

SIG E MODELOS DE ESCORREGAMENTOS: AVALIANDO MÉTODOS PARA REDUZIR AS INCERTEZAS DE DADOS DE SOLOS E PRECIPITAÇÃO

GIS and Landslides Models: Assessing Methods for Reducing Soil and Precipitation Data Uncertainties

**Silvio Jorge Coelho Simões¹, Luciene Gomes²,
Rodolfo Moreda Mendes³ & Tatiana Sussel Gonçalves Mendes¹**

¹ Universidade Estadual Paulista - UNESP

Instituto de Ciência e Tecnologia

Rod. Presidente Dutra km 137,8 - CEP 12247-004, São José dos Campos/SP, Brasil
silvio.simoes@ict.unesp.br e tatiana.mendes@ict.unesp.br

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Centro de Ciência do Sistema Terrestre

Avenida dos Astronautas, 1758 - CEP 12227-010, Jardim da Granja, São José dos Campos/SP, Brasil
luciene.gomes@inpe.br

³ Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais - CEMADEN

Área de Geodinâmica Estrada Doutor Altino Bondensan, 500, Parque Tecnológico- CEP 12247-016,
São José dos Campos/SP, Brasil
rodolfo.mendes@cemaden.gov.br

Recebido em 17 de Novembro, 2015/ Aceito em 11 de Abril, 2016

Received on November 17, 2015/ Accepted on April 11, 2016

RESUMO

Os modelos matemáticos de base física se constituem uma importante ferramenta para auxiliar na previsão e gestão dos escorregamentos. Os dados de entrada (geotécnicos e hidroclimatológicos) destes modelos frequentemente trazem significativa incerteza na sua distribuição espacial. Este trabalho avalia dois métodos probabilísticos - lógica Fuzzy e Geoestatística - para representar as propriedades físicas e hidráulicas dos solos e a precipitação. A comparação entre um método determinístico (inverso do quadrado da distância) e a geoestatística mostrou que este último foi bem mais eficiente para detectar os efeitos da precipitação orográfica existente na região da bacia do Paraíba do Sul além de representar, de forma mais adequada, a complexidade e diversidade do mundo real. Também foi avaliado o grau de interação entre os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e os três modelos de escorregamento regionais (Shalstab, SINMAP e TRIGRS). Os modelos Shalstab e SINMAP possuem maior interação e podem funcionar como extensão no interior de um SIG, possibilitando que os mapas produzidos por métodos probabilísticos possam ser melhor utilizados nos modelos de escorregamentos.

Palavras chaves: SIG, Modelos de Escorregamento, Lógica Fuzzy, Geoestatística.

ABSTRACT

The physically-based models can be an important tool to contribute to prediction and management of the landslides. Geotechnical and hydro-climatologic data used as input in the landslides models often have a high degree of uncertainty in their spatial distribution. This paper evaluates two probabilistic approaches (Fuzzy and Geostatistics). The comparison between a deterministic method (isohyets) and geostatistics showed that geostatistics is more efficient in detecting the orographic effect in the Paraíba do Sul basin and represents, more adequately, the complexity and diversity of the real world. Three regional landslides models (Shalstab, SINMAP e TRIGRS) were analyzed in order to evaluate their degree of interaction with Geographical Information Systems (GIS). SHALSTAB and SINMAP models have higher degree of interaction and function as a GIS extension making possible that different types of input data can be manipulated within the GIS environment; this facilitates that maps, produced by probabilistic approaches, can be better used in regional *Landslidemodels*.

Keywords: GIS, Landslides Models, Fuzzy Models, Geoestatistics.

1. INTRODUÇÃO

O grande avanço das geotecnologias, incluindo sensoriamento remoto, Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e tecnologias GPS, faz destas abordagens um potencial imenso de aplicação na área de desastres naturais em suas diferentes fases (VAN WESTERN *et al.*, 2008). Desde que a análise de risco é um fenômeno tipicamente espacial, as geotecnologias particularmente os SIGs representam possibilidades que incluem monitoramento, modelagem e gestão dos desastres naturais.

Nestes últimos anos, os SIGs passam por uma verdadeira revolução onde a concepção de um “software em desktop” está se transformando em plataformas que incluem o conceito de BigData, interação software e base de dados globais em ambiente de nuvem, estruturas topológicas sofisticadas para organização de base de dados e melhoria dos processos de geovisualização 3D.

Outro avanço tem sido na direção de uma maior integração entre SIGs e modelos computacionais de diferentes naturezas (por ex., hidrológicos, erosivos, de escorregamento) possibilitando que as abordagens de gestão de dados espaciais e de modelagem possam ser executadas em um mesmo ambiente.

Apesar destes avanços, a análise para compreender as incertezas dos dados de entrada em SIGs e modelos computacionais não tem evoluído da mesma maneira e normalmente é pouco considerada na gestão de desastres naturais.

O grau de incerteza pode variar muito dependendo da natureza dos dados. Algumas representações espaciais, como de uma rede de água e esgoto, podem chegar perto de 100% de acurácia e precisão. Ao contrário, a

representação de elementos do meio físico natural e modificado, como solos e uso da terra, possuem uma elevada complexidade intrínseca que torna-se, virtualmente impossível, captar estes processos em sua totalidade e ter uma perfeita acurácia dos dados representados.

No caso dos modelos de escorregamento, os dados de entrada incluem dados topográficos, hidrológicos e parâmetros físicos de solos de diferentes naturezas e escala (USGS, 2008; REGINATTO *et al.*, 2012; GUIMARÃES *et al.*, 2013; LISTO & VIEIRA, 2015) com elevado grau de incerteza na sua distribuição espacial.

Neste sentido, este trabalho possui dois objetivos complementares: a) discutir métodos de abordagens para tratar com incerteza de dados de entrada (precipitação e solos) em modelos de escorregamento; b) discutir os processos de interação entre SIGs e modelagem, enfatizando os modelos de escorregamento.

Longe de esgotar o tema, o artigo pretende levantar a discussão no sentido de buscar uma maior interação entre dados geoespaciais e modelos normalmente utilizados na análise de desastres naturais, assim como, ressaltar a necessidade de se buscar métodos que captem a essência probabilística dos elementos e variáveis do meio físico e que permitam uma representação mais próxima da realidade e reduza as incertezas das informações.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste item serão discutidas questões relacionadas as bases de dados geoespaciais e as incertezas que são inerentes aos fenômenos climáticos e aos processos do meio físico. Também serão abordados diferentes tipos de modelos matemáticos utilizados para estudos

do meio físico e escorregamento e suas relações com os sistemas de informação geográfica (SIG).

2.1 Incerteza de dados geoespaciais

Nos últimos anos tem havido um grande esforço por parte de organismos internacionais e projetos globais no sentido de disponibilizar bases de dados geoespaciais em diferentes escalas (global e regional) possibilitando que diferentes dados geoespaciais regionais possam ser utilizados para modelagem e gestão de desastres naturais (UNISDR, 2013; IRGC, 2005; EM-DAT, 2009).

Ainda que nem sempre ocorra, estes dados deveriam vir acompanhados de metadados que contenham, como ressaltam Delaney & Niel (2007), a descrição de elementos relevantes incluindo data de criação, origem, formas de acesso e qualidade dos dados. Longley *et al.* (2011) também ressaltam que informações sobre a qualidade dos dados deveriam acompanhar a descrição dos metadados.

No Brasil, tem havido um avanço na disponibilidade e na organização dos dados geoespaciais em nível nacional (INDE – Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais) e estadual (GeoData, para o Estado de São Paulo). Porém, os metadados associados frequentemente não trazem informações que permitam a sua avaliação qualitativa, dificultando conhecer sua precisão e acuidade. Isto inclui os dados de entrada dos modelos de escorregamento relacionados a topografia, aos solos e a climatologia.

Como mencionado anteriormente, dados climatológicos e do meio físico são normalmente probabilísticos e sua representação espacial está sujeita a grandes diferenças de interpretação e formas de representação. Apesar disto, os métodos que consideram a incerteza intrínseca destas representações são pouco utilizados em projetos regionais e de planejamento ambiental ficando mais restrito a estudos acadêmicos. No caso da precipitação, por exemplo, os projetos regionais normalmente utilizam métodos determinísticos como isoietas, os quais não consideram que existe um “erro” inserido nos dados cartografados de precipitação.

De fato, existem diferentes modelos e abordagens para avaliar incerteza de dados espaciais (FISHER, 2005) e, neste trabalho, se destacam dois deles: lógica Fuzzy para

representação probabilística de solos e Geoestatística para representação probabilística da precipitação.

Dados de solos costumam apresentar elevada variabilidade espacial, além de existirem diferentes classificações de natureza pedológica ou geotécnica. No caso de dados de solos para modelos de escorregamento, as classificações são mais baseadas nas suas propriedades físicas e hidráulicas (textura, porosidade, permeabilidade). A lógica Fuzzy pode ser adequada para representar um contínuo entre um solo muito argiloso e um solo muito arenoso ou entre um solo com porosidade muito elevada e outro com porosidade menor. Poucos trabalhos são disponíveis na literatura acerca de aplicação de lógica Fuzzy para solos; entretanto, pode-se destacar o trabalho de McBratney & Odeh (1997) que pode ser considerado um dos pioneiros na aplicação de modelos probabilísticos para representação de propriedades físicas dos solos. Outro trabalho que se pode destacar foi desenvolvido por Lark (2000) que fez a interação entre Fuzzy e geoestatística utilizando amostras de solos orgânicos.

No Brasil, poucos trabalhos aplicam lógica Fuzzy em solos, entre eles pode-se destacar Nolasco-Carvalho *et al.* (2009); Camarinha *et al.* (2012) e Lima (2013).

Nolasco-Carvalho *et al.* (2009), aplicaram a lógica Fuzzy para apontar as incertezas e transições da cobertura pedológica e, quando comparado com o mapa convencional de solos, mostrou menor generalização nos domínios de representações dos espaços e parâmetros, ou seja, possibilitou um refinamento da escala. Lima (2013) integrou lógica Fuzzy com levantamentos baseados em fotografias aéreas e trabalhos de campo em sua metodologia. O mapa de solos, obtido por lógica Fuzzy, permitiu identificar diversas classes pedológicas de solos e comparar com um mapeamento semiautomático em escala de 1:30.000. A integração entre lógica Fuzzy e geoestatística foi realizada por Camarinha *et al.* (2012) para uma pequena área situada na região da Serra do Mar e que contou com a participação de um dos autores deste artigo. Os resultados deste trabalho serão discutidos mais adiante.

Os dados de precipitação representam um processo hidrometeorológico distribuído que possui elevada variabilidade nas escalas

espacial e temporal. Os métodos tradicionais de interpolação espacial da precipitação de natureza determinística (por exemplo, polígonos de Thiessen, inverso do quadrado da distância e isoietas) produzem resultados muitas vezes pouco realistas e não permite detectar a aleatoriedade e estimar os erros de interpolação. Segundo Burrough & Macdonell (1998), a irregularidade da variação de sistemas naturais é melhor descrita a partir de superfícies estocásticas, em comparação ao simples uso de funções matemáticas de suavização, de natureza determinística e baseadas em equações lineares. A geostatística baseia-se na noção de que o padrão de interpolação é uma variável aleatória que representa dados pontuais referentes a uma determinada variável que, se apresentar certas características espaciais, pode ser utilizada para estimar sua distribuição espacial em locais não-amostrados (ISAACS & SRIVASTAVA, 1989; GOOVAERTS, 1999; ISOBEL & HARPER, 2000; ANDRIOTTI, 2003). Resumidamente, a geoestatística é baseada no pressuposto de que, na média, as amostras mais próximas no tempo e espaço são mais similares entre si do que aquelas que se localizam mais afastadas (MATHERON, 1971). A teoria é baseada na seleção de um variograma que leva em consideração a localização geográfica e a dependência espacial, permitindo quantificar a espacialização na área de interesse e possibilitando sua utilização como método de predição.

2.2 Relação entre modelos geoespaciais e modelos matemáticos em bases físicas

Quando se pensa nas relações entre SIG e modelagem se deve considerar que este processo pode variar em diferentes graus e estágios e em diferentes níveis de integração.

Neste sentido, Shamsi (2002) estabelece uma taxonomia que possibilita definir as maneiras como um SIG pode ser combinado a modelos computacionais e como pode ocorrer a interação entre ambos. Segundo este autor, é possível identificar três níveis de inter-relação entre SIG e modelos computacionais:

A. Método Intercambiável – neste nível, o SIG e o modelo matemático trabalham separadamente. Este é o método com menor interação e ainda é um procedimento muito utilizado.

B. Método de Interface – neste método, o modelo é executado independente do SIG, mas pelo menos parcialmente, alguns arquivos de entrada podem ser criados dentro de um SIG. O HEC-HMS (Hydrologic Modeling System – Hydrologic Modelling System) desenvolvido pelo U. S. Army Corps of Engineering é um bom exemplo do método de interface, permitindo ao usuário editar, executar e visualizar os dados do modelo em um ambiente Windows.

C. Método de Integração – neste método, SIG e modelos trabalham em um mesmo ambiente e as quatro tarefas (entrada, edição, execução e saída) são realizadas no interior do SIG. Modelos hidrológicos como o ArcHydro e o SWAT (Soil and Water Assessment Tool) são exemplos de modelos que trabalham completamente integrados a um SIG.

Os modelos de escorregamento não fogem a esta regra e possuem diferentes níveis de integração com os SIGs. Modelos de previsão que atuam em escala de detalhe, como o GeoStudio, tem pouca interação com um SIG e pode ser considerado um exemplo de Método Intercambiável.

O modelo GeoStudio, desenvolvido e fabricado pela Empresa Canadense GeoSlope-International, incorpora três módulos de análise geotécnica denominados de Sigma/W, *Seep/W* e Slope/W, e que podem realizar análises de forma acoplada e/ou independente.

O módulo Sigma/W permite realizar análises de distribuição de tensões e deformações nas camadas de solo a partir da aplicação de cargas concentradas e/ou distribuídas no maciço de solos. Esse módulo permite, por exemplo, avaliar o efeito dos fatores indutores antrópicos (e.g., sobrecargas no terreno) no processo de deflagração dos deslizamentos em encostas e taludes.

O módulo *Seep/W* permite estudar a influência da infiltração da chuva na deflagração de escorregamentos em solos não saturados, por meio de análises de fluxo transiente. Além disso, o módulo permite analisar problemas de migração da frente de umedecimento e a dissipação de excesso de poro-pressão de água no interior do maciço de solos.

O módulo Slope/W permite realizar análises de estabilidade de taludes e encostas

(em tipos de solos heterogêneos) usando o método do Equilíbrio Limite. O acoplamento dos resultados obtidos nos módulos apresentados anteriormente (Sigma e *Seep/W*) permite, por exemplo, realizar análises de estabilidade considerando a distribuições de tensões causadas por intervenções antrópicas em áreas de risco e as características regionais de precipitação e sua influência na distribuição de poro-pressões (positiva ou negativa) no maciço de solos.

Modelos em escala regional e que contribuem para estabelecer mapas de risco ou de vulnerabilidade ao escorregamento como SHALSTAB (*Shallow Landslide Stability*) (MONTGOMERY & DIETRICH, 1994; DIETRICH *et al.*, 2013), SINMAP (Stability Index Mapping) (Park *et al.*, 2001) e TRIGRS (Transient Rainfall Infiltration and Grid-based Regional) (LISTO & VIEIRA, 2015) têm diferentes interfaces de integração com os SIGs e serão discutidos posteriormente.

3. METODOLOGIA

Neste item será apresentado a área de estudo assim como serão discutidos os procedimentos metodológicos relacionados a duas abordagens para tratar da incerteza de sistemas naturais (lógica fuzzy e geoestatística).

3.1 Área de Estudo

A área selecionada para este estudo corresponde à bacia do Rio Paraíba do Sul (porção paulista) com cerca de 15.300 km². Esta bacia está inserida em uma região com expressiva importância econômica fazendo a ligação entre as duas maiores cidades brasileiras (São Paulo e Rio de Janeiro). Uma intensa conurbação ocorre ao longo do rio Paraíba do Sul acompanhado também de um dos mais importantes parques industriais do país.

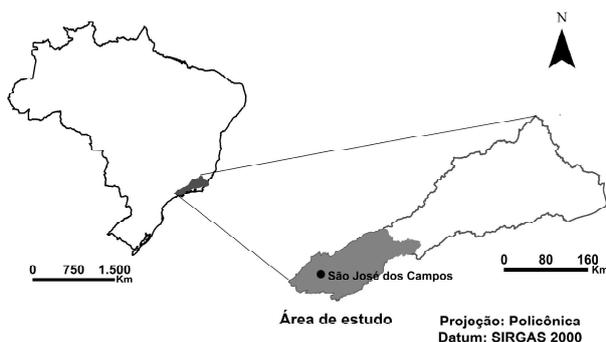


Fig. 1 - Localização da área de estudo.

3.2 Materiais e Métodos

Para a realização deste trabalho foi realizado o levantamento bibliográfico acerca de métodos de incertezas aplicados a dados de entrada em SIGs e que são utilizados em estudos de vulnerabilidade de escorregamento. Dois tipos de dados – solos e precipitação – que possuem elevado grau de incerteza na sua descrição e elevada variabilidade espacial foram selecionados para esta análise. Levantamentos realizados nas regiões que incluem a Serra do Mar e a Serra da Mantiqueira foram enfatizados por possuírem os maiores históricos de escorregamento no país. (TOMINAGA, 2009).

No caso dos solos se discute a aplicação de lógica Fuzzy para representar a variabilidade espacial. No caso da precipitação o modelo probabilístico é baseado na abordagem geoestatística, o qual é comparado com um modelo de representação espacial determinístico (Inverso do Quadrado da Distância – IDW em inglês).

Neste trabalho é discutida a aplicação de lógica Fuzzy para classificar textura de solos a partir de uma área de aproximadamente 12 km² na região de Cunha (SP) no contexto regional da Serra do Mar (CAMARINHA *et al.*, 2012). Portanto, trata-se de uma área de relevo acidentado.

A análise de textura foi realizada a partir de 41 amostras situada nas diferentes unidades geológicas e geomorfológicas. Apesar de sua pequena extensão, a área se situa em uma região de transição de relevo e possui uma significativa diversidade geológica e de solos (CAMARINHA *et al.*, 2012).

Da mesma forma, a representação da precipitação em uma região com muita diversidade de relevo e variação altimétrica (540 a 2400 m) como aquela onde se encontra a bacia do rio Paraíba do Sul (porção de São Paulo) possui elevada variação espacial de precipitação anual média variando de 1300 a 2100 mm (SILVA, 1999). Desta forma, a aplicação de métodos baseados na relação de proximidade das estações e em procedimentos aleatórios pode representar, de forma mais real, situações com elevada variabilidade espacial dos dados. Para este trabalho foram selecionados 41 postos pluviométricos cuja

distribuição espacial pode ser observada no modelo TIN (Figura 2).

Para verificar a relação da distribuição da variável no espaço, utiliza-se o variograma o qual é capaz de medir o grau de dependência espacial entre amostras. Para sua construção, são usadas as diferenças ao quadrado dos pares de valores $\{z(x) \text{ e } z(x+h)\}$, assumindo-se estacionaridade nos incrementos (ISAACS & SRIVASTAVA, 1989).

A construção e o ajuste de um modelo de semivariograma é um pré-requisito para a krigagem, sendo usado para modelar dois valores correlacionados no tempo ou no espaço. Para se obter a estimativa dos parâmetros de um modelo de semivariograma baseado na teoria, pode-se formular um estimador para o mesmo, que depende somente da separação do vetor h , apresentado da seguinte forma:

$$2\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{|N(h)|} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_j)]^2, \quad h \in \mathbb{R}^d \quad (1)$$

sendo: h um vetor, $|N(h)|$ é o número de elementos distintos de $N(h)$, que é dado por:

$$N(h) \equiv \{(x_i, x_j): x_i - x_j = h; i, j = 1, \dots, n\} \quad (2)$$

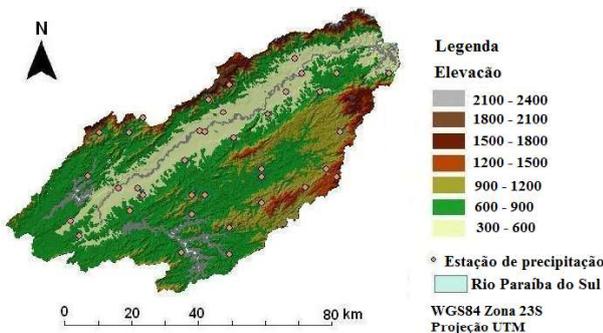


Fig. 2 - Localização das estações de precipitação.

Os mapas produzidos a partir de geoestatística foram comparados com um método de interpolação determinístico, inverso do quadrado das distâncias, (CHILDS, 2004). Este último juntamente com o método dos polígonos de Thiessen são os métodos de interpolação mais usados para representação espacial da precipitação (LY *et al.*, 2013).

O inverso do quadrado das distâncias normalmente é usado quando um conjunto de

pontos é suficientemente denso para representar a variação da superfície local e, quanto menor a distância dos pontos, maior deverá ser a correlação entre os valores. O modelo consiste em se multiplicar o valor observado pelo inverso de suas respectivas distâncias tendo, na equação, se adicionado uma potência “p” ao inverso da distância. Normalmente a potência mais utilizada é “2” e, por esta razão, é designado de inverso do quadrado das distâncias ou IDW em inglês. onde,

z = ao valor estimado para o ponto z ;

n = número de amostras;

z_1 = valores conhecidos;

d_1 = distância entre os valores conhecidos e o estimado (z_1 e z);

p - potência para as distâncias.

Para ambos os métodos (geoestatística e inverso do quadrado da distância) foram utilizados a mesma série temporal de precipitação obtida das bases do DAEE (Departamento de Água e Energia Elétrica de São Paulo) e da ANA (Agência Nacional de Águas) correspondendo ao período de 1983 a 2014.

4. RESULTADOS

O fenômeno de representação de parâmetros do meio físico e climatológico envolve, em sua essência, uma falta de objetividade quando se trata de representar diferentes fenômenos. Outra característica dos dados geográficos é a ambiguidade. Exemplo de ambiguidade são as classificações de uso da terra que podem ter diferentes formas de representação dependendo de diferentes objetivos e resolução de análise.

Conforme já mencionado, uma maneira de reduzir esta ambiguidade é adotar uma interpretação probabilística onde se pode estabelecer um valor numérico para caracterizar certo grau de incerteza. A ideia de lógica Fuzzy se baseia neste princípio, representando conjunto de dados que não são definidos de forma precisa como solos ou uso da terra. Segundo Longley *et al.* (2011), a lógica Fuzzy se torna atrativa por capturar a incerteza atribuindo valores para diferentes categorias que representam o mundo real, muitas vezes de forma transicional.

A Figura 3 mostra uma classificação de solos que foi desenvolvida para uma pequena área no contexto da Serra do Mar com elevada

diversidade de relevo (Camarinha *et al.*, 2012). Solos arenosos recebem valores próximos a 0 e solos argilosos recebem valores próximos a 1.

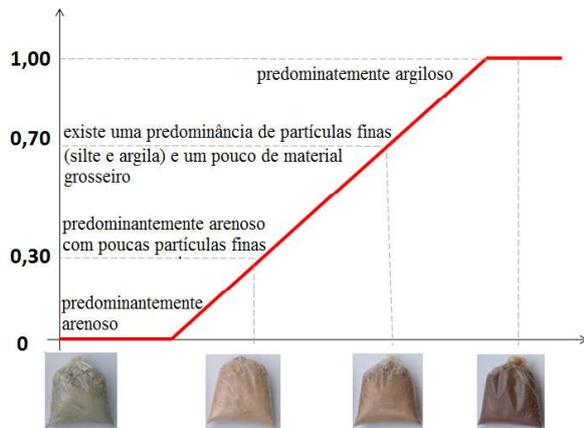


Fig. 3 - Representação de solos utilizando a lógica Fuzzy para solos (CAMARINHA *et al.*, 2011, modificado).

Depois de classificado, quanto a textura, com lógica Fuzzy cada tipo de solo pode ser representado cartograficamente usando um método probabilístico como a geoestatística. O mapa, produto desta classificação, pode ser integrado com mapas geológicos e outros mapas de propriedades mecânicas dos solos - como porosidade e permeabilidade - no sentido de entender melhor o contexto do sistema solo-rocha.

Portanto, mapas de diferentes propriedades de solos, baseados em lógica Fuzzy, poderiam ser utilizados como dados de entrada em modelos de escorregamento; entretanto, estes modelos deveriam ter uma boa integração com SIGs no sentido de explorar o potencial de interação da classificação probabilística dos solos (entre 0 e 1) seguido de uma representação, também probabilística, baseada na geoestatística.

Para a região da bacia do rio Paraíba do Sul (porção de São Paulo), a variabilidade da precipitação foi comparada baseada em um método determinístico (inverso do quadrado da distância) e em um método probabilístico (krigagem) para a mesma base de dados. A análise dos dois mapas, para o período MMA (março-abril-maio), mostra que o método do inverso do quadrado da distância (Figura 4a) não foi capaz de representar o efeito contínuo das chuvas orográficas que ocorrem associadas a Serra da Mantiqueira correspondendo ao

extremo noroeste do mapa; em alguns casos, o método determinístico não conseguiu interligar alguns dos pontos amostrados isolando os criando núcleos (ou círculos) de maior ou menor precipitação. Ao contrário, a espacialização baseada em krigagem (Figura 4b) identifica, de maneira evidente, o processo de maior intensidade da precipitação associado a Serra da Mantiqueira além de identificar mais apropriadamente as “faixas” de gradação de precipitação indo das áreas de menor precipitação (centro da bacia) para as áreas de maior precipitação (na direção dos divisores de água).

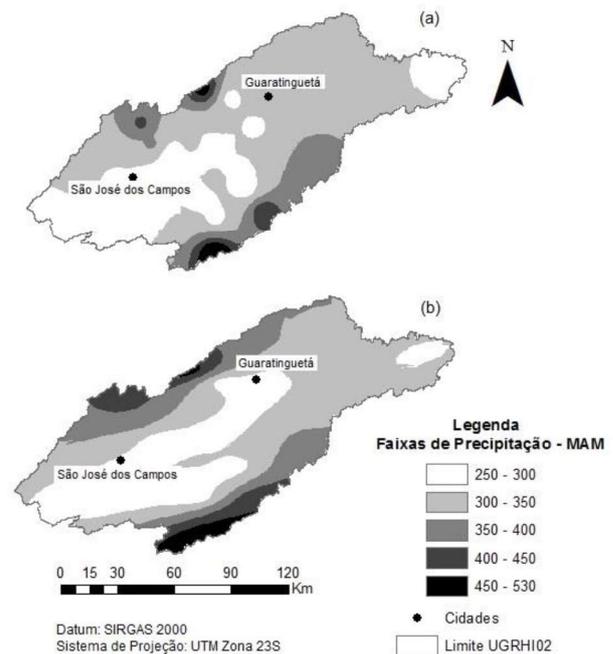


Fig. 4 – Comparação entre um mapa gerado por um processo determinístico (isoietas) e probabilístico (abaixo) para dados de precipitação acumulada no período JJA.

Entretanto para que os mapas baseados em lógica Fuzzy e geoestatística possam ser utilizados de forma mais eficiente em entrada de modelos de escorregamento é crucial que haja boa interação entre estes modelos e os SIGs.

Conforme mencionado anteriormente, os modelos possuem diferentes níveis de integração com o SIG (SHAMSI, 2002). Três modelos regionais costumam ser mais utilizados no país (SHALSTAB, SINMAP e TRIGRS). SHALSTAB e SINMAP podem ser considerados como exemplo de Método de Integração (Tabela 1) funcionando como extensão dentro de um SIG e possibilitando que mapas de natureza

probabilística, produzidos com ferramentas no SIG, possam ser utilizados como dados de entrada nos modelos de escorregamento. O modelo TRIGRS pode ser considerado uma situação intermediária (Tabela 1) adotando SIG para análise de declividade do modelo (PARK et al., 2013).

Tabela 1: Modelos de escorregamento e seu grau de interação com SIG

Modelo de escorregamento	Escala	Interação SIG modelo
SHALSTAB	Regional	Método de Integração
SINMAP	Regional	Método de Integração
TRIGRS	Regional	Método de Interface
GeoStudio	Local	Método Intercambiável

5. CONCLUSÕES

Modelos de escorregamento regional como *SHALSTAB*, *SINMAP* e *TRIGRS* utilizam diferentes dados de natureza geotécnica e hidro-climatológica. Estes dados possuem normalmente incerteza e variabilidade espacial elevada. A utilização de abordagens geoespaciais de natureza probabilística se constitui uma alternativa para estabelecer padrões de representação espacial que levem em conta as incertezas intrínsecas destes dados. Em que pese seus aspectos positivos estas abordagens tem sido pouco exploradas como dados de entrada para modelos de desastres naturais, entre eles, os modelos de escorregamento regional.

A interação entre lógica Fuzzy e geoestatística pode ser uma boa alternativa para representar propriedades de solos (geotécnicas ou pedológicas) com grande variedade espacial. O exemplo, aqui apresentado, ressaltou como esta abordagem apresentou bons resultados para variação de textura de solos em uma área de pequena dimensão. No caso da precipitação, a comparação entre um método determinístico (inverso do quadrado da distância) e um mapa obtido a partir de uma abordagem geoestatística, mostra que a precipitação pode ser representada com maior detalhamento quando se utiliza um método de interpolação que inclua um "erro" como a geoestatística.

Apesar da quantidade relativamente pequena de estações, a geoestatística forneceu uma estimativa mais real do que se espera para uma região influenciada pelo efeito orográfico da precipitação.

Os modelos de escorregamento como o *SHALSTAB* e o *SINMAP*, que funcionam como uma extensão no interior do SIG, possuem condições mais adequadas de utilizarem, mais efetivamente, os diferentes produtos cartográficos produzidos com auxílios de ferramentas geoespaciais e de fazerem melhor uso de mapas que considerem os elementos de incerteza na sua elaboração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRIOTTI, J. L. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo, UNISINOS. 2003. 165 p.

BURROUGH, P. & MCDONNELL, R. **Principles of Geographical Information Systems**. Oxford, Oxford University Press. 1998. 333 p.

CAMARINHA, P. I. M.; SIMOES, S. J. C.; BERNARDES, G. P.; TRANNIN, I. C. B. Correlating Soil Porosity and Respective Geological Unit in Paraíba do Sul Valley, Brazil - A Geostatistical Methodology Proposal. **Soils & Rocks**, v. 35, n. 3, p. 209-222, 2012.

CHILDS, C. Interpolating surfaces in ArcGIS Spatial Analyst. **ArcUser**, p. 32-35, July-September 2004.

DELANEY, J. & Van NIEL, K. **Geographical Information Systems. An Introduction**. Oxford, Oxford University. 2007. 224 p.

DIETRICH, W.E.; REAL DE ASUA; R., COYLE, J.; ORR, B.; TRSO, M. **A validation study of the shallow slope stability model, SHALSTAB, in forested lands of Northern California**. Berkeley: UC Berkeley, 1998, 59 p. Disponível em: <http://www.krisweb.com/biblio/gen_ucb_dietrichetal_1998_shalstab.pdf>. Acesso em: 01 dez. 2013.

EM-DAT **The OFDA/CRED International Disaster Database**. Université Catholique de Louvain, Brussels, Belgium. 2009. Disponível em: <<http://www.emdat.be/copyright-cred-2009>>. Acesso em 23 jan. 2017.

- FISHER, P. F. Models of uncertainty in spatial data. In: LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. (eds.) **Geographical Information Systems: Principles, Practices, Techniques, Management and Applications**. Hoboken, N. J. Wiley, p. 191-205, 2005.
- GOOVAERTS, P. Geostatistics in soil science: State-of-the-art and perspectives. **Geoderma**, v. 89, n. 1-2, p. 1-45, 1999.
- GUIMARÃES, R. F., FERNANDES, N. F., GOMES, R. A. T., CARVALHO JUNIOR, O. A. Fundamentação Teórica do Modelo Matemático para Previsão de Escorregamentos Rasos – Shallow Stability. **Espaço & Geografia**, v. 6, n. 2, p. 133-150, 2003. Disponível em: <<http://repositorio.unb.br/handle/10482/10671>>. Acesso em: 25 nov. 2013.
- IRGC. **Risk Governance: Towards an Integrative Approach**. International Risk Governance Council, White Paper 1 Geneva, <http://www.irgc.org/Publications.html> Jarvinen. 2005.
- ISAAKS, E. H. & SRIVASTAVA, R. M. **An Introduction to Applied Geostatistics**. New York, Oxford University Press. 1989. 592 p.
- ISOBEL, C. & HARPER, W. **Practical geostatistics**. Ecosse North Amer Llc, 2000. 442 p.
- LARK, R. M. Designing sampling grids from imprecise information on soil variability, an approach based on the fuzzy kriging variance. **Geoderma**, v. 98, p. 35-59, 2000.
- LIMA, L. **Aplicação dos métodos semi-automático e lógica fuzzy para o mapeamento de solos da bacia do Sarandi**. Dissertação (Mestrado em Geociências) Universidade de Brasília, Brasília, 2013. 124 f.
- LISTO, F. L.; VIEIRA, B. C. Influência de parâmetros geotécnicos e hidrológicos na previsão de áreas instáveis a escorregamentos translacionais rasos e utilizando o modelo TRIGRS. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 16, n. 3, p. 486-500, 2015.
- LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. E.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. **Geographic Information Systems and Science**. New York, John Wiley. 2011. 560 p.
- LY, S.; CHARLES, C.; DEGRÉ, A. different methods for spatial interpolation of rainfall data for operacional hydrology and hydrological modeling at watershed scale. A review. **Biotechnology Agronomy, Society and Environment**, v.17, n. 2, p. 392-406, 2013.
- MATHERON, G. **The theory of regionalized variables and its applications**. Paris, Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathematique in Fontainebleu. 1971. 211 p.
- MCBRATNEY, A.B. & ODEH, I.O.A. Application of fuzzy sets in soil science: fuzzy logic, fuzzy measurements and fuzzy decisions. **Geoderma**, v. 7, n. 2, p.485-113, 1997.
- MONTGOMERY, R. & DIETRICH, W.E. A physically-based model for the topographic control on shallow landsliding. **Water Resources Research**, v. 30, p. 1153-1171, 1994.
- NOLASCO-CARVALHO, C.; FRANCA-ROCHA, W.; UCHA, J.M. Mapa digital de solos: Uma proposta metodológica usando inferência fuzzy. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n.1, p.46-55, 2009
- PARK, D. W., NIKHIL, N. V., AND LEE, S. R: *Landslide* and debris flow susceptibility zonation using TRIGRS for the 2011 Seoul *Landslide* event, **National Hazards Earth System Science**, v. 13, p. 2833-2849, doi:10.5194/nhess-13-2833-2013, 2013.
- REGINATTO, G.M.; MACCARINI, KOBIYAMA, R.A.R.; HIGASHI, A.; GRANDO, C. W.; CORSEUIL, M. L. **CARAMEZ Shalstab application to identify the susceptible areas of shallow landslides in cunha river watershed, rio dos Cedros city, SC, Brazil**. Anais do 4o GEOBIA, Maio 2012, Rio de Janeiro. p.108-113, 2012.
- SHAMSI, S. U. **GIS application in floodplain management**. Proceedings of the ESRI International User Conference, San Diego. July, 2002. [S.I.].
- SILVA, J. U. L. **A dinâmica atmosférica e a distribuição das chuvas na região “lesnordeste” paulista**. Tese (Doutorado em Geociências). Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1999. 212 f.

TOMINAGA, L., SANTORO, J., AMARAL, R. **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. São Paulo, Instituto Geológico. 2009. 196p.

UNISDR - AM – The United Nations Office for Disaster Risk Reduction - Regional Office for the Americas. **The ‘silent disaster of local losses’**. Panamá, 2013. Disponível em: <<http://www.unisdr.org/archive/35664>>. Acesso em: 10 jan. 2014.

USGS – U. S. Geological Survey. **The Landslidehandbook** - a guide to understanding landslides. Reston, Virginia: U. S. Geological Survey Circular 1325, p. 129, 2008.

VAN WESTERN, C. J.; CASTELLANOS ABELLA, E. A.; SEKHAR, L. K. Spatial data for *Landslidesusceptibility*, hazards and vulnerability assessment: an overview. **Engineering Geology**, v. 102, n. 3-4, p. 112-131, 2008.