segundo Guzzetti *et al.* (1999), não há um consenso sobre os métodos ou o escopo para elaboração de mapeamentos de risco. Isso, devido a diferenças conceituais e operacionais, que incluem pressupostos subjacentes gerais, o tipo de unidade de mapeamento selecionado para a investigação, e as técnicas e ferramentas que favoreçam a análise e avaliação de riscos.

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo utilizar o potencial dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para o mapeamento de áreas susceptíveis aos escorregamentos de terra, através da integração entre o modelo determinístico SHALSTAB e a Análise Multicritério (MCE), na Bacia do Ribeirão São Bartolomeu, localizado no município de Viçosa, estado de Minas Gerais, Brasil.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item são apresentados os materiais empregues no desenvolvimento do trabalho, bem

como a metodologia utilizada para alcançar o objetivo almejado.

2.1 Área de Estudo

A área de estudo compreende a bacia do Ribeirão São Bartolomeu, situada no município

de Viçosa, Zona da Mata de Minas Gerais, compreendida entre as latitudes $20^{\circ}45'48''$ S a $20^{\circ}50'18''$ S e, entre as longitudes de $42^{\circ}50'36''$ W a $42^{\circ}54'11''$ W, ocupa uma área de aproximadamente 55 km² (Figura 1).

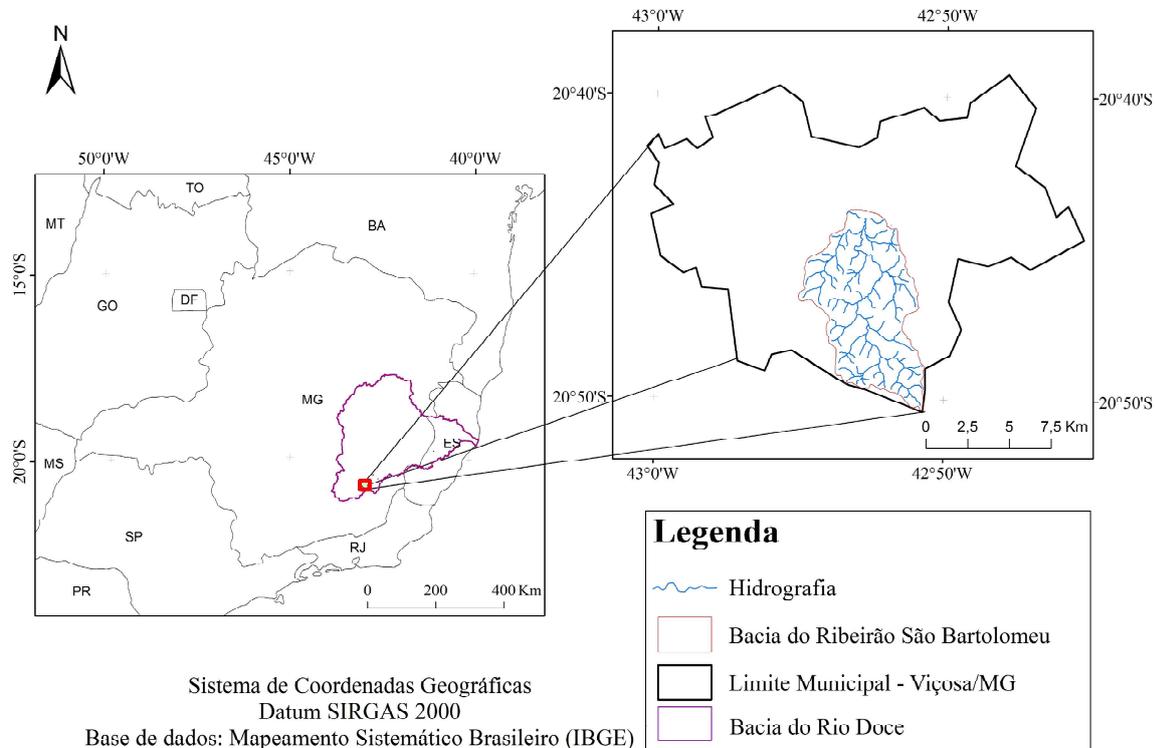


Fig. 1 - Mapa de localização da área de estudo.

Essa bacia hidrográfica é de grande importância para o fornecimento de água para a cidade de Viçosa. Ela vem sendo impactada ao longo dos anos com o crescimento urbano acelerado e as grandes transformações urbanísticas na cidade, muito devido à expansão dos centros de ensino presentes na região, que atuam como expressivos atrativos populacionais.

Com a ocupação das áreas mais adequadas e próximas da região central da cidade, aumentou-se significativamente a ocupação das áreas inadequadas nas margens dos mananciais e encostas com declives acentuados. Além disso, nas regiões centrais, a busca por investimentos imobiliários fez com que os grandes empreendimentos fossem construídos próximos ao leito dos rios e encostas inclinadas, desrespeitando leis urbanísticas e ambientais.

2.2 Materiais

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram utilizados os seguintes materiais:

- Mapa de tipos de solo predominantes na área de estudo (Latosolo, Argissolo e Cambissolo), disponível e fornecidos pelo Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa na escala de 1:50.000;
- Parâmetros geotécnicos (coesão efetiva, densidade do solo saturado, profundidade, ângulo de atrito interno e condutividade hidráulica) para cada tipo de solo, adquiridos de Luis (2000). Ressalta-se que estes parâmetros foram obtidos em laboratório através de amostras de solos coletadas in situ na região em estudo e são compatíveis com as classes de solo representadas ao nível de detalhe proporcionado pelo mapa de tipos de solo disponível.
- Dados cartográficos (escala 1:50.000), provenientes do Projeto Viçosa Digital, parceria público privada entre o Sistema Autônomo de Água e Esgoto do município (SAAE) e a empresa Iplanus Engenharia: hidrografia e eixo de logradouros e rodovias/estradas do município de Viçosa;

- Imagem de alta resolução do satélite Ikonos II, imageada em 2007 e ortorretificada (classe A, compatível com escala até 1:10.000), adquiridas no âmbito do projeto Plano de Segurança da Água da Universidade Federal de Viçosa (PSA-UFV): utilizada para obtenção do mapa de uso e ocupação da terra.

- Dados cartográficos referentes a curvas de nível com equidistância vertical de 5 metros (geradas por estereoscopia de pares de imagens de alta resolução do satélite Ikonos II), também provenientes do projeto PSA-UFV;

- Histórico de ocorrências relacionados aos escorregamentos de terra, notificados ao Departamento de Defesa Civil do Município de Viçosa-MG e identificados em campo por meio de receptor GPS, fornecidos por Caixeta et al. (2012).

A base de dados e as análises foram geradas nos softwares ArcGIS 10.1, ArcView 3.1 e IDRISI 17.0 Selva Edition.

2.3 O Modelo SHALSTAB

O modelo SHALSTAB, acrônimo de Shallow Slope Stability Model, desenvolvido a partir dos trabalhos de Montgomery e Dietrich (1994) e posteriormente implementado para

utilização em ambiente SIG (DIETRICH & MONTGOMERY, 1998), é um modelo matemático determinístico que visa determinar áreas susceptíveis à ocorrência de escorregamentos translacionais rasos. Tal modelo é resultante da combinação de dois modelos, um de estabilidade de encostas baseado no método do talude infinito e outro hidrológico (steady-state), este último baseado nos trabalhos de Beven e Kirkby (1979) e O’Loughlin (1986).

Através da combinação entre os modelos de estabilidade de encostas e modelos hidrológicos, são incorporados respectivamente os parâmetros topográficos (declividade e área de contribuição), obtidos a partir de um Modelo Digital de Terreno (MDT), e parâmetros geotécnicos (propriedades físicas do solo), tais como coesão, ângulo de atrito interno, condutividade hidráulica saturada, densidade e espessura do solo (MONTGOMERY & DIETRICH, 1994).

Conforme Oliveira (2009), os parâmetros topográficos, geotécnicos e também meteorológicos são combinados e apresentados sob a forma da razão “q/T”. O autor ainda apresenta esta relação, incluindo equações e variáveis envolvidas, através de uma visão esquemática de uso do modelo SHALSTAB (Figura 2).

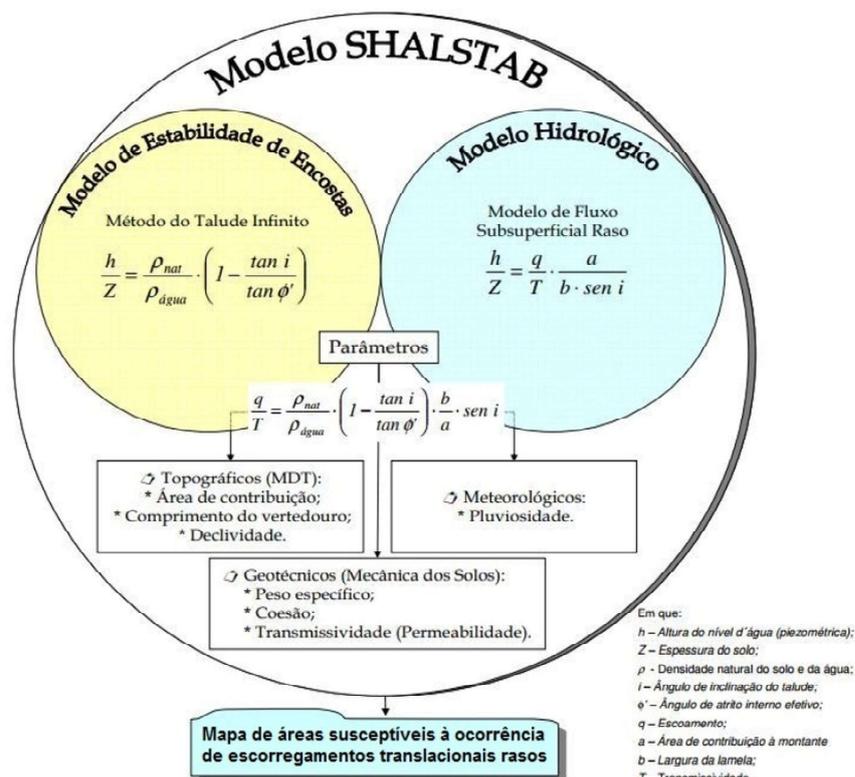


Fig. 2 - Visão geral do modelo SHALSTAB. Fonte: Adaptado de Oliveira (2009).

onde,

- q : parâmetro meteorológico, que equivale a chuva crítica necessária para a ruptura da encosta.

- T : transmissividade do solo saturado (produto entre a condutividade hidráulica saturada e a espessura do solo - Z);

- a , b e i : parâmetros topográficos (área de contribuição ou área drenada a montante, comprimento de contorno unitário e ângulo de inclinação do talude, respectivamente), provenientes de um Modelo Digital de Terreno; e

- ρ , f' : parâmetros geotécnicos (densidade natural do solo ou água e ângulo de atrito interno do

solo, respectivamente), oriundos de ensaios de laboratório de solos.

Através da aplicação do modelo SHALSTAB, obtém-se um mapa de suscetibilidade com sete classes de estabilidade (Tabela 1), resultantes da classificação dos valores de $\text{Log}(q/T)$, sendo que o logaritmo é aplicado em função dos baixos valores obtidos dessa razão, possibilitando a hierarquização das áreas susceptíveis à ocorrência de escorregamentos, indicando que, quanto maior for valor absoluto da razão hidrológica (q/T), maior será a instabilidade do local (LISTO, 2011; DIETRICH & MONTGOMERY, 1994).

Tabela 1: Classes de estabilidade do modelo SHALSTAB

Classes originais do modelo $\log(q/T)$	Classificação	Significado
Estável	Incondicionalmente estável e saturado	Áreas mais estáveis
$> -2,2$	Incondicionalmente estável e não saturado	
$-2,5 - -2,2$	Estável e não saturado	Áreas de média instabilidade
$-2,8 - -2,5$	Instável e não saturado	
$-3,1 - -2,8$	Instável e saturado	
$< -3,1$	Incondicionalmente instável e não saturado	Áreas mais instáveis
Incondicionalmente estável	Incondicionalmente instável e saturado	

Fonte: Listo (2011).

2.4 Análise Multicritério (MCE)

Dentre os métodos de tomada de decisão em um SIG, destaca-se como um dos mais importantes a Análise Multicritério, também conhecida como Avaliação por Múltiplos Critérios (Multi Criteria Evaluation - MCE).

De acordo com Eastman *et al.* (1995), na análise multicritério, o termo “Decisão” se refere a escolha de alternativas que podem representar diferentes ações, localizações, planos, hipóteses. Enquanto “Critério” representa uma condição que pode ser quantificada ou avaliada. Os critérios podem ser classificados em dois grupos: restrições ou fatores. Uma restrição é um critério que limita as alternativas em consideração na análise. Um fator é um critério que acentua ou diminui a aptidão de uma determinada alternativa para o objetivo em causa.

Na MCE, são possíveis a utilização de dois métodos: a análise booleana e a combinação ponderada. Para a primeira, todos os critérios

são combinados com a utilização de operadores lógicos de interseção (AND) e união (OR), gerando um resultado e/ou mapa booleano. Já o método de combinação ponderada, todos os critérios são normalizados de acordo com uma escala e agregados a partir de conjuntos de pesos. A Combinação Linear Ponderada (WLC) e a Média Ponderada Ordenada (OWA) são técnicas da combinação ponderada usadas para agregar os vários critérios (JIANG & EASTMAN, 2000; SANTOS *et al.*, 2012).

Eastman (2001) menciona que pela técnica WLC os critérios (fatores) são padronizados de acordo com uma escala numérica comum, os quais recebem pesos e são combinados por meio de média ponderada. O resultado é um mapa contínuo de adequabilidades. A técnica OWA diferencia-se da WLC principalmente pela presença de um segundo grupo de pesos, denominados de pesos de ordenação ou ainda pesos de compensação (YAGER, 1988). Calijuri

(2008) destaca que a ponderação indica a importância relativa de todos os fatores e controlam a compensação entre eles. O grau em que um fator pode compensar outro é determinado por seu fator ou compensação de peso.

Conforme SANTOS *et al.* (2012), na análise booleana existe a dificuldade relacionada à definição de limites (fronteiras) rígidos para os critérios, o que ocasiona a associação de incertezas e erros no resultado final. Por sua vez, na análise de combinação ponderada, é comum a utilização de técnicas de lógica fuzzy, que tem como objetivo a indefinição de fronteiras entre as classes, além da normalização dos vários critérios em uma mesma escala, o que pode reduzir significativamente a propagação de erros relacionado a um limite do critério. Para tanto várias funções fuzzy podem ser utilizadas, sendo as mais comuns: Sigmoidal, Linear e J Shaped.

Diversos trabalhos têm utilizado as técnicas de avaliação por múltiplos critérios para o mapeamento de áreas susceptíveis à escorregamentos, tais como, Barredo *et al.* (2000), Baptista (2005), Gorsevski *et al.* (2006), Gorsevski e Jankowski (2010), Feizizadeh e Blaschke (2013), Feizizadeh *et al.* (2013), Pourghasemi *et al.* (2014), entre outros.

2.5 Metodologia: integração entre modelo SHALSTAB e Análise Multicritério

Para o mapeamento das áreas susceptíveis aos escorregamentos na bacia do Ribeirão São Bartolomeu através da metodologia proposta (uso integrando do modelo SHALSTAB e MCE), foram considerados quatro fatores que desencadeiam os escorregamentos. O primeiro destes foi o resultado obtido pelo modelo SHALSTAB para cada tipo de solo presente na bacia (Latossolo, Argissolo e Cambissolo). Os demais fatores considerados foram o uso e

ocupação da terra, distância de rodovias e forma de vertentes (encostas).

Estes fatores foram utilizados como dados de entrada no módulo MCE (Multi Criteria Evaluation) do software IDRISI Selva e agregados pelos métodos de Combinação Linear Ponderada (WLC) e Média Ponderada Ordenada (OWA), este último preparado em três cenários distintos de “adequabilidades” (aptidão) aos escorregamentos.

Inicialmente, gerou-se o Modelo Digital de Terreno (MDT) com resolução espacial de 5 m, a partir das curvas de nível extraídas por estereoscopia de pares de imagens Ikonos II e delineado pelas linhas de hidrografia presentes na bacia, assim preservando a forma e estrutura da rede de drenagem. Para tanto, foi utilizado o interpolador Topo to Raster, implementado no software ArcGIS 10.1. Este interpolador foi desenvolvido por Hutchinson, o qual é baseado no algoritmo ANUDEM (Australian National University’s Digital Elevation Model) (HUTCHINSON *et al.*, 2009).

Após confecção do MDT, foi realizado o preenchimento das depressões espúrias (inconsistências presentes no modelo digital de terreno) e a obtenção das declividades, direção de fluxo e o fluxo acumulado para a área da bacia em estudo. Estas etapas foram realizadas através do próprio módulo do modelo SHALSTAB, executados em ambiente SIG utilizando o software ArcView 3.1. O modelo exige como entrada os parâmetros geotécnicos para cada tipo de solo, estes foram obtidos do trabalho de Luis (2000), que analisou em laboratório amostras de solos coletadas in situ na região em estudo. A Tabela 2 apresenta os parâmetros geotécnicos para os três tipos de solo presentes na área de estudo e que compõem a base de dados do mapa de tipos de solos.

Tabela 2: Parâmetros geotécnicos considerados no modelo SHALSTAB

Tipo de Solo	Coesão Efetiva (Kpa)	Densidade do Solo Saturado (Kg/m ³)	Profundidade do Solo (m)	Condutividade Hidráulica (m/d)	Ângulo de Atrito interno (°)
Latossolo	13,50	1581,58	3,00	1,14	21,70
Cambissolo	14,80	1420,46	0,50	2,48	42,00
Argissolo	10,64	1270,00	1,00	1,96	31,38

Fonte: Luis (2000).

O modelo SHALSTAB foi aplicado para cada tipo de solo separadamente, utilizando-se os correspondentes parâmetros geotécnicos e considerando toda a área da bacia coberta por somente aquele determinado tipo de solo, ou seja, considerou-se toda a área como latossolo, depois cambissolo e por fim argissolo. Posteriormente, de posse dos resultados obtidos pelo SHALSTAB (mapa de classes de estabilidade para cada tipo de solo), estes foram extraídos de forma compatível à extensão real que cada um destes solos ocupa na área de estudo. Com isso, foi realizado a operação união, pela qual obteve-se um único mapa com classes de estabilidade aos escorregamentos translacionais rasos para toda a área da bacia.

Para a avaliação por múltiplos critérios, foi aplicado a técnica de lógica Fuzzy aos diferentes fatores, atribuindo-se pesos variando de 0 a 255, a fim de padronização da escala de adequabilidade dos fatores, onde quanto maior o peso, mais propensa é determinada área a ocorrência de escorregamentos.

Assim, para tornar o resultado obtido pelo modelo SHALSTAB um fator para a MCE, foi necessário reclassificar as classes de estabilidade, atribuindo um peso de 0 (representa contribuição mínima para o escorregamento a 255 (contribuição máxima para o escorregamento), conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3: Pesos atribuídos as classes de estabilidade resultantes da aplicação do modelo SHALSTAB, com vista a obter um fator

Classificação	Peso
Incondicionalmente instável e saturado	255
Incondicionalmente instável e não saturado	200
Instável e saturado	150
Instável e não saturado	120
Estável e não saturado	90
Incondicionalmente estável e não saturado	60
Incondicionalmente estável e saturado	0

A partir de classificação manual (processo de interpretação visual e digitalização em tela/vetorização dos alvos identificados) da ortoimagem Ikonos II, delimitada na área de estudo, obteve-se a descrição do uso e ocupação

da terra definidos para as seguintes cinco classes genéricas: área edificada, solo exposto, plantio agrícola, pastagem e mata densa.

Da mesma forma, as classes de uso e ocupação da terra também foram normalizadas em intervalos de adequabilidade de 0 a 255, por procedimento similar ao caso anterior. Os pesos definidos para cada classe de uso e ocupação da terra são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Pesos utilizados para gerar o fator uso e ocupação da terra

Classificação	Peso
Área Edificada	200
Solo Exposto	190
Plantio Agrícola	150
Pastagem	120
Mata Densa	90

Conforme observado por Ayalew e Yamagishi (2005), é importante levar em consideração nas análises de áreas susceptíveis aos escorregamentos, a proximidade às rodovias e/ou estradas, uma vez que os cortes realizados nos taludes são geralmente locais de instabilidade induzida antropologicamente, atuando como uma barreira ou um corredor para escoamento de água, e dependendo da localização no relevo, geralmente é uma fonte para desencadear os escorregamentos.

Dessa forma, como outro fator, foi gerado a partir dos eixos de logradouros e rodovias (pavimentadas e não pavimentadas), presentes na área de estudo, um mapa de distâncias euclidianas desses eixos (denominado neste trabalho somente por distância de vias). Este procedimento foi realizado no software IDRISI Selva, sendo equivalente a uma operação de Buffer, porém utilizando uma função Fuzzy do tipo linear decrescente, com valor máximo de adequabilidade (255) para o intervalo de 0 a 20 metros de distância dos eixos e reduzindo ao valor mínimo (0) para distâncias superiores a 100 metros, ou seja, a susceptibilidade aos escorregamentos reduz à medida que se distancia das vias.

Também foi considerado como um fator condicionante aos escorregamentos a forma das vertentes ou encostas ou ainda curvaturas (que

podem ser categorizadas em retilíneas, côncavas e convexas). As quais segundo Pourghasemi *et al.* (2012), são importantes pois controlam a velocidade e distribuição do escoamento das águas, bem como o movimento de massas que deslizam pela encosta. Logo, é de se esperar que as formas planas produzam maior velocidade de escoamento das águas e deslocamento de massas, enquanto que as formas côncavas e convexas atenuam esse comportamento, sendo a superfície côncava, considerada como aquela que promove maior estabilidade da encosta.

Deste modo, partir do MDT foram obtidas as formas de vertentes, através do software ArcGIS 10.1, o qual retorna uma superfície com valores positivos para as formas convexas, negativos para as formas côncavas e valores nulos para as formas retilíneas. As classes representativas das formas de vertentes, também foram padronizadas em intervalos de adequabilidade de 0 a 255. Os pesos atribuídos a cada classe estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Pesos atribuídos para gerar o fator forma de vertentes

Forma de Vertentes	Peso
Côncava	100
Convexa	150
Retilíneas	200

De posse dos fatores condicionantes aos escorregamentos, considerados neste trabalho, foi aplicada a técnica de comparação par a par entre os fatores, ponderados de acordo com sua importância relativa. Neste procedimento, os valores de importância para os fatores foram obtidos a partir da matriz de comparação par a par pela técnica de Processo Hierárquico Analítico (AHP - Analytical Hierarchy Process) proposto por Saaty (1980). Por esta técnica, foram calculados um conjunto de pesos relativos para cada um dos fatores e a razão de consistência (CR - Consistency Ratio), conforme Tabela 6.

A partir dos pesos obtidos pelo método AHP, foram gerados quatro cenários de susceptibilidade aos escorregamentos. O primeiro cenário obtido baseou-se no procedimento de Combinação Linear Ponderada (WLC), onde cada fator padronizado foi multiplicado pelo seu peso correspondente, somados e a soma é dividida pelo número de fatores.

Como os fatores foram padronizados na escala de 0 a 255 e definido a importância relativa e respectivos pesos pela técnica AHP, os mesmos foram agregados de acordo com método OWA. Assim gerou-se outros três cenários, aplicando um segundo conjunto de pesos aos fatores, que permite controlar o nível total de compensação entre os fatores e o nível de risco na determinação da adequabilidade (CALIJURI, 2008).

Tabela 6: Matriz de comparação par a par da importância relativa dos fatores, conjunto de pesos obtidos pela técnica AHP

Fatores	Resultado do modelo SHALSTAB	Uso e ocupação da terra	Distância de vias	Forma de vertentes	Pesos
Resultado do modelo SHALSTAB	1	-	-	-	0,5462
Uso e ocupação da terra	1/3	1	-	-	0,2323
Distância de vias	1/4	1/2	1	-	0,1377
Forma de vertentes	1/5	1/3	1/2	1	0,0838
Razão de Consistência (CR)					0,01

Foram gerados cenários de médio risco (OWA1), alto risco (OWA2) e baixo risco (OWA3), todos com alta compensação. O conjunto de pesos definidos para estes três cenários são apresentados na Tabela 7.

Os cenários resultantes foram comparados com pontos de ocorrências de escorregamentos notificados ao Departamento de Defesa Civil

da Prefeitura Municipal de Viçosa-MG, identificados em campo por meio de receptor GPS, cedidos por Caixeta *et al.* (2012). O melhor cenário foi determinado pela maior coincidência entre os pontos coletados em campo referentes as ocorrências reais de escorregamentos e as áreas de maior susceptibilidade aos escorregamentos encontradas (maior valor de adequabilidade).

Tabela 7: Conjunto de pesos definidos para aplicação dos três cenários do método OWA

Ordem	Pesos		
	OWA1	OWA2	OWA3
1	0,33	0,15	0,38
2	0,18	0,20	0,27
3	0,16	0,27	0,20
4	0,33	0,38	0,15
Risco	0,50	0,37	0,63
Compensação	81%	80%	80%

Para o melhor cenário identificado, os valores contínuos de adequabilidade aos escorregamentos foram reclassificados em cinco classes de susceptibilidade (muita baixa, baixa,

moderada, alta e muito alta) por meio do método natural-breaks desenvolvido por Jenks (1989). Segundo Conforti *et al.* (2013), esta técnica identifica pontos de quebra, selecionando as classes que individualizam melhor o grupo de dados em valores semelhantes, maximizando as diferenças entre as classes.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Pela metodologia proposta neste trabalho, foi obtido em primeira instância, um mapa de susceptibilidade aos escorregamentos translacionais rasos para toda a área de estudo, resultante da aplicação do modelo SHALSTAB somente (Figura 3).

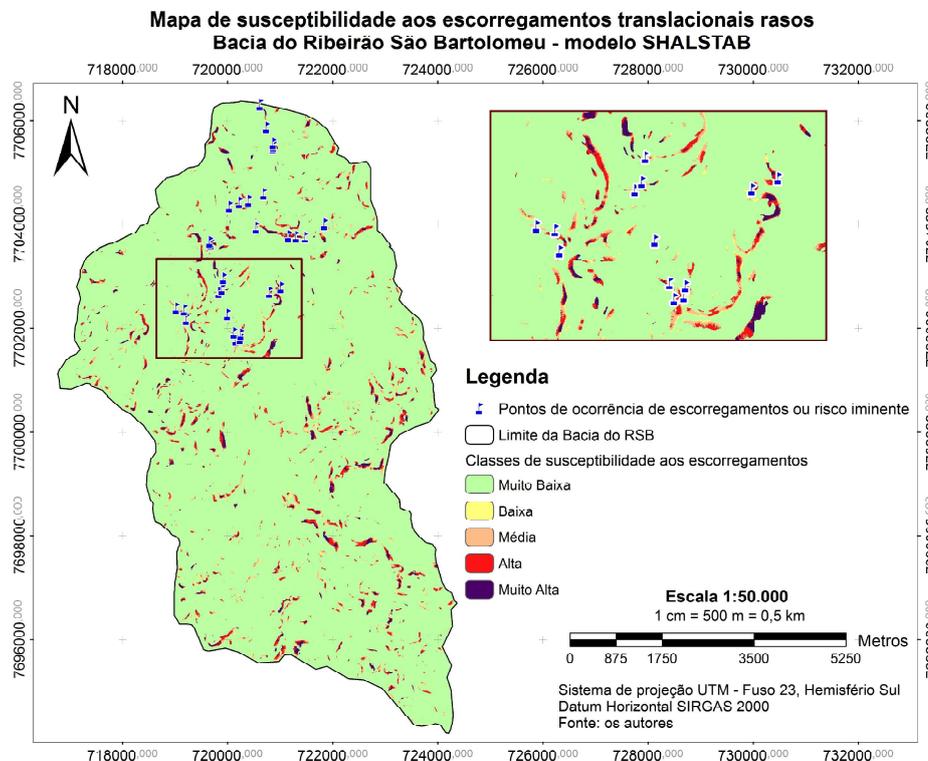


Fig. 3 - Mapa de susceptibilidade aos escorregamentos translacionais rasos resultante do modelo SHALSTAB.

Conforme descrito anteriormente, o resultado retornado pelo modelo SHALSTAB foi introduzido como um fator determinante à ocorrência dos escorregamentos, ponderado juntamente com os fatores uso e ocupação da terra, distância de vias e forma de vertentes na MCE.

Através da análise destes fatores pelas técnicas da MCE, foram obtidos quatro cenários de susceptibilidade aos escorregamentos para a

área de estudo, dos quais, um aplicando o método WLC e os outros três o método OWA.

Comparando-se a coincidência entre os pontos de ocorrências de escorregamentos notificados ao Departamento de Defesa Civil e os cenários de adequabilidade resultantes da integração entre o modelo SHALSTAB (inserido como fator) e a MCE, observou-se que o cenário que melhor descreveu a realidade foi o cenário OWA 3, baixo risco e alta compensação (Figura

4), pois correu maior coincidência entre os pontos de ocorrências reais de escorregamentos,

coletado em campo, com áreas de maior aptidão à susceptibilidade aos escorregamentos deste cenário.

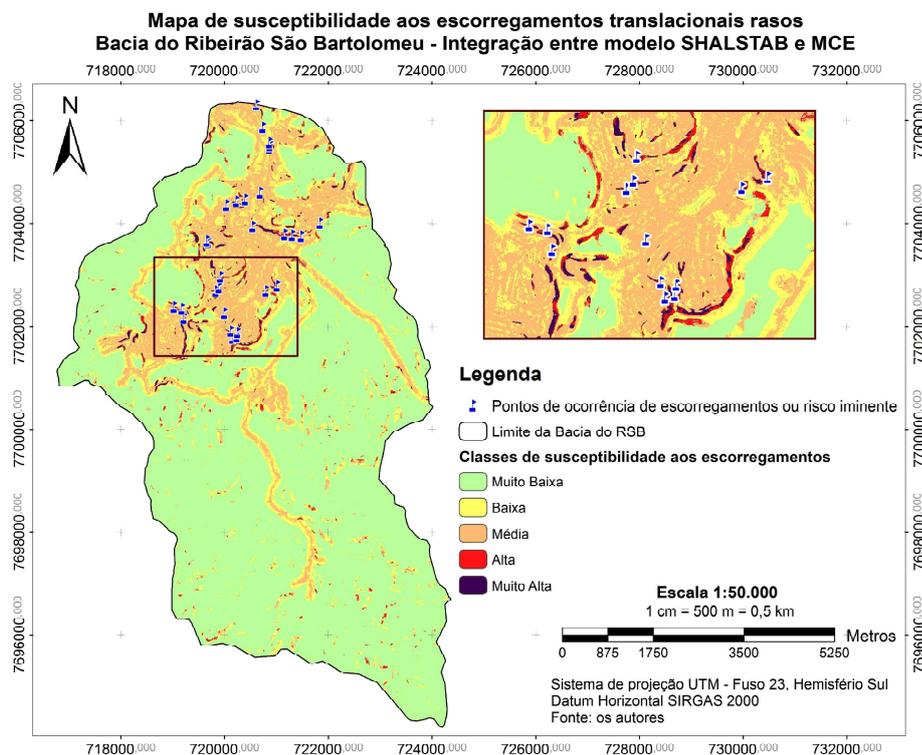


Fig. 4 - Mapa de susceptibilidade aos escorregamentos translacionais rasos resultantes da integração entre o modelo SHALSTAB e MCE.

Por meio dos resultados obtidos com integração do modelo SHALSTAB e MCE, verificou-se que aproximadamente 17,0% da área da bacia apresentou susceptibilidades média, alta e muito alta aos escorregamentos (Tabela 8), sendo que 21 dos pontos de ocorrência de escorregamentos registrados pela Defesa Civil se localizaram nessas três classes, o que demonstra uma boa consistência dos resultados da metodologia proposta, contrariamente aos oito pontos identificados nas mesmas três classes de susceptibilidade quando utilizado somente o modelo SHALSTAB (Tabela 9).

Nota-se pela Tabela 8 que houve uma diminuição (em torno de 1,55%) das áreas de alta e muito alta susceptibilidade aos escorregamentos na integração modelo SHALSTAB + MCE comparadas à utilização do modelo determinístico somente. Possivelmente decorrente da consideração do fator forma de vertentes, uma vez que predomina na bacia as formas côncavas e convexas, o que

atenua a susceptibilidade aos escorregamentos quando comparado com a forma plana. As áreas de média susceptibilidade tiveram um aumento significativo (13,27 %), que pode ser explicada devido às influências de urbanização, desmatamento e construção de vias, que promovem um desequilíbrio da estrutura natural das encostas, causando um aumento da sua instabilidade.

Como o modelo SHALSTAB utiliza apenas características físicas naturais para prever a instabilidade das encostas, a integração entre este modelo e a avaliação por critérios múltiplos, demonstra a magnitude da influência das atividades antrópicas na susceptibilidade aos escorregamentos.

A validação da metodologia proposta utilizando-se da coincidência dos pontos de ocorrências de escorregamentos notificados a Defesa Civil com as classes de susceptibilidade resultantes, permite perceber que houve uma maior representatividade destes pontos nas áreas

de alta e muito alta instabilidade. Verifica-se também que para os resultados obtidos aplicando o modelo SHALSTAB isolado, apenas 27,58% dos pontos de ocorrência se localizaram em classes de média, alta e muito alta instabilidade, enquanto que para modelo SHALSTAB + MCE, esse índice aumentou para expressivos 72,41%. Assim é perceptível a melhor representatividade desta metodologia as ocorrências reais de escorregamentos.

Pela Tabela 10, verifica-se que as classes de susceptibilidade alta e muito alta ocorrem em áreas de solos expostos, seguidos de pastagem e áreas construídas. A maior ocorrência de susceptibilidade média foi em áreas construídas, devido às modificações impulsionadas pela urbanização, muitas vezes com habitações construídas em área inadequadas.

Como o Latossolo Vermelho-Amarelo é

o tipo de solo predominante na área de estudo (78,25% da área da bacia) e sua ocorrência é comum em regiões de altitudes mais elevadas, foi onde se verificou a concentração das classes mais susceptíveis aos escorregamentos.

Quanto à forma de vertentes, na bacia hidrográfica do Ribeirão São Bartolomeu predomina as formas côncavas e convexas, assim as classes de susceptibilidade foram distribuídas entre as mesmas. Pela premissa de que áreas de vertentes côncavas e retilíneas favorecem a formação de solos menos espessos e estão associadas a altas declividades, esperava-se que nestas ocorresse uma maior concentração das classes mais susceptíveis e dos pontos de ocorrência de escorregamentos. Embora essa proposição foi confirmada para a primeira, não foi constatada para as vertentes retilíneas, sendo esta a que apresentou menor concentração.

Tabela 8: Áreas das classes de susceptibilidade aos escorregamentos (somente modelo SHALSTAB e integração modelo SHALSTAB + MCE)

Classes	Modelo SHALSTAB		Integração modelo SHALSTAB + MCE	
	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)
Muito Baixa	51,1005	93,66	37,878	69,43
Baixa	0,3754	0,69	7,4029	13,57
Média	1,1868	2,18	8,4276	15,45
Alta	1,2615	2,31	0,5367	0,98

Tabela 9: Distribuição dos pontos de ocorrência nas classes de susceptibilidade obtidas (modelo SHALSTAB e integração modelo SHALSTAB + MCE)

Classes	Modelo SHALSTAB		Integração modelo SHALSTAB + MCE	
	Ocorrências de escorregamentos	Frequência de ocorrência (%)	Ocorrências de escorregamentos	Frequência de ocorrência (%)
Muito Baixa	21	72,41	0	0,00
Baixa	0	0,00	8	27,59
Média	3	10,34	13	44,82
Alta	1	3,45	2	6,90
Muito Alta	4	13,79	6	20,69

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora o modelo SHALSTAB por ser determinístico, representa melhor a relação entre o tipo de solo e respectivos parâmetros geotécnicos, a parâmetros topográficos do local e modelo hidrológico na determinação de áreas

susceptíveis aos escorregamentos translacionais rasos, este não considera as modificações antropológicas, tais como, o uso e ocupação da terra e obras de infraestrutura, bem como influência das formas de vertentes, que também são fatores determinantes na estabilidade de encostas.

Tabela 10: Ocorrências de escorregamentos registrados e classes de susceptibilidade, relacionados aos fatores uso e ocupação da terra, tipos de solo e forma de vertentes (integração modelo SHALSTAB + MCE)

Fatores	Categorias	Pontos de ocorrências (%)	Classes de susceptibilidade				
			Muito baixa (%)	Baixa (%)	Média (%)	Alta (%)	Muito alta (%)
Uso e ocupação da terra	Área Edificada	31,03	7,23	5,53	49,38	7,83	21,59
	Plantio Agrícola	24,14	22,82	31,65	7,62	20,32	16,25
	Mata Densa	20,69	31,96	27,39	7,40	22,31	7,49
	Pastagem	13,79	29,32	28,29	14,49	35,53	25,72
	Solo Exposto	10,34	8,67	7,15	21,11	14,02	28,94
Tipo de Solo	Cambissolo Háplico (Cx)	3,45	4,12	2,67	2,14	0,00	0,00
	Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA)	75,86	84,66	63,64	60,20	98,21	100,00
	Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA)	20,69	11,22	33,69	37,67	1,79	0,00
Forma de vertente	Côncavas	48,28	49,40	39,02	65,83	55,54	70,22
	Retilíneas	0,00	0,14	0,47	0,34	1,84	0,02
	Convexas	51,72	50,46	60,51	33,83	42,63	29,76

Com este trabalho foi possível explorar uma abordagem que leve em conta as considerações apresentadas, por meio da integração entre o modelo SHALSTAB e a Avaliação por Múltiplos Critérios (MCE), permitindo mapear áreas susceptíveis aos escorregamentos de maneira mais coerente com a realidade que utilizado apenas um modelo determinístico, quando comparado com casos reais de ocorrências de escorregamentos.

Através da combinação proposta, obteve-se que 1,55% da área da Bacia do Ribeirão São Bartolomeu encontra-se em zonas de alta e muita alta instabilidade, sendo, portanto, os locais que devem receber maior atenção dos órgãos gestores.

Os resultados obtidos demonstraram que houve predominância das classes de susceptibilidade média, alta e muito alta em áreas de solo exposto, pastagem e áreas construídas, bem como em solo do tipo Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), uma vez que é o tipo de solo predominante na área de estudo, e em formas de vertentes côncavas.

As regiões de média susceptibilidade aos escorregamentos, correspondentes a 15,45% da área da bacia, estão concentradas em locais urbanizados, evidenciando que a

impermeabilização do solo, cortes no terreno para construção de estradas mal projetados, ocupação de locais inapropriados, entre outros, são diretamente relacionados ao potencial de ocorrência de escorregamentos.

Ressalta-se ainda, que a base de dados disponível e empregada no desenvolvimento deste trabalho, apresenta limitações quanto ao nível de detalhes do terreno proporcionados pela escala. No entanto, para o enfoque almejado neste estudo foi adequada e suficiente ao mapeamento de áreas suscetíveis aos escorregamentos, capaz de contribuir preliminarmente com os órgãos gestores aos trabalhos de planejamento e infraestrutura que não exijam um mapeamento em nível de grandes escalas.

Para trabalhos futuros, deseja-se aplicar a metodologia aqui apresentada utilizando base de dados em escalas maiores, com parâmetros geotécnicos calibrados em laboratório e adicionar novos fatores que podem contribuir aos escorregamentos de terra, tais como, índices de precipitações, mapa litológico, etc.

A metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho, de forma geral, permitiu considerar fatores naturais e de ações antrópicas, reduzir subjetividades do analista e produzir resultados mais condizentes com a realidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AYALEW, L.; YAMAGISHI, H. The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda Yahiko Mountains, Central Japan. **Geomorphology**, v. 65, p. 15-31, 2005.
- BAPTISTA, C, A. **Análise da paisagem e identificação de áreas suscetíveis a movimentos de massa na APA Petrópolis - RJ: subsídio ao planejamento urbano**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005. 96p.
- BARREDO, J. I.; BENAVIDES, A.; HERVÁS, J.; VAN WESTEN, C. J. Comparing heuristic landslide hazard assessment techniques using GIS in the Tirajana basin, Gran Canaria Island, Spain. **JAG: International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 2, n. 1, p. 9-23, 2000.
- BAUM R, L.; SAVAGE W. Z.; GODT, J. W. **TRIGRS: A Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis**. USGS. Colorado. 35p. 2002.
- BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Sciences Bulletin**, v. 24, n. 1, p. 43-69, 1979.
- CAIXETA, P. R. C.; PIMENTA, D. F. N.; AMARAL, R. V.; SCHAEFER C. E. Análise Multi-Critério (MCE) aplicada ao mapeamento de áreas suscetíveis a movimentos de massas na área urbana de Viçosa-MG. **In: IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**, 2012, Recife - PE. Geotecnologias para o Planejamento e a Gestão Eficiente do Território. p. 001-009, 2012.
- CALIJURI, M, L. **Análise Estratégica de Decisão**, Viçosa, MG: Laboratório de Pesquisa em Sistemas de Informação Geográfica. 57p. 2008.
- CONFORTI, M.; PASCALE, S.; ROBUSTELLI, G.; SDAO, F. Evaluation of prediction capability of the artificial neural networks for mapping landslide susceptibility in the Turbolo River catchment (northern Calabria, Italy). **Journal of Soil Science - Hydrology - Geomorphology - Catena**, v. 113, p. 236-250, 2013.
- DIETRICH, W. E.; MONTGOMERY, D. R. **SHALSTAB: a digital terrain model for mapping shallow landslide potential**. NCASI (National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement), **Technical Report**, 29p. 1998.
- EASTMAN, J. R.; JIN, W.; KYEM, P. A. K.; TOLEDANO, J. Raster procedures for multi-criteria / multi-objective Decisions. **Photogrammetry Engineering & Remote Sensing**, v. 61, n. 5, p. 539-547, 1995.
- EASTMAN, J. R. Decision support: decision strategy analysis. **Idrisi 32 release 2: Guide to GIS and Image Processing**. Ed. Clark University. Worcester: Clark Labs, v. 2, 22p, 2001.
- FERNANDES, N. F.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; VIEIRA, B. C.; MONTGOMERY, D. R.; GREENBERG, H. Condicionantes Geomorfológicas dos Deslizamentos nas Encostas: Avaliação de Metodologias e Aplicação de Modelo de Previsão de Áreas Suscetíveis. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 2, n. 1, p. 51-71, 2001.
- FEIZIZADEH, B.; BLASCHKE, T. GIS-multicriteria decision analysis for landslide susceptibility mapping: comparing three methods for the Urmia lake basin, Iran. **Natural Hazards**, v. 65, n. 3, p. 2105–2128, Spring, 2013.
- FEIZIZADEH, B.; BLASCHKE, T.; NAZMFAR, H.; REZAEI MOGHADDAM, M. H. Landslide Susceptibility Mapping for the Urmia Lake basin, Iran: A multi-Criteria Evaluation Approach using GIS. **International Journal of Environmental Research**, v. 7, n. 2, p. 319-336, Spring, 2013.
- GOMES, R. A. T.; GUIMARÃES, R. F.; CARVALHO Jr., O. A.; FERNANDES, N. F.; VARGAS Jr., E. A.; MARTINS, É. S. Identification of the affected areas by mass movement through a physically based model of landslide hazard combined with an empirical model of debris flow. **Natural Hazards**, v. 45, n. 2, p. 197-209, Spring, 2008.
- GORSEVSKI P. V.; JANKOWSKI P.; PAUL P. E. Heuristic approach for mapping landslide hazard integrating fuzzy logic with analytic

- hierarchy process. **Control and Cybernetics**, v. 35, n. 1, p. 1-26, 2006.
- GORSEVSKI P. V.; JANKOWSKI P. An optimized solution of multi-criteria evaluation analysis of landslide susceptibility using fuzzy sets and Kalman filter. **Computers and Geosciences**, v. 36, n. 8, p. 1005-1020, 2010.
- GUZZETTI, F.; CARRARA, A.; CARDINALI, M.; REICHENBACH, P. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. **Geomorphology**, v. 31, issues 1-4, p. 181-216, 1999.
- HUTCHINSON, M. F.; STEIN, J. A.; STEIN, JANET L.; XU, T. Locally Adaptive Gridding of Noisy High Resolution Topographic Data. In: 18º Congresso Internacional de Modelagem e Simulação, Cairns, Australia, 2009. **Anais**. p. 13-17, 2009.
- JENKS, G. F. Geographic logic in line generalisation. **Cartographica Journal**, v. 26, n. 1, p. 27-42, 1989.
- JIANG, H.; EASTMAN. J. R. Application of fuzzy measure in multi-criteria evaluation in GIS. **International Journal Geographic Information Science**, v. 14, n. 2, p. 173-184. 2000.
- LUIS, P. G. **Caracterização Geotécnica e Considerações sobre a Estabilidade de Taludes em Solos Residuais de Viçosa - MG**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil. 2000. 154p.
- LISTO, F. L. R. **Análise da suscetibilidade e do grau de risco a escorregamentos rasos na Bacia do Alto Aricanduva, RMSP (SP)**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo. Departamento de Geografia. São Paulo, 2011. 151p.
- MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. A. physically based model for the topographic control on shallow landsliding. **Water Resources Research**, v. 30, n. 4, p. 1153-1171, 1994.
- OLIVEIRA, M. T. **Caracterização e Modelagem das Áreas de Suscetibilidade a Movimentos de Massa Gravitacionais no Município de Belo Horizonte (MG): Um Estudo Dinâmico**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2009. 279p.
- O'LOUGHLIN, E. M. Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. **Water Resources Research**, v. 22, n. 5, p. 794-804, 1986.
- PACK, R. T.; TARBOTON, D. G.; GOODWIN, C. N. **SINMAP - a stability index approach to terrain stability hazard mapping**. User's manual. Terratech Consulting Ltd., Salmon Arm, B. C. Canada. 68p. 1998.
- POURGHASEMI, H, R.; MORADI, H, R.; FATEMI AGHDA, S, M.; GOKCEOGLU, C.; PRADHAN, B. GIS-based landslide susceptibility mapping with probabilistic likelihood ratio and spatial multi-criteria evaluation models (North of Tehran, Iran). **Arabian Journal of Geosciences**, v. 7. n. 5, p. 1857-1878. Spring. 2014.
- SANTOS, A. P.; ROCHA, S. F.; ABREU, M. V. S.; CALIJURI, M. L.; SANTOS, P. M.. O uso da análise multicritério no mapeamento da Fragilidade Social da área urbanizada do município de Viçosa - MG. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 64, p.635-643, 2012.
- SAATY, T. L. **The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation**. NewYork: Mcgraw-hill. 287p. 1980.
- TIEN BUI, D.; PRADHAN, B.; LOFMAN, O.; REVHAUG, I.; DICK, O. B. Landslide susceptibility assessment in the Hoa Binh province of Vietnam: A comparison of the Levenberg-Marquardt and Bayesian regularized neural networks. **Geomorphology**, v. 171-172, p. 12-29, 2012.
- TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. (orgs.). **Desastres Naturais - conhecer para prevenir**. 1ª edição. Instituto Geológico - São Paulo. 196p. 2009.
- VARNES, D. J. **Landslide Hazard Zonation: a review of principles and practice**. International Association of Engineering Geology Commission on Landslides and Other Mass Movements on Slopes. UNESCO. Paris. 63p. 1984.
- VAN WESTEN, C. J.; RENGERS, N.; TERLIEN, M. T. J.; SOETERS, R. Prediction of the

occurrence of slope instability phenomena through GIS-based hazard zonation. **Geologische Rundschau**, v. 86, no. 2, p. 404-414, 1997.

VAN WESTEN, C. J. The Modelling of Landslide Hazard Using GIS. **Surveys in Geophysics**, vol.

21, no. 2, p. 241 - 255, 2000.

YAGER, R. R. On ordered weighted averaging aggregation operators in multi-criteria decision making. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, v. 18, n. 1, p. 183-190, 1988.