

ANÁLISE DE DIFERENTES CENÁRIOS DE ESPACIALIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DOS SOLOS NO MAPEAMENTO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A DESLIZAMENTOS

ANALYSIS OF DIFFERENT SPATIALIZATION SCENARIOS OF SOIL SHEAR STRENGTH PARAMETERS IN THE MAPPING OF SUSCEPTIBLE AREAS TO LANDSLIDES

**Regiane Mara SBROGLIA, Edison Ramos TOMAZZOLI,
Rafael Augusto dos Reis HIGASHI**

Departamento de Geociências. Universidade Federal de Santa Catarina. Campus Universitário Trindade. Rua Engenheiro Agrônomo Andrei Cristian Ferreira, s/n – Trindade – Florianópolis – SC
E-mail: regianesbroglia@gmail.com; edison.tomazzoli@ufsc.br; rrhigashi@gmail.com

Introdução
Área de estudo
Materiais e métodos
Obtenção dos parâmetros topográficos
Obtenção dos parâmetros geotécnicos
Banco de dados de parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú
Espacialização dos parâmetros geotécnicos
Modelagem com o SHALSTAB
Identificação dos cenários de maior capacidade preditiva
Resultados e discussões
Considerações finais
Referências

RESUMO - Essa pesquisa teve como objetivo analisar a influência da distribuição espacial da resistência ao cisalhamento dos solos no mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos utilizando modelagem matemática. Primeiramente, foram executados 20 ensaios de campo, *Borehole Shear Test*, distribuídos pela bacia hidrográfica do Ribeirão Baú (Ilhota/SC), e elaborado um banco de dados georreferenciado dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos. Utilizando o referido banco de dados, foram elaborados 15 cenários de espacialização dos parâmetros. Após, foram realizadas modelagens de suscetibilidade a deslizamentos translacionais utilizando o *Shallow Landsliding Stability Model* (SHALSTAB), totalizando 210 modelagens. Em todas elas observou-se que o desempenho do SHALSTAB reduziu nas de menor escala. Para a validação das modelagens, utilizou-se 526 superfícies de ruptura estimadas nas cicatrizes de deslizamentos ocorridos no desastre natural de novembro de 2008 para a elaboração de curvas de predição e a determinação da respectiva Área Abaixo da Curva. Também, realizou-se a comparação entre os cenários de maior capacidade preditiva utilizando Índices de Acerto (IA) e Erro (IE) e a taxa IA/IE. A modelagem que melhor se ajustou às cicatrizes dos deslizamentos foi aquela sem espacialização dos parâmetros geotécnicos, por meio da média ponderada utilizando a área das unidades geotécnicas, com *pixel* de 1m.

Palavras-chave: Parâmetros de resistência ao cisalhamento. Deslizamentos. Mapeamento de áreas suscetíveis. SHALSTAB.

ABSTRACT - The goal of this research is to analyze the influence of the spatial distribution of the soil shear strength on the mapping of susceptibility to landslides using mathematical modelling. Firstly, twenty Borehole Shear Tests were performed spatially distributed in entire Ribeirão Baú basin (Ilhota/SC), and a georeferenced database of soil shear strength parameters was developed. Fifteen scenarios with data spatialization were generated from the database of soil shear strength parameters. After, two hundred and ten scenarios were obtained using Shallow Landsliding Stability Model (SHALSTAB) for the modeling of susceptible areas to translational landslides. SHALSTAB performed worse on smaller scale scenarios. The modellings validation was performed using five hundred and twenty-six rupture surfaces estimated in the translational landslide scars occurred in the natural disaster of November 2008, for that Prediction Curves were generated and the Area Under the Curve were calculated. Also, a comparison was made between the scenarios with the highest predictive capacity through the Success (IA) and Error Indexes (IE) and the IA/IE rate. According to the validation results, the scenario with weighted average of the soil data using geotechnical units, with 1-m grid, presented the best fit with the November 2008 scars.

Keywords: Soil shear strength parameters. Landslides. Mapping of susceptible areas. SHALSTAB.

INTRODUÇÃO

O Brasil, em decorrência das condições climáticas e geológico-geomorfológicas, associadas à falta de planejamento da expansão urbana em áreas de encostas, caracteriza-se por possuir áreas suscetíveis e de risco à ocorrência de desastres naturais associados a deslizamentos (Fernandes & Amaral, 2000). Destacam-se os desastres ocorridos nos últimos anos em Santa

Catarina em 2008, Angra dos Reis (RJ) e Morro do Bumba em Niterói (RJ) em 2010, Teresópolis (RJ), Nova Friburgo (RJ) e Petrópolis (RJ) em 2011 e 2013, na Baixada Santista (SP) em 2020 e em Petrópolis (RJ) e Recife (PE) em 2022.

A recorrência, magnitude e os danos causados pelos desastres naturais relacionados aos movimentos de massa e inundações motivaram a promul-

gação da Lei Federal nº. 12.608/2012, que instituiu a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil e estabeleceu diretrizes voltadas à gestão e redução dos riscos associados aos desastres naturais no país. Dentre os objetivos da referida lei, está a implementação de medidas preventivas, pelos municípios, relacionadas à realização de estudos para identificação e avaliação de áreas suscetíveis.

Nesse contexto, ressalta-se o mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos a partir do uso de Sistema de Informação Geográfica (SIG) associado ao mapeamento geotécnico e a modelagens matemáticas. Em relação ao mapeamento geotécnico, na região Sul do país destaca-se a metodologia de Grandes Áreas desenvolvida por Dias (1995), voltada para solos tropicais. Em relação à modelagem matemática, cita-se o modelo computacional em bases físicas *Shallow Landsliding Stability Model* (SHALSTAB).

Entretanto, uma dificuldade na aplicação de modelos preditivos para mapeamento de áreas suscetíveis é a parametrização das propriedades do solo devido às limitações na obtenção de

dados em campo e à realização de análises laboratoriais com uma densidade espacial necessária para definir valores representativos para uma grade contínua (Guimarães et al., 2003).

Nesse sentido, grande parte das pesquisas utilizou parâmetros a partir da generalização de propriedades do solo obtidas em levantamentos de campo (Montgomery et al., 1998; Zizioli et al., 2013; Cervi et al., 2010; Silva, 2006; Benessuti, 2011; Michel et al., 2015) ou de dados secundários (Montgomery & Dietrich, 1994; Fernandes et al., 2001; Ramos et al., 2002; Redivo et al., 2004; Gomes, 2006; Sorbino et al., 2006; Zaindan & Vieira, 2007; Carvalho et al., 2009; Listo & Vieira, 2012; Bispo et al., 2018), porém, admite-se que variações desses parâmetros ao longo da área de estudo interferem no desempenho do modelo.

Nesse sentido, o objetivo deste artigo é analisar a influência da distribuição espacial dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos no mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos com o uso de modelagem matemática.

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo é a bacia hidrográfica do Ribeirão Baú, que se localiza na porção noroeste do município de Ilhota (SC), Vale do Rio Itajaí-Açu (Figura 1), e apresenta área de 62,7km². No desastre natural de novembro de 2008, segundo dados da Defesa Civil estadual, dos municípios atingidos por inundações e movimentos de

massa, Ilhota apresentou o maior número de vítimas fatais, com 46 mortos, além de centenas de desabrigados. Do número de mortes registradas em Ilhota, 18 foram por soterramento devido a deslizamentos associados a fluxos de detritos ocorridos nas encostas da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú (Pereira, 2009).

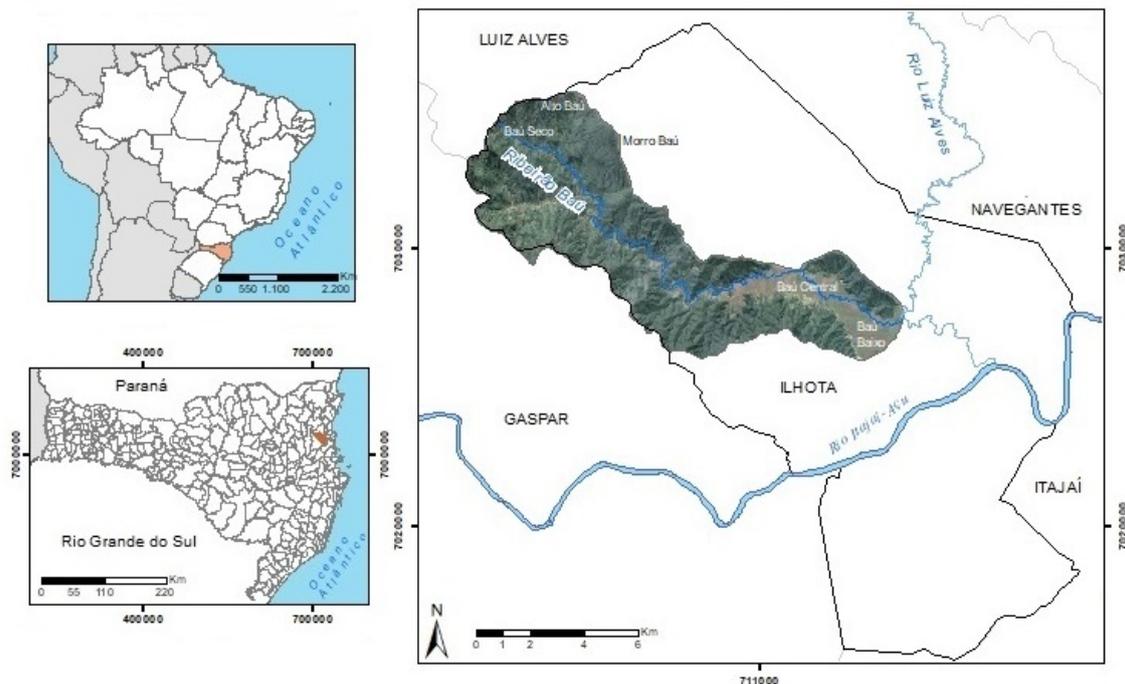


Figura 1 - Localização da bacia do Ribeirão Baú, no município de Ilhota, estado de Santa Catarina (Adaptado de Sbroglia, 2022).

Na elaboração do mapa geotécnico por Sbroglia (2015), foi empregada a metodologia de Mapeamento Geotécnico de Grandes Áreas desenvolvida por Dias (1995). Esse método visa estimar a partir de dados geológicos, pedológicos e topográficos as unidades geotécnicas de uma determinada área, ou seja, unidades de solos com comportamento geotécnico semelhante com base na sua gênese. No mapeamento geotécnico da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú, foram geradas nove unidades geotécnicas, sendo sete resultantes de solos residuais e duas de solos sedimentares, representadas na figura 2a, sendo

elas: Litólico substrato de arenito (Ra) e de conglomerado (Rc); Cambissolo substrato de gnaisse (Cgn), de piroxenito (Cpi), de arenito (Ca), de conglomerado (Cc), de folhelho (Cf) e de depósito de encostas (Cde); Gleissolo substrato de sedimentos quater-nários aluviais (GHsq).

A figura 2b, por sua vez, apresenta o mapa com os modelados de relevo elaborado com base nos dados levantados por Tomazzoli *et al.* (2012), sendo divididos, do mais declivoso ao mais suave, em: escarpado, montanhoso, colinoso, rampas de colúvio e planície aluvial.

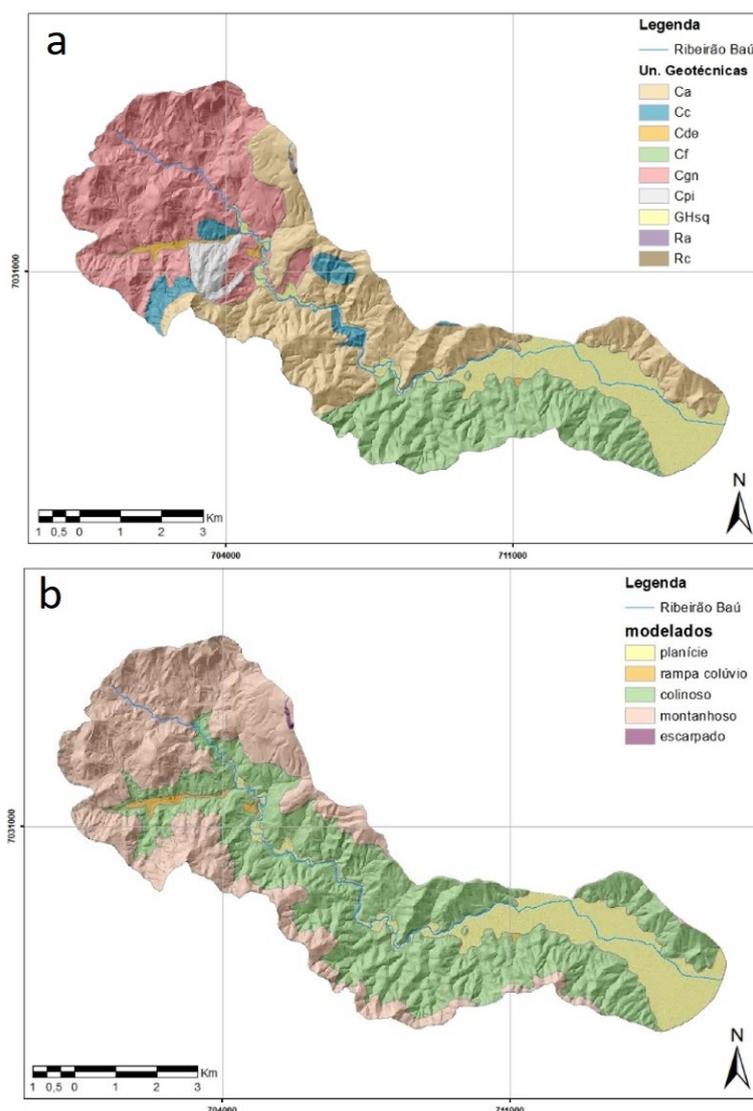


Figura 2 - Unidades geotécnicas (a) e Modelados de relevo na bacia hidrográfica do Ribeirão Baú (b). (Adaptado de Sbroglia, 2022).

As unidades geotécnicas GHsq e Cde ocupam inteiramente (100%) os tipos de relevo de planície e rampas de colúvio, respectivamente. No relevo colinoso localiza-se 43% da unidade geotécnica Ca, 35% de Cf, 15% de Cgn, 4% de Cc e 2% de Cpi. No modelado de relevo

montanhoso, por sua vez, localiza-se 62% de Cgn, 24% de Ca, 8% de Cf, 4% de Cc e 3% de Cpi. E, por fim, o relevo escarpado é composto pelas unidades geotécnicas Ra (51%) e Rc (49%). Essas informações podem ser observadas no gráfico apresentado na figura 3.

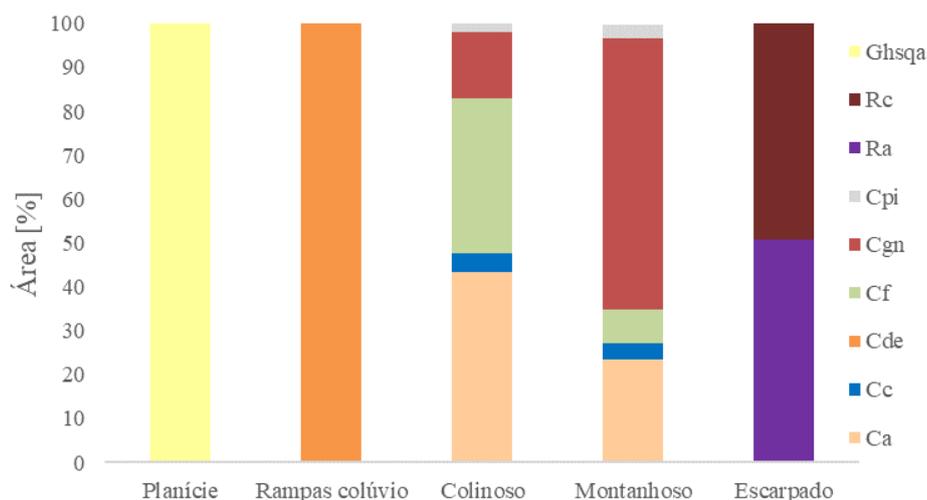


Figura 3 - Unidades geotécnicas por tipo de relevo na bacia hidrográfica do Ribeirão Baú (Fonte: Sbroglia, 2022).

MATERIAIS E MÉTODOS

Para o mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais, foi utilizado o modelo matemático SHALSTAB. Os dados de entrada referem-se às variáveis espaciais topográficas declividade e área de contribuição por comprimento de contorno unitário. As variáveis referentes aos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos, intercepto de coesão e ângulo de atrito, foram determinadas em campo, por meio do *Borehole Shear Test* (BST), e adquiridas de um banco de dados georreferenciado. Quanto à espessura de ruptura do solo, foram utilizados valores fixos e espacializados por meio de equações matemáticas.

Obtenção dos parâmetros topográficos

As variáveis topográficas utilizadas na modelagem, declividade (θ), em graus, e área de contribuição (a), em m^2 , foram obtidas em formato matricial (*raster*) a partir do MDE com resolução espacial de 1 e 10 metros (disponibilizados pela Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável de Santa Catarina - SDE/SC, de 2012, e pela Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina - EPAGRI, de 1981, respectivamente).

Para elaborar o mapa de direções de fluxo, necessário para a confecção do mapa de área de contribuição (a), foi utilizada a extensão *Terrain Analysis Using Digital Elevation Models* (TauDEM), a qual considera direções de fluxo infinitas, definidas de acordo com a diferença de altimetria entre o *pixel* central e os adjacentes. O comprimento de contorno (b) corresponde ao tamanho do *pixel* do MDE, em metros.

Obtenção dos parâmetros geotécnicos

Para a caracterização da resistência ao

cisalhamento dos solos na área de estudo foram realizados ensaios de campo com a utilização do equipamento *Borehole Shear Test* (BST), modelo A103. O procedimento de execução do ensaio foi conforme as instruções do fabricante, de *Handy Geotechnical Instruments*.

Realizou-se saídas de campo (totalizando sete dias), nas quais foram executados 20 ensaios BST distribuídos espacialmente pela área de estudo, abrangendo todas as unidades geotécnicas (exceto as unidades de solo litólico – área íngreme, e de sedimentos quaternários – área plana) e levando-se em consideração os modelados de relevo (montanhoso, colinoso e rampas de colúvio).

Pretendeu-se realizar uma distribuição uniforme pela bacia hidrográfica, uma vez que seria realizada a interpolação dos dados, contudo, algumas áreas não foram possíveis de serem acessadas devido às restrições físicas (topográfica) ou por serem propriedades privadas.

Os ensaios foram realizados no horizonte C dos solos, para isso, foram executadas tradagens com a utilização de um trado pedológico manual de 65mm de diâmetro nas profundidades entre 0,40 e 0,90m (Figura 4a).

Antes da execução do ensaio, o furo foi inundado, a fim de eliminar a parcela de sucção presente no solo, e aguardou-se cerca de 15 minutos (Figura 4b).

Com o equipamento instalado (Figura 4c), aplicou-se a tensão normal acionando a bomba manual até a pressão desejada, indicada no leitor (Figura 4d). As tensões normais aplicadas variaram de 25 a 95kPa. O tempo de consolidação nos ensaios variou de 10 minutos para os solos are-

nosos e 15 minutos para os solos argilosos.

Realizou-se esse procedimento para três a quatro estágios de tensão normal. A partir dos dados obtidos nos estágios do ensaio, elaborou-se um gráfico de tensão cisalhante máxima

versus tensão normal ($\tau_{\text{máx}} \times \sigma$), e obtiveram-se os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo, intercepto coesivo (c) e ângulo de atrito (ϕ), por meio do critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

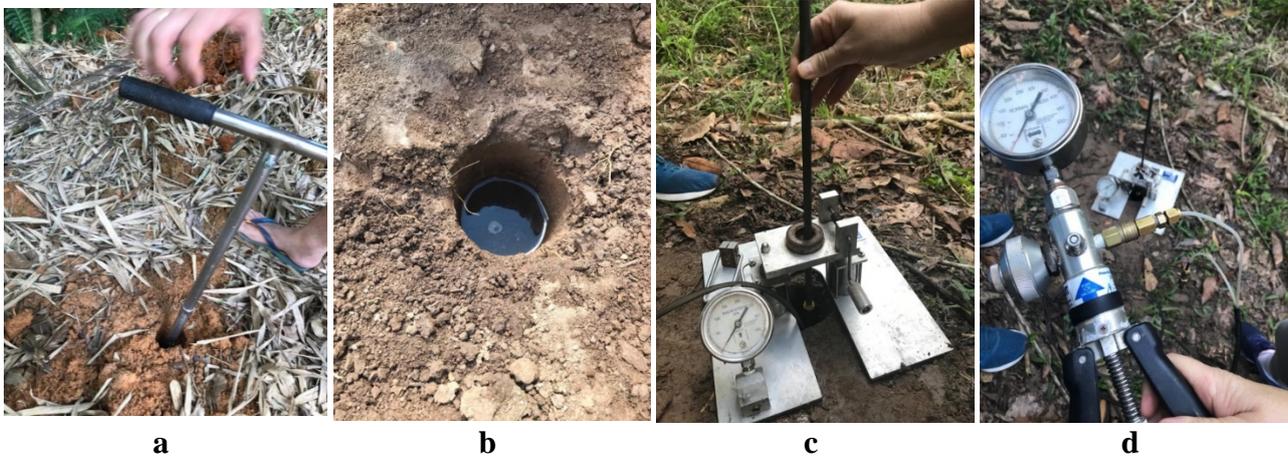


Figura 4 - Realização do furo com trado pedológico (a); inundação para a realização do ensaio (b); montagem do equipamento (c); execução do ensaio BST na área de estudo (d). **Fonte:** Adaptado de Sbroglia (2022)

Banco de dados de parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú

Para a composição do banco de dados georreferenciado dos parâmetros geotécnicos, intercepto coesivo (c), ângulo de atrito (ϕ) e peso específico saturado (γ_{sat}), foram utilizados os

dados obtidos dos ensaios BST executados em campo, que são apresentados em Sbroglia (2022), e os dados adquiridos em outros trabalhos acadêmicos (Parizoto, 2014; Sbroglia, 2015; Flach, 2020) e em um projeto na área de geotecnia (Dias et al., 2015). A localização dos dados, conforme fonte, está indicada na Figura 5.

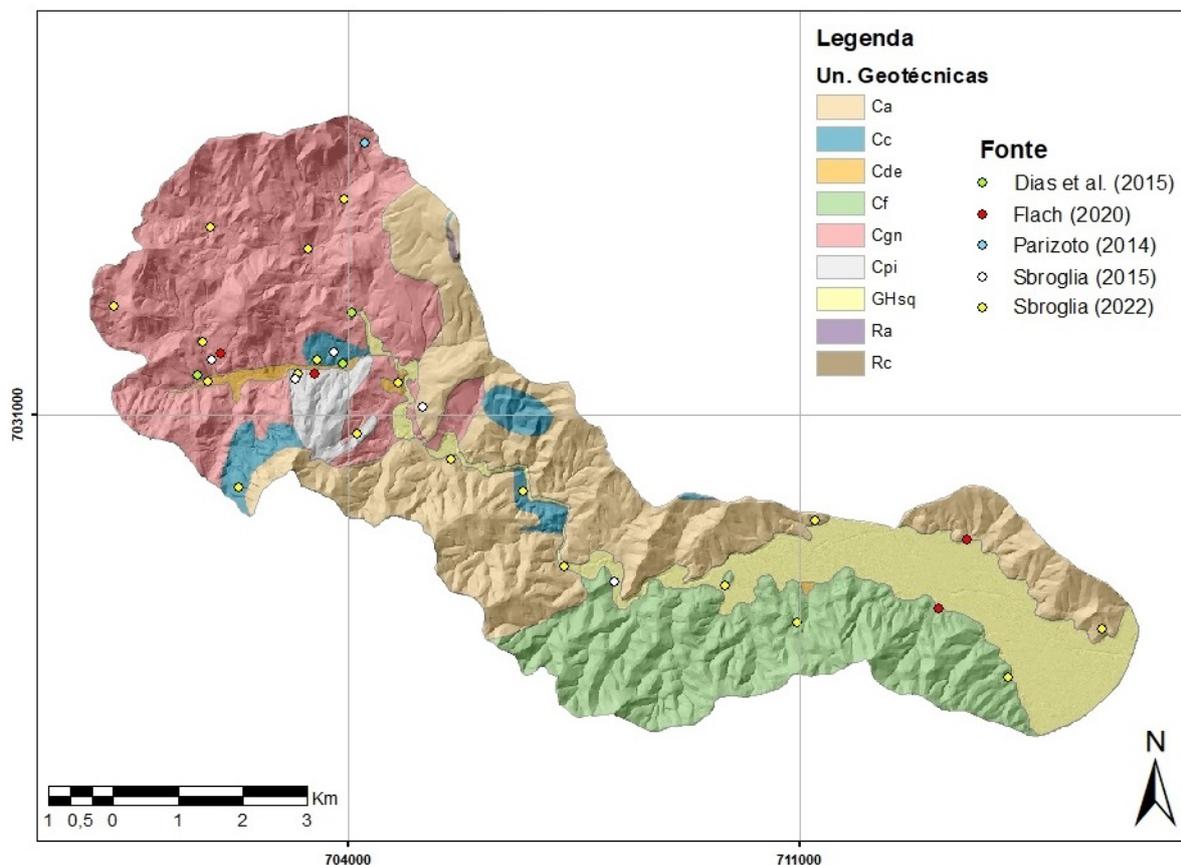


Figura 5 - Mapa geotécnico com a localização dos ensaios ou da coleta do corpo de prova para obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos (Adaptado de Sbroglia, 2022).

Espacialização dos parâmetros geotécnicos

A partir do banco de dados georreferenciado de parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú, foram espacializados os parâmetros c , ϕ e γ_{sat} em diferentes cenários: por meio do mapa geotécnico (Figura 2a), de modelados de relevo (Figura 2b); e por meio de intervalos de altitude, de declividade, de orientação e de forma das encostas, os quais foram elaborados a partir dos Modelos Digital de Elevação (resolução espacial de 1 e 10m), em um *software* de geoprocessamento.

Ainda, a partir da malha aleatória de pontos

georreferenciados do banco de dados (Figura 5), foi realizada a interpolação, em um *software* de geoprocessamento, por meio da ferramenta de geoestatística denominada *krigagem*. Por fim, foi elaborado um cenário complementar utilizando o levantamento de dados da literatura para a bacia hidrográfica do Rio Itajaí-Açu, o qual totalizou 115 parâmetros, a partir do banco de dados georreferenciado construído por Sbroglia (2022) para a zona costeira de Santa Catarina. Dessa forma, no total, foram gerados 15 cenários, 6 sem e 9 com espacialização dos parâmetros geotécnicos, conforme descritos na Figura 6.

SEM ESPACIALIZAÇÃO DOS DADOS		
A	Média Literatura	média aritmética para cada um dos valores de c , ϕ e γ_{sat} do banco de dados da bacia hidrográfica do Rio Itajaí-Açu elaborado por Sbroglia (2022)
B	Média	média aritmética para cada um dos valores de c , ϕ e γ_{sat} do banco de dados da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú
C	Média Ponderada (geotecnia)	média ponderada calculada por meio da área dos polígonos das unidades geotécnicas, para cada um dos valores de c , ϕ e γ_{sat} do banco de dados da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú
D	Média Ponderada (modelado relevo)	média ponderada calculada por meio da área dos polígonos dos modelados de relevo, para cada um dos valores de c , ϕ e γ_{sat} do banco de dados da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú
E	Menos Conservador	atribuídos os maiores valores de c e ϕ e o menor valor de γ_{sat} do banco de dados da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú
F	Mais Conservador	atribuídos os menores valores de c e ϕ e o maior valor de γ_{sat} do banco de dados da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú
COM ESPACIALIZAÇÃO DOS DADOS		
G	Média Literatura (geotecnia)	média aritmética para cada um dos valores de c , ϕ e γ_{sat} do banco de dados da bacia hidrográfica do Rio Itajaí-Açu para cada unidade geotécnica elaborado por Sbroglia (2022)
H	Média (geotecnia)	média aritmética para cada um dos valores de c , ϕ e γ_{sat} do banco de dados da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú para cada unidade geotécnica
I	Média (modelado relevo)	média aritmética para cada um dos valores de c , ϕ e γ_{sat} do banco de dados da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú para cada modelado de relevo
J	Média (geotecnia + modelado relevo)	média aritmética para cada um dos valores de c , ϕ e γ_{sat} do banco de dados da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú para cada unidade geotécnica e modelado de relevo
K	Média (altitude)	média aritmética para cada um dos valores de c , ϕ e γ_{sat} do banco de dados da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú para cada intervalo de altitude
L	Média (declividade)	média aritmética para cada um dos valores de c , ϕ e γ_{sat} do banco de dados da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú para cada intervalo de declividade em graus
M	Média (orientação encosta)	média aritmética para cada um dos valores de c , ϕ e γ_{sat} do banco de dados da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú para cada tipo de orientação das encostas
N	Média (forma encosta)	média aritmética para cada um dos valores de c , ϕ e γ_{sat} do banco de dados da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú para cada tipo de forma das encostas
O	Interpolação	interpolação dos valores de c , ϕ e γ_{sat} do banco de dados por meio de krigagem para a área da bacia hidrográfica

Figura 6 - Cenários de espacialização dos parâmetros geotécnicos (Adaptado de Sbroglia, 2022).

Para o parâmetro profundidade de ruptura do solo (z), é frequente sua utilização de forma genérica, empregando-se um valor constante para toda

a área de estudo. Nesta pesquisa, levando-se em consideração que os resultados do modelo SHALSTAB dependem, sobretudo, da qualidade

dos dados de entrada, optou-se por utilizar 7 cenários, 4 deles sem a espacialização dos dados: profundidades constantes de 2, 5, 7 e 10 metros,

e 3 deles elaborados a partir da espacialização do valor de z ao longo da bacia hidrográfica por meio de equações matemáticas, conforme tabela 1.

Tabela 1 - Equação matemática para obtenção do parâmetro de espessura de ruptura do solo utilizado nos cenários para a modelagem com o SHALSTAB.

Cenários		Equação matemática	Fonte
zE	Em função da elevação	$z_i = z_{max} - \left(\frac{z_{max} - z_{min}}{e_{max} - e_{min}} \right) \cdot (e_i - e_{min})$	Saulnier et al. (1997)
zD	Em função da declividade	$z_i = z_{max} - \left(\frac{z_{max} - z_{min}}{\tan\theta_{max} - \tan\theta_{min}} \right) \cdot (\tan\theta_i - \tan\theta_{min})$	Saulnier et al. (1997)
zM	Média entre elevação e declividade	$z_i = \frac{zE + zD}{2}$	Silva (2010)

Onde: z_i é a profundidade do solo em determinado ponto, em m; e_i é a elevação no mesmo ponto, em m; z_{max} e z_{min} são valores máximo e mínimo para a profundidade, respectivamente; e_{max} e e_{min} são valores máximo e mínimo de elevação na bacia hidrográfica, respectivamente; θ_{max} e θ_{min} são a declividade máxima e mínima da bacia, respectivamente; e θ_i é a declividade da encosta em determinado ponto, em graus.

Adotou-se, nas equações, a profundidade mínima (z_{min}) e máxima (z_{max}) da superfície de ruptura do solo os valores de 0 e 10 metros, respectivamente, conforme média das observações em campo das profundidades nas cicatrizes dos deslizamentos ocorridos em novembro de 2008.

Modelagem com o SHALSTAB

Para a elaboração dos cenários de suscetibilidade a deslizamentos translacionais da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú foi utilizado o modelo *Shallow Slope Stability Model* (SHALSTAB). Desenvolvido nos EUA por Montgomery & Dietrich (1994), o SHALSTAB é um modelo matemático determinístico utilizado na identificação de áreas suscetíveis a ocorrência de deslizamentos translacionais rasos. Posteriormente, foi automatizado para utilização em SIG por Dietrich & Montgomery (1998), tornando possível a espacialização dos dados.

A fundamentação matemática é composta pela combinação de dois modelos: um hidrológico, que considera um estado uniforme de recarga e utiliza parâmetros geomorfológicos e hidrológicos na estimativa do grau de saturação do terreno e o outro de estabilidade de encosta, que utiliza parâmetros geotécnicos e topográficos para calcular a estabilidade de uma determinada porção de solo com base na teoria de taludes infinitos. Para a modelagem, foi utilizada a ferramenta *Automatic SHALSTAB Analysis* (ASA), a qual foi descrita por Sbroglia et al. (2017), contendo a rotina automatizada da equação matemática do SHALSTAB (Equação 1). Dessa forma, utilizando um *software* de geoprocessamento, foi obtido como dado de saída um mapa em formato matricial (*raster*) com as sete classes referentes às condições de estabilidade das encostas, expressas em função de $\text{Log}(q/T)$, conforme figura 7.

$$\text{Log} \frac{q}{T} = \frac{b}{a} \cdot \text{sen} \theta \cdot \left[\frac{c'}{\gamma_w \cdot g \cdot z \cdot \cos^2 \theta \cdot \tan \varphi} + \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \cdot \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \varphi} \right) \right] \quad (1)$$

Onde: q é a taxa de recarga uniforme, em mm/d; T é a transmissividade, em m²/d; a é a área de contribuição a montante, em m²; b é o comprimento de contorno unitário, em m; θ é a declividade, em graus; γ_s é o peso específico do solo [kN/m³]; γ_w é o peso específico da água [kN/m³]; φ é o ângulo de atrito entre os grãos, em graus; c é a coesão, em kPa; g é a aceleração da gravidade, em m/s²; e z é a espessura do solo, em m.

Classes de estabilidade	
	Incondicionalmente instável
	< -3,1
	-3,1 a -2,8
	-2,8 a -2,5
	-2,5 a -2,2
	> -2,2
	Incondicionalmente estável

Figura 7 - Classes de estabilidade geradas pela modelo SHALSTAB em função de $\text{Log}(q/T)$ (Sbroglia (2022)).

Identificação dos cenários de maior capacidade preditiva

A validação dos cenários de suscetibilidade a deslizamentos foi realizada por meio da elaboração das curvas de predição, conforme Chung & Fabbri (2003), e da determinação da respectiva Área Abaixo da Curva (AAC).

Essas curvas relacionam a porcentagem acumulada de cada classe de estabilidade do SHALSTAB (eixo das abcissas) com a porcentagem acumu-

lada da área deslizada em cada uma dessas classes (eixo das ordenadas), ambos os eixos devem se apresentar de maneira decrescente, iniciando pela classe mais instável (Figura 8).

Dessa forma, dentre as curvas elaboradas, a

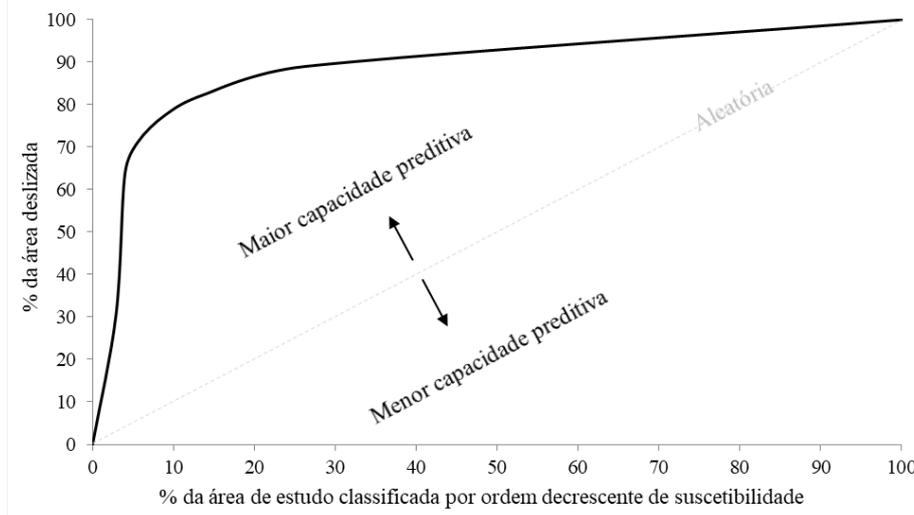


Figura 8 - Modelo de curva de predição (Fonte: Sbroglia, 2022).

Para a elaboração das curvas de predição foram utilizadas as 526 superfícies de ruptura mapeadas do inventário de cicatrizes de deslizamentos ocorridos na bacia hidrográfica do Ribeirão Baú em novembro de 2008, classificados como translacionais.

A partir das curvas de predição, foi possível calcular a Área Abaixo da Curva (AAC), os valores obtidos variam de 0 a 1. Segundo Beguería (2006), quanto mais próximo de 1, melhor é a qualidade da modelagem; valor de AAC de 0,5, expresso pela linha diagonal da curva de predição (Figura 6), relaciona-se a uma classificação aleatória; e valores abaixo de 0,5 evidenciam modelos com uma capacidade preditiva menor que o aleatório, não devendo ser considerados.

Ainda, foi realizada a comparação entre o desempenho dos cenários de suscetibilidade a deslizamentos que apresentaram maior capacidade preditiva por meio do Índice de Acerto (IA) e Índice de Erro (IE) propostos por Sorbino et al. (2010).

O Índice de Acerto (IA) representa a

que se distanciar do eixo das abcissas e alcançar a proporção de 100% das células deslizadas mais rapidamente é a que representa o cenário de maior capacidade preditiva de deslizamentos (Remondo et al., 2003).

porcentagem de área definida como instável pelo SHALSTAB, representada pela classe incondicionalmente instável e classe $\text{Log}(q/T) < -3,1$, que coincide com a área de ocorrência das superfícies de ruptura nas cicatrizes de deslizamentos.

O Índice de Erro (IE) representa a razão percentual entre as áreas definidas como instáveis pelo modelo que não coincidem com a área de ocorrência das superfícies de ruptura e as áreas da bacia hidrográfica que não foram afetadas por deslizamentos.

Para os autores, o cenário que melhor descreve o fenômeno é aquele que obtém a maior relação IA/IE. Nesse sentido, por meio dessa análise é avaliada a taxa de acerto do modelo em representar áreas instáveis nos locais onde de fato ocorreram deslizamentos juntamente a capacidade de não superestimar as áreas instáveis.

Valores abaixo de 1 indicam muitas áreas consideradas instáveis pelo modelo localizadas no exterior da cicatriz de deslizamento, em relação às áreas localizadas no interior (Sorbino et al., 2010).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para compor o banco de dados georreferenciados dos parâmetros c , ϕ e γ , no total, foram levantados 37 dados para a bacia hidrográfica do Ribeirão Baú, sendo 34 de trabalhos acadêmicos (Parizoto, 2014; Sbroglia, 2015; Flach, 2020; Sbroglia, 2022) e 3 de projeto de pesquisa na área de geotecnia (Dias et al., 2015).

A tabela 2 apresenta as médias dos parâmetros

de resistência ao cisalhamento. Para o referido banco de dados, a média entre todos os valores do intercepto de coesão foi de 8,99kPa e do ângulo de atrito foi de 26,97° (Tabela 2).

Os menores valores obtidos de intercepto coesivo são 2,30kPa (C_{gn} de relevo montanhoso) e 2,94kPa (C_f de relevo colinoso), enquanto o maior valor é de 27,00kPa (C_{gn} de relevo colinoso);

Tabela 2 - Média dos valores dos parâmetros para o banco de dados da bacia hidrográfica (BH). (Adaptado de Sbroglia, 2022).

	Número de dados	Média do intercepto coesivo [kPa]	Média do ângulo de atrito [grau]
Unidades Geotécnicas			
<i>Ca</i>	7	8,35	27,03
<i>Cc</i>	4	5,24	27,79
<i>Cde</i>	2	7,39	27,52
<i>Cf</i>	6	6,38	25,43
<i>Cgn</i>	12	12,47	28,65
<i>Cpi</i>	6	8,42	24,35
Modelados de Relevo			
<i>Montanhoso</i>	7	9,25	28,53
<i>Colinoso</i>	28	9,04	26,54
<i>Rampas de Colúvio</i>	2	7,39	27,52
BH	37	8,99	26,97

o menor valor de ângulo de atrito é de 15,80° (Cpi de relevo colinoso) e o maior de 38,90° (Cgn de relevo colinoso).

Para o parâmetro peso específico saturado dos solos, foram obtidos 8 dados, observou-se que ele não apresentou variação significativa entre os valores levantados, variando de 16,67 a 20,35kN/m³.

Entre as unidades geotécnicas, Cgn foi a que apresentou a maior média para o parâmetro intercepto coesivo, de 12,47kPa, enquanto Cf apresentou a menor, de 5,24kPa; para o parâmetro ângulo de atrito, Cgn foi a que apresentou a maior média, de 28,65°, e Cpi foi a menor, de 24,35°.

Entre os modelados de relevo, o montanhoso foi que apresentou a maior média de intercepto

coesivo, de 9,25kPa, e rampas de colúvio apresentaram a menor média, de 7,39kPa; em relação ao ângulo de atrito, o relevo montanhoso apresentou a maior média, de 28,53° e o relevo colinoso apresentou a menor, de 26,54°.

A partir do banco de dados georreferenciado dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú, foram gerados cenários com diferentes formas de distribuição espacial dos dados. Para isso, foi calculada, para cada classe dos mapas, a média entre os parâmetros, conforme apresentado na tabela 3, utilizando dados da literatura para a bacia hidrográfica do Rio Itajaí-Açu e os mapas geotécnico e de modelados de relevo.

Tabela 3 - Média dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos para cada cenário de espacialização dos dados (mapa geotécnico e de modelados de relevo) (Fonte: Sbroglia, 2022).

Classes	Número de dados	Intercepto coesivo	Ângulo de atrito	Peso esp. Saturado
		[kPa]	[grau]	[kN/m ³]
Unidades Geotécnicas - Literatura				
<i>Ca</i>	27	12,82	29,71	19,23
<i>Cc</i>	2	15,10	24,75	18,01
<i>Cde</i>	21	10,40	32,16	19,55
<i>Cf</i>	8	9,67	28,74	19,47
<i>Cgn</i>	45	12,22	29,47	17,61
<i>Cpi</i>	12	18,80	29,01	19,00
Unidades Geotécnicas – Banco de dados Bacia Hidrográfica				
<i>Ca</i>	7	8,35	27,03	19,00
<i>Cc</i>	4	5,24	27,79	18,01
<i>Cde</i>	2	7,39	27,52	19,55
<i>Cf</i>	6	6,38	25,43	18,39
<i>Cgn</i>	12	12,47	28,65	19,50
<i>Cpi</i>	6	8,42	24,35	16,67
Modelados de relevo				
<i>Colinoso</i>	28	9,04	26,54	18,58
<i>Montanhoso</i>	7	9,25	28,53	20,35
<i>Rampas de colúvio</i>	2	7,39	27,52	19,55
Unidades Geotécnicas e Modelados de relevo				
<i>Ca colinoso</i>	7	8,35	27,03	19,00
<i>Cc colinoso</i>	3	5,43	27,70	18,01
<i>Cc montanhoso</i>	1	4,67	28,07	18,01
<i>Cde rampas de colúvio</i>	2	7,39	27,52	19,55
<i>Cf colinoso</i>	6	6,38	25,43	18,39
<i>Cgn colinoso</i>	6	14,92	28,70	19,13
<i>Cgn montanhoso</i>	6	10,02	28,60	20,35
<i>Cpi colinoso</i>	6	8,42	24,35	16,67

Tabela 4 - Média dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos para cada cenário de espacialização dos dados (altitude, declividade, orientação e forma das encostas). (Fonte: Sbroglia, 2022)

Classes	Resolução espacial 1m				Resolução espacial 10m			
	Número de dados	Intercepto coesivo	Ângulo de atrito	Peso esp. saturado	Número de dados	Intercepto coesivo	Ângulo de atrito	Peso esp. saturado
		[kPa]	[grau]	[kN/m ³]		[kPa]	[grau]	[kN/m ³]
Altitude (metros)								
0-50	11	7,85	26,12	18,39	9	8,03	26,02	18,39
50-100	2	4,34	27,28	-	3	6,00	27,56	-
100-150	3	13,46	31,16	19,59	6	9,11	29,17	19,06
150-200	10	8,33	26,68	18,04	7	9,53	25,49	17,31
200-250	6	10,63	25,93	-	7	10,10	26,77	19,52
250-300	1	8,67	28,07	-	1	8,67	28,07	-
300-350	1	4,67	28,07	-	1	4,67	28,07	-
350-400	1	6,33	25,02	-	2	9,17	24,23	-
400-450	2	15,26	29,57	20,35	1	18,51	35,70	20,35
Declividade (graus)								
0-5	5	7,85	28,12	-	5	9,77	25,41	-
5-10	9	6,55	27,52	18,77	9	8,28	28,43	18,86
10-15	3	11,46	26,84	20,35	9	8,36	25,52	18,51
15-20	11	9,75	25,95	18,45	4	10,16	27,32	18,48
20-25	7	9,64	25,04	16,67	3	7,87	26,45	19,52
25-30	-	-	-	-	2	6,61	24,73	-
30-35	2	12,64	34,22	20,18	5	11,32	29,46	-
Orientação da encosta								
Norte	6	6,15	27,32	-	3	9,32	25,23	16,67
Nordeste	4	8,79	24,43	-	6	5,96	26,39	19,52
Leste	3	5,90	26,78	18,39	4	10,78	26,08	17,95
Sudeste	9	10,50	28,95	19,51	5	13,04	29,09	19,37
Sul	4	15,77	28,43	17,95	6	8,13	26,42	18,01
Sudoeste	3	7,32	29,31	19,52	3	11,96	32,77	20,18
Oeste	4	8,02	24,58	19,00	3	8,36	26,00	19,00
Noroeste	4	7,82	23,87	16,67	7	7,26	25,61	-
Forma da encosta								
Côncava	20	10,34	27,14	18,76	23	9,03	26,40	18,70
Retilínea	4	5,25	26,55	-	6	6,40	26,67	18,39
Convexa	13	8,06	26,85	-	8	10,82	29,88	19,10

Na tabela 4, a média entre os parâmetros foi calculada utilizando os mapas de altitude, declividade, orientação e formas das encostas.

A partir dos dados apresentados nas tabelas supramencionadas foi possível elaborar os cenários, em um *software* de geoprocessamento, divididos em “sem espacialização dos parâmetros dos solos”, na qual foi empregado um único valor de c , ϕ e γ_{sat} para toda a área da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú, por meio de média aritmética em A (dados da literatura) e B (dados da área de estudo), de média ponderada em C (polígonos das unidades geotécnicas) e D (polígonos dos modelados de relevo), e dos dados menos (E) e mais conservadores (F); e em “com espacialização dos parâmetros dos solos”,

a espacialização foi realizada por meio dos polígonos das unidades geotécnicas em G (dados da literatura) e em H (dados da área de estudo), dos modelados de relevo em I, de ambos em J, por intervalo de altitude em K, por intervalo de declividade em L, por orientação da encosta em M, por forma da encosta em N e por interpolação dos dados em O.

Os valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos utilizados para elaboração de cada um desses cenários são apresentados na tabela 5.

Para a interpolação por meio de *krigagem*, por sua vez, foi utilizada toda a malha de pontos dos valores dos parâmetros dos solos do banco de dados georreferenciado da bacia hidrográfica (BH).

Tabela 5 - Valores dos parâmetros geotécnicos utilizados nos cenários para a modelagem. (Fonte: Sbroglia, 2022).

Cenários		Intercepto coesivo	Ângulo de atrito	γ_{sat}
		[kPa]	[grau]	[kN/m ³]
SEM ESPACIALIZAÇÃO DOS DADOS				
A	Média Literatura	13,22	29,84	18,51
B	Média Aritmética	8,99	26,97	18,76
C	Média Ponderada (geotecnia)	9,24	27,21	18,76
D	Média Ponderada (modelados de relevo)	9,12	27,43	19,19
E	Menos Conservador	27,00	38,9	16,67
F	Mais Conservador	2,30	15,80	20,35
COM ESPACIALIZAÇÃO DOS DADOS				
G	Média Literatura (geotecnia)	Conforme dados da Tabela 3		
H	Média (geotecnia)	Conforme dados da Tabela 3		
I	Média (modelado relevo)	Conforme dados da Tabela 3		
J	Média (geotecnia+modelado relevo)	Conforme dados da Tabela 3		
K	Média (altitude)	Conforme dados da Tabela 4		
L	Média (declividade)	Conforme dados da Tabela 4		
M	Média (orientação da encosta)	Conforme dados da Tabela 4		
N	Média (forma da encosta)	Conforme dados da Tabela 4		
O	Interpolação (<i>krigagem</i>)	Banco de dados da BH Ribeirão Baú		

Para a elaboração das modelagens de suscetibilidade a deslizamentos translacionais da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú foi utilizado o modelo *Shallow Slope Stability Model* (SHALSTAB). Os dados de entrada para a modelagem foram variáveis topográficas declividade (θ) e área de contribuição por comprimento de contorno unitário (a/b) obtidas dos MDE com resolução espacial de 1 e 10 metros, e às variáveis referentes aos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos, intercepto de coesão (c), ângulo de atrito (ϕ) e peso específico saturado (γ_{sat}) distribuídas em 15 cenários, 6 sem espacialização dos parâmetros geotécnicos (A a F) e 9 com espacialização (G a O). Quanto à espessura de ruptura do solo (z), foram utilizados 7 cenários, 4 com valores constantes, de 2, 5, 7 e 10 metros, e 3 nos quais realizou-se a espacialização por meio de equações matemáticas em função da elevação (zE), em função da declividade (zD) e a média entre eles (zM).

No total, foram geradas 210 modelagens de suscetibilidade a deslizamentos translacionais na bacia hidrográfica do Ribeirão Baú, 105 com resolução espacial de 1m e 105 com resolução espacial de 10m. A Figura 9 apresenta os gráficos com a porcentagem da área nas sete classes de estabilidade do modelo, em cada modelagem de suscetibilidade a deslizamentos, subdivididos pelos cenários de espacialização da espessura de ruptura do solo (z).

Com base nos gráficos apresentados, foi possível observar que, para ambas as resoluções

espaciais, a variação dos parâmetros dos solos influencia na ocorrência das sete classes de estabilidade do SHALSTAB, sobretudo nas extremas: incondicionalmente estável e incondicionalmente instável. Ao comparar todas as modelagens, observou-se uma maior diferença no percentual de ocorrência das classes extremas entre os cenários menos e mais conservadores.

Em relação à área da classe incondicionalmente estável, ocorreu uma maior variação nos cenários sem espacialização dos dados (A a F), porém, a porcentagem dessa classe nos cenários B, C e D foram mais próximas. Para os cenários com espacialização, os valores das áreas das classes incondicionalmente estável de M e O apresentaram-se similares.

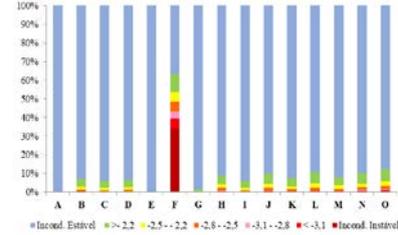
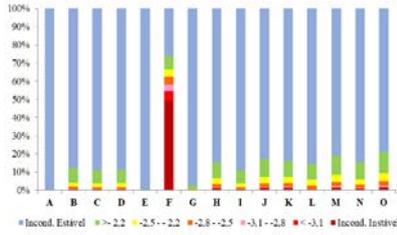
Também foi observado que os cenários elaborados por meio da média dos dados levantados na literatura, para a bacia hidrográfica do Rio Itajaí-Açu, apresentaram valor elevado de áreas estáveis em relação às outras modelagens. Para a espessura do solo de 2 metros, por exemplo, quase a totalidade da área em estudo foi classificada como incondicionalmente estável, tanto para os cenários sem espacialização (A) como para os cenários com espacialização (G) dos parâmetros geotécnicos da literatura.

Em relação à área da classe incondicionalmente instável, por sua vez, de maneira geral, a maior porcentagem de área dessa classe foi decrescente nos cenários da seguinte forma: F, M, O, J, N, H, B, C, D, I, K, L, G, A, E.

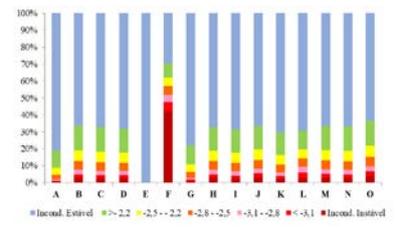
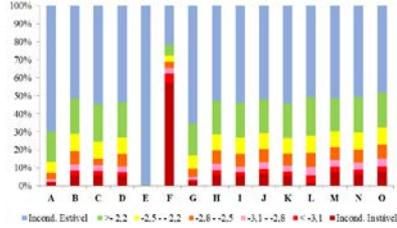
Resolução espacial 1m

Resolução espacial 10m

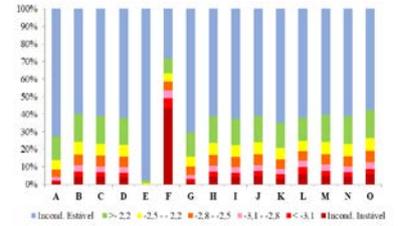
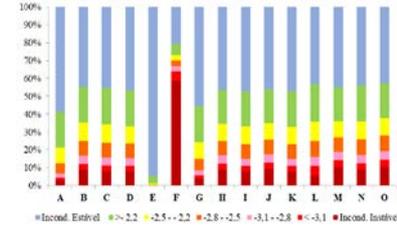
z = 2m



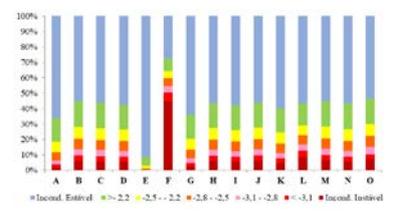
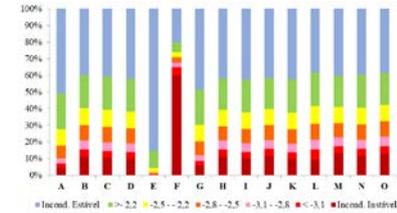
z = 5m



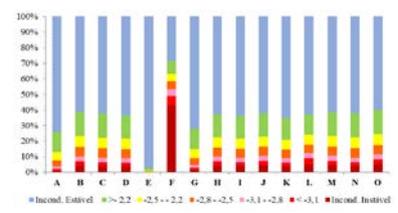
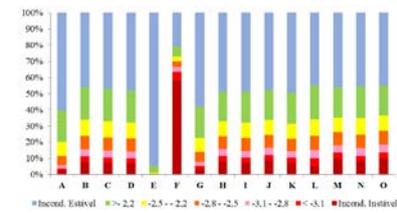
z = 7m



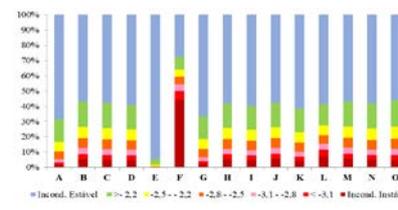
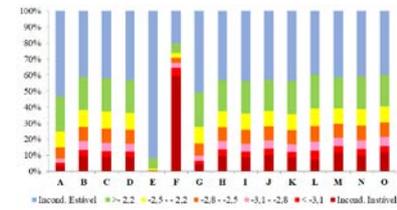
z = 10m



z = E



z = D



z = M

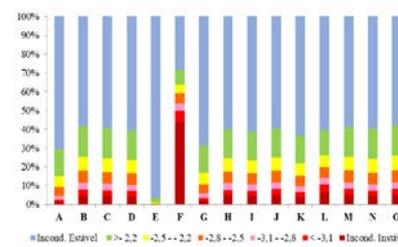
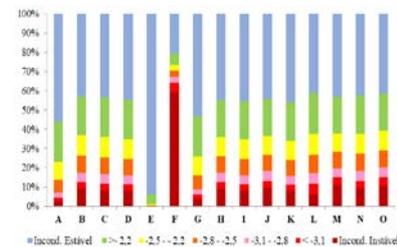


Figura 9 - Gráficos com a área de cada classe de estabilidade do SHALSTAB [%] nas modelagens. (Fonte: Sbroglia, 2022).

A variação mais discrepante entre a área das classes extremas pode ser observada nos cenários menos e mais conservadores, E e F, respectivamente.

De maneira ilustrativa, são apresentadas na Figura 10 as modelagens para a profundidade de ruptura do solo $z = 5\text{m}$, na resolução espacial de

1m, desses dois cenários.

Enquanto 99,5% da bacia hidrográfica foi classificada como incondicionalmente estável em E, apenas 21,5% foi assim classificada em F; e para a classe incondicionalmente instável, abrangeu 57,3% da área de estudo em F e 0% no cenário E.

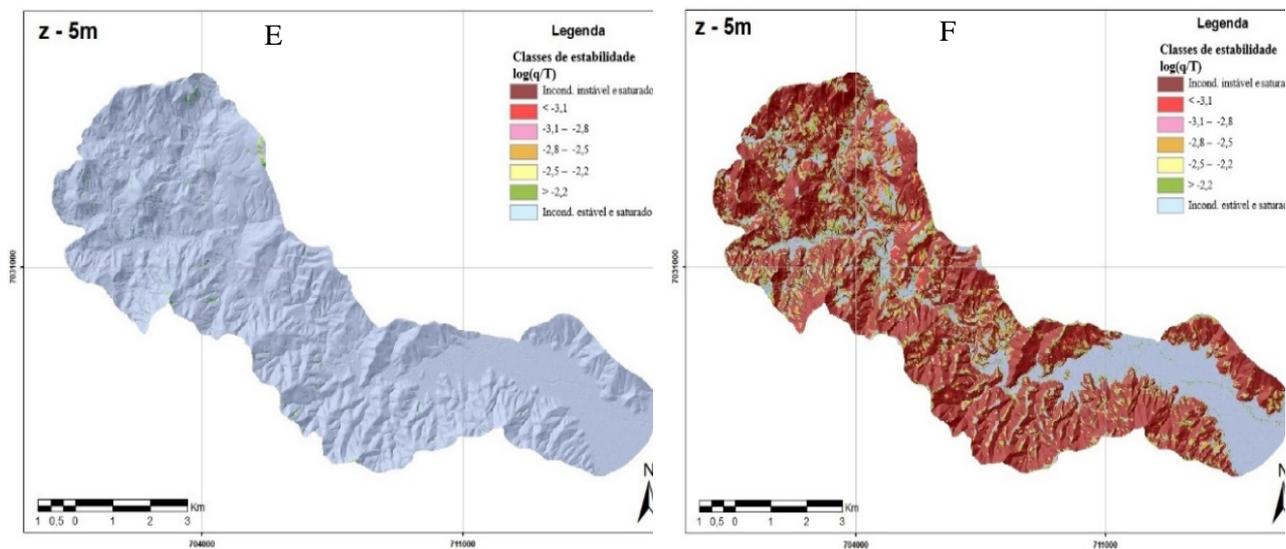


Figura 10 - Modelagens de suscetibilidade a deslizamento na bacia hidrográfica do Ribeirão Baú, cenários denominados E e F, para a profundidade de ruptura do solo $z = 5\text{m}$ e resolução espacial. **Fonte:** Sbroglia (2022).

Ainda, a partir do inventário de cicatrizes dos deslizamentos translacionais ocorridos em novembro de 2008, foram estimadas 526 superfícies de ruptura, as quais foram utilizadas para a análise das modelagens e para validação. Na Figura 11 são apresentados os gráficos com a área das superfícies de ruptura em cada classe de estabilidade do modelo SHALSTAB.

Em relação ao inventário de cicatrizes dos deslizamentos, os resultados que apresentaram mais áreas deslizadas localizadas na classe instável foram os cenários F, M, O, N e B para a resolução de 1m, e F, L, O e B para a resolução de 10m. E os que apresentaram mais áreas deslizadas localizadas na classe estável foram E, A, G e K para ambas as resoluções.

Entretanto, observou-se que os cenários mais e menos conservadores não apresentaram resultados satisfatórios. No cenário E (menos conservador), a maior parte das superfícies de ruptura das cicatrizes localizaram-se na classe incondicionalmente estável, pois quase toda a área da bacia hidrográfica foi assim classificada. Em contrapartida, no cenário F (mais conservador) um elevado percentual de superfícies de ruptura localizou-se na classe incondicionalmente instável, contudo, esse resultado encontra-se diretamente relacionado à

abrangência dessa classe na área de estudo.

Visto que a eficácia do SHALSTAB está relacionada a sua capacidade de prever os locais onde ocorreram os deslizamentos em um baixo percentual de áreas classificadas como instáveis, foi realizada a validação das modelagens para identificação da que melhor se ajustou às cicatrizes mapeadas. Contudo, devido ao elevado número de modelagens realizadas, com o intuito de comparar os diferentes resultados gráficos e definir os cenários de maior capacidade preditiva, recorreu-se ao método quantitativo denominado Área Abaixo da Curva (AAC).

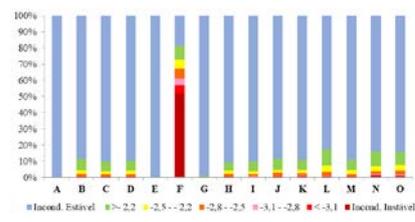
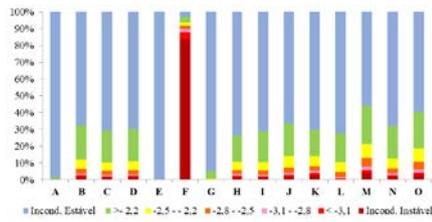
A variação dos valores de AAC calculados com base nas curvas de predição das modelagens foi de 0,500 a 0,717 para a resolução espacial de 1m, e de 0,499 a 0,616 para a resolução espacial de 10m.

Observa-se que, para todas as profundidades de ruptura, os cenários E foram os que apresentaram os menores valores de AAC para ambas as resoluções. Para o referido cenário, a média entre os valores foi de 0,548 e 0,508 para as resoluções de 1 e 10m, respectivamente. Em contrapartida, os cenários que apresentaram os maiores valores de AAC foi o M, média de 0,695, e o F, média de 0,614, para as resoluções de 1 e 10m, respectivamente.

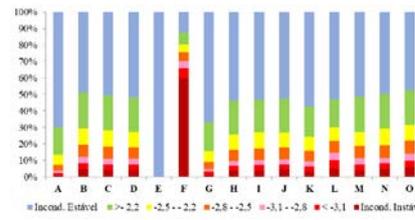
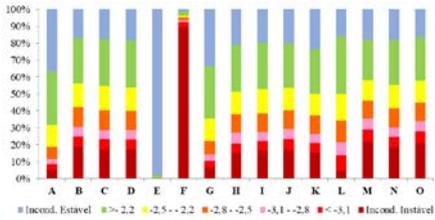
Resolução espacial 1m

Resolução espacial 10m

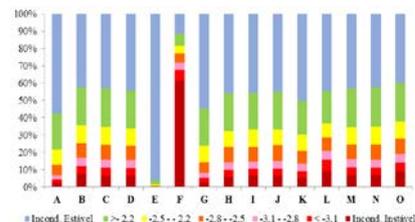
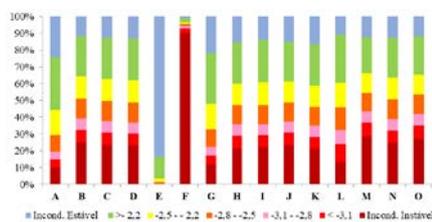
z = 2m



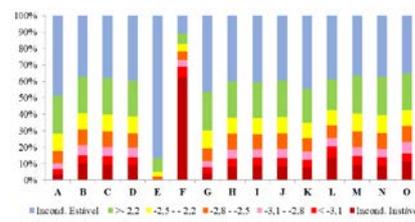
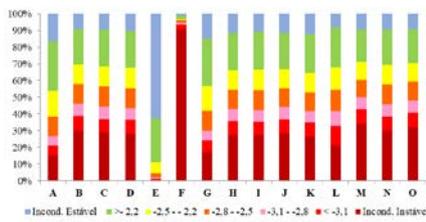
z = 5m



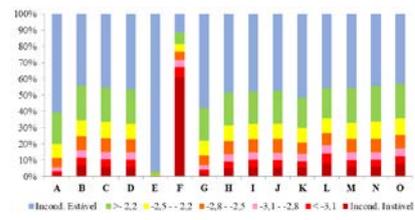
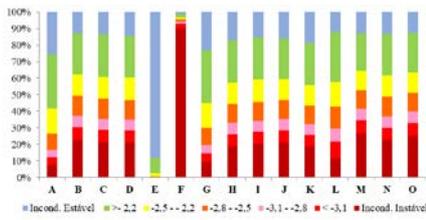
z = 7m



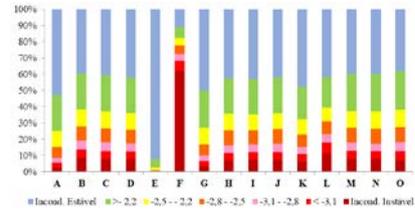
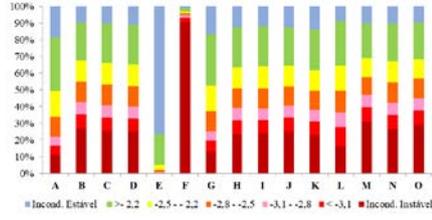
z = 10m



z = E



z = D



z = M

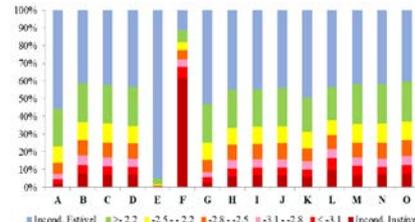
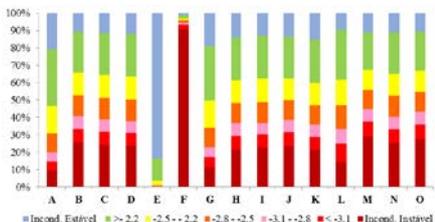


Figura 11 - Gráficos com a área das superfícies de ruptura em cada classe de estabilidade do SHALSTAB [%] nas modelagens. Fonte: Sbroglia (2022).

Com base nos valores obtidos de AAC, os cenários mais bem classificados, todos com resolução espacial de 1m, foram: 1ª posição cenário C z=5m (1m) – AAC 0,7167; 2ª posição M z=10m (1m) – AAC 0,7099; 3ª posição B z=10m (1m) – AAC 0,7091; 4ª posição C z=10m (1m) e M z=D (1m) – AAC 0,7084; e 5ª posição D z=10m (1m) – AAC 0,7083.

Entre as modelagens com valor de AAC localizadas nas 5 primeiras posições, os cenários sem espacialização dos dados geotécnicos (B, C, D) elaborados por meio da média aritmética entre os valores dos parâmetros, e da média ponderada dos valores pelos polígonos das unidades

geotécnicas e pelos polígonos dos modelados de relevo foram os que apresentaram melhores resultados, com 4 cenários entre os 6 primeiros na hierarquização de AAC.

Por fim, com o intuito de definir as modelagens mais bem ajustadas aos deslizamentos ocorridos em 2008, foi realizada a comparação por meio do cálculo do Índice de Acerto (IA), Índice de Erro (IE) e a taxa IA/IE propostos por Sorbino et al. (2010). Na tabela 6 são apresentados os valores de AAC, IA, IE e a relação IA/IE para as modelagens com maior capacidade preditiva dos deslizamentos, e a respectiva hierarquização

Tabela 6 - Valores de AAC, IA, IE e IA/IE para as modelagens com maior capacidade preditiva (Adaptado de Sbroglia (2022)).

Cenário	AAC	Hierarquização	IA [%]	IE [%]	IA/IE	Hierarquização
C z=5m (1m)	0,7167	1º	23,44	7,93	2,95	1º
D z=10m (1m)	0,7083	5º	36,33	13,73	2,65	2º
C z=10m (1m)	0,7084	4º	37,08	14,13	2,62	3º
B z=10m (1m)	0,7091	3º	38,72	14,96	2,59	4º
M z=D (1m)	0,7084	4º	39,67	15,50	2,56	5º
M z=10m (1m)	0,7099	2º	42,99	17,16	2,51	6º

De acordo com Sorbino et al. (2010), o modelo que melhor descreve o fenômeno é aquele que obtém a maior relação IA/IE. Por meio dessa análise é avaliada não apenas a taxa de acerto do modelo em representar deslizamentos nos locais onde de fato ocorreram, mas também sua capacidade de não superestimar as áreas instáveis nos locais de ausência de deslizamentos. Destaca-se que o incremento das áreas instáveis em relação à ocorrência de deslizamentos pode não condizer com a realidade da área de estudo.

Nesse contexto, os cenários que obtiveram os maiores valores de IA/IE foram: C z=5m (2,95), D z=10m (2,65) e C z=10m (2,62), com *pixel* de 1m. Esses cenários são apresentados na figura 12, com a sobreposição das superfícies de ruptura estimadas, e o respectivo gráfico da AAC.

Destaca-se que as modelagens que melhor se ajustaram à situação real (do desastre natural de novembro de 2008) da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú foram aquelas obtidas sem a espacialização dos parâmetros geotécnicos, ou seja, nas quais foi utilizado um único valor de c , ϕ e γ_{sat} para toda a área de estudo calculado por meio da média ponderada, utilizando a área das unidades geotécnicas em C e dos modelados de

relevo em D, na escala 1:10.000, revelando a dificuldade de se encontrar um meio de regionalização, de forma eficiente e em escala de bacia hidrográfica, dos parâmetros referentes aos solos em análises de estabilidade.

Seefelder et al. (2017) enfatizam que, em modelos físicos, os parâmetros de resistência ao cisalhamento não sejam interpretados em termos absolutos devido à incerteza inerente a eles, relacionada principalmente a dificuldade de capturar por meio de ensaios de campo e de laboratório a sua distribuição espacial. Contudo, mesmo que para a modelagem seja utilizado um único valor geotécnico como dado de entrada, para toda a área em estudo, verificou-se como importante a determinação dos parâmetros dos solos de forma regionalizada a fim de capturar a diferenciação das características geotécnicas mais expressivas entre as áreas.

Dessa forma, conclui-se ser satisfatória a obtenção do dado geotécnico de forma pontual (ensaio), mas espacializada por unidades geotécnicas de interesse, evitando-se a obtenção de forma aleatória. Ainda, se possível, sugere-se a utilização conjunta dos modelados de relevo.

Nesse caso, com o uso do equipamento BST associado ao mapeamento geotécnico, por se tratar

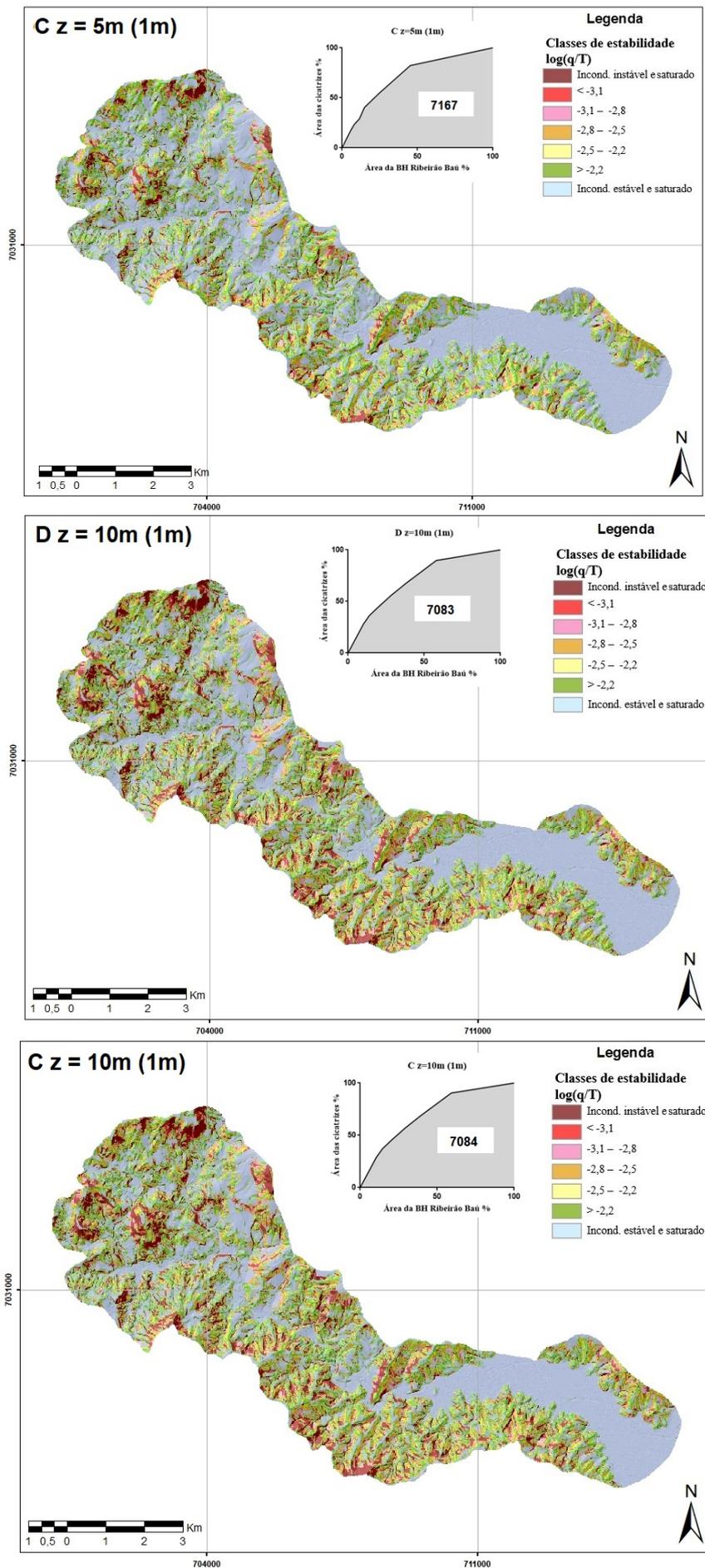


Figura 12 - Modelagens de suscetibilidade a deslizamentos da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú com maiores valores de IA/IE. (Fonte: Sbroglia, 2022).

de um ensaio de campo de fácil e rápida execução, é possível abranger uma área maior em menor tempo quando não há restrições física ou legal de acesso a alguma área, como, por exemplo, locais carentes de estradas, de topografia muito acidentada, com vegetação densa e propriedades privadas e, ainda, obter resultados com baixa variabilidade e semelhantes aos obtidos pelos ensaios de laboratório.

Além disso, o uso dos polígonos das unidades geotécnicas foi necessário na identificação de um valor médio ponderado para ser utilizado em toda a bacia hidrográfica, destacando a importância do mapeamento geotécnico na orientação da magnitude dos parâmetros de entrada que possam retratar, mesmo que de maneira generalizada, as características do solo. Ainda, acredita-se que a melhora da escala do mapeamento geotécnico que resulte, ao menos, na compatibilização com a

escala do MDE (1:10.000), possibilitaria a elaboração de cenários ainda mais próximos à realidade na área de estudo.

O resultado observado nesta pesquisa vai ao encontro do obtido por Sbroglia et al. (2018) e Flach (2020) para a mesma área de estudo e utilizando o mesmo modelo matemático, SHALSTAB. Os autores observaram que o cenário que utilizou um único valor de cada parâmetro geotécnico para toda a área da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú foi o que apresentou maior capacidade preditiva dos deslizamentos ocorridos em novembro de 2008, sendo que para Sbroglia et al. (2018) o cenário de maior capacidade preditiva foi por meio da média ponderada por unidade geotécnica e para Flach (2020) foi por meio da média simples dos valores obtidos do ensaio BST e dos menores valores dos parâmetros obtidos pelo ensaio de laboratório Cisalhamento Direto.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O mapa de suscetibilidade, quando relacionado ao processo de ordenamento territorial, contribui para a redução na incidência de desastres naturais, já que apresenta a capacidade de orientar de forma adequada a expansão urbana, com base nas restrições impostas pelo meio físico. Para a elaboração do mapa de suscetibilidade da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú, localizada em Ilhota/SC, foi utilizado o modelo matemático *Shallow Landsliding Stability Model* (SHALSTAB).

Os parâmetros geotécnicos de entrada no modelo foram obtidos de um banco de dados georreferenciado para a área de estudo, totalizando 37 pontos com dados. A partir dele, foi possível a experimentação de diferentes formas de distribuição dos parâmetros geotécnicos nas modelagens matemáticas, sendo elaborados 15 cenários, 6 sem espacialização dos parâmetros geotécnicos (cenários denominados de A a F) e 9 com espacialização (cenários denominados de G a O).

Nos cenários denominados “sem espacialização dos parâmetros dos solos” foi empregado um único valor de c , ϕ e γ_{sat} para toda a área da bacia hidrográfica do Ribeirão Baú, por outro lado, nos cenários denominados “com espacialização dos parâmetros dos solos”, a espacialização foi realizada por meio dos polígonos das unidades geotécnicas, dos modelados de relevo, por intervalo de altitude, por intervalo de declividade, por orientação da encosta, por forma da encosta e por interpolação dos dados.

Como resultado, as modelagens que melhor se ajustaram à situação real, por meio das cicatrizes de deslizamentos ocorridos no desastre natural de novembro de 2008, para a bacia hidrográfica do Ribeirão Baú foram aquelas obtidas sem a espacialização dos parâmetros geotécnicos, ou seja, nas quais foi utilizado um único valor de intercepto de coesão, ângulo de atrito e peso específico saturado para toda a área da bacia hidrográfica, calculado por meio da média ponderada utilizando a área das unidades geotécnicas no cenário C e dos modelados de relevo no cenário D, na maior escala, de 1:10.000.

Nesse sentido, conclui-se ser satisfatória a obtenção do dado geotécnico de forma pontual (ensaio), à escala de bacia hidrográfica, mas espacializada por unidades geotécnicas de interesse, evitando-se sua obtenção de forma aleatória. Se possível, associada aos modelados de relevo.

Contudo, ressalta-se que os parâmetros obtidos por meios precisos devem ser espacializados para a área homogênea assumindo certo grau de subjetividade, sobretudo em escalas menores, uma vez que os resultados correspondem ao valor pontual de uma amostra de solo heterogêneo.

Além disso, o uso dos polígonos das unidades geotécnicas foi essencial na identificação de um valor médio ponderado, destacando a importância do mapeamento geotécnico na orientação da magnitude dos parâmetros de entrada que possam retratar, mesmo que de maneira generalizada, as características do subsolo.

REFERÊNCIAS

- BEGUERÍA, S. Validation and evaluation of predictive models in hazard assessment and risk management. **Natural Hazards**, v. 37, n. 3, p. 315-329, 2006.
- BENESSIUTI, M.F. **Estudo dos mecanismos de instabilidade em solos residuais de biotita-gnaise da bacia do Ribeirão Guaratinguetá**. 2011. 128 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Estadual Paulista (UNESP), Bauru (SP).
- BISPO, C.O.; LISTO, F.L.R.; SILVA, D.G. Previsão de escorregamentos rasos a partir do modelo SHALSTAB na borda oriental da Chapada do Araripe. **Revista de Geografia (Recife)**, v. 35, n. 4, p. 219-230, 2018.
- CARVALHO, D.M.; PESSOA, O A A.; SILVEIRA, I.A.; CARVALHO JUNIOR, O.A.; GOMES, R.A.T. Aplicação do modelo SHALSTAB para a demarcação de áreas suscetíveis a escorregamentos no município de Itatiaia-RJ. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, XIII. Viçosa. 2009. **Anais...Viçosa**, p. 280-286, 2009.
- CERVI, F.; BERTI, M.; BORGATTI, L.; RONCHETTI, F.; MANENTI, F.; CORSINI, A. Comparing predictive capability of statistical and deterministic methods for landslide susceptibility mapping: a case study in the northern Apennines (Reggio Emilia Province, Italy). **Landslides**, n. 7, p. 433-444, 2010.
- CHUNG, C.J.F. & FABBRI, A.G. Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. **Natural Hazards**. v. 30, p. 451-472, 2003.
- DÍAS, R.D. Proposta de metodologia de definição de carta geotécnica básica em regiões tropicais e subtropicais. **Revista do Instituto Geológico**. São Paulo, v. 16, n. esp., p. 51-55, 1995.
- DIAS, R.D.; PARIZOTO, D.; ESPÍNDOLA, M.S. **Mapeamento geotécnico de grandes áreas, exemplo na região do Morro do Baú**. FAPESC/UNISUL, Florianópolis, 2015. 93 p.
- DIETRICH, W.E. & MONTGOMERY, D.R. SHALSTAB: A Digital Terrain Model for Mapping Shallow Landslide Potential. **National Council for Air and Stream Improvement**. 1998. 26 p.
- FERNANDES, N.F. & AMARAL, C.P. Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. In: GUERRA, A.J. T.; CUNHA, S.B. (org.) **Geomorfologia e Meio Ambiente**. 3ª edição, Rio de Janeiro: Bertrand, p. 123-194. 2000.
- FERNANDES, N.F.; GUIMARÃES, R.F.; GOMES, R.A.T.; VIEIRA, B.C.; MONTGOMERY, D.R.; GREENBERG, H. Condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 2, n. 1, p. 51-71, 2001.
- FLACH, M.K. **Comparação entre os dados obtidos pelo borehole shear test e ensaio de cisalhamento direto no mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos na microbacia do Ribeirão Baú, Ilhota/SC**. Florianópolis. 2020. 151 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial), Universidade Federal de Santa Catarina.
- GOMES, R.A.T. **Modelagem de previsão de movimentos de massa a partir da combinação de modelos de escorregamentos e corridas de massa**. Rio de Janeiro, 2006, 180 p. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- GUIMARÃES, R.F.; MONTGOMERY, D.R.; GREENBERG, H.M.; FERNANDES, N.F.; GOMES, R.A.T.; CARVALHO JÚNIOR, O. A. Parameterization of soil properties for a model of topographic controls on shallow landsliding: application to Rio de Janeiro. **Engineering Geology**, v. 69, n. 1-2, p. 99-108, 2003.
- LISTO, F.D.L.R. & VIEIRA, B.C. Mapping of risk and susceptibility of shallow landslide in the city of São Paulo, Brazil. **Geomorphology**, v. 169-170, p. 30-44. 2012.
- MICHEL, G.P.; KOBAYAMA, M.; GOERL, R.F. Comparative analysis of SHALSTAB and SINMAP for landslide susceptibility mapping in the Cunha River basin, southern Brazil. **Journal of Soils and Sediments**, v. 14, n. 7, p. 1266-1277, 2014.
- MONTGOMERY, D.R. & DIETRICH, W.E. A physically-based model for topographic control on shallow landsliding. **Water Resources Research**, v. 30, n. 4, p. 1153-1171, 1994.
- MONTGOMERY, D.R.; SULLIVAN, K.; GREENBERG, H.M. Regional test of a model for shallow landsliding. **Hydrological Processes**, n. 12, p. 943-955, 1998.
- PARIZOTO, D.G.V. **Contribuição dos diferentes fatores aos processos de deslizamento e a influência antrópica no nível de danos do desastre de 2008: o caso do complexo do Morro do Baú - Ilhota/SC**. Florianópolis. 2014. 305 p. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade Federal de Santa Catarina.
- PEREIRA, M. **Ilhota, 28 de novembro de 2008: Diário de uma tragédia**. Blumenau, 2009, 272 p.
- RAMOS, V.M.; GUIMARÃES, R.F.; REDIVO, A.L. GOMES, R.A.T.; FERNANDES, N.F.; CARVALHO JÚNIOR, O.A. Aplicação do modelo SHALSTAB, em ambiente ArcView, para o mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamento raso na Região do Quadrilátero Ferrífero (MG). **Espaço & Geografia**, v. 5, n. 1, p. 49-67, 2002.
- REDIVO, A.L.; RAMOS, V.M.; GUIMARÃES, R.F.; CARVALHO JÚNIOR, O.A.; GOMES, R.A.T. Determinação de áreas susceptíveis a escorregamentos na BR 256 no município de Ouro Preto - MG. In: V SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA I ENCONTRO SUL AMERICANO DE GEOMORFOLOGIA, UFSM, 2004. **Anais... Santa Maria**, p. 31-46. 2004.
- REMONDO, J.; GONZÁLEZ, A.; TERÁN, J.R.D.; CENDRERO, A.; FABBRI, A.; CHUNG, C.F. Validation of landslide susceptibility maps; examples and applications from a case study in northern Spain. **Natural Hazards**, v. 30, n. 3, p. 437-449, 2003.
- SAULNIER, G.M.; BEVEN, K.; OBLED, C. Including spatially variable effective soil depths in TOPMODEL. **Journal of Hydrology**, v. 202, p. 158-172, 1997.
- SBROGLIA, R.M. **Mapeamento geotécnico e das áreas suscetíveis a deslizamentos na microbacia do Ribeirão Baú, Ilhota/SC**. Florianópolis. 2015. 187 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Santa Catarina.
- SBROGLIA, R.M. **Análise da distribuição espacial da resistência ao cisalhamento dos solos no mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos**. Florianópolis. 2022. 378 p. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal de Santa Catarina.
- SBROGLIA, R.M.; REGINATTO, G.M.P.; HIGASHI, R.A.R.; GUIMARÃES, R.F. Mapping susceptible landslide areas using geotechnical homogeneous zones with different DEM resolutions in Ribeirão Baú basin, Ilhota/SC/Brazil. **Landslides**, v. 15, p. 2093-2106, 2018.
- SBROGLIA, R.M.; HIGASHI, R.A.R.; MÜLLER, V.S.; ESPÍNDOLA, M.S.; FLORES, J.A.A. Método de Mapeamento das Áreas Suscetíveis a Deslizamentos Utilizado na Elaboração de Cartas Geotécnicas de Aptidão à Urbanização. In: XII CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS. Florianópolis, 2017. **Anais...Florianópolis: ABMS**, 2017.
- SEEFELDER, C.L.N.; KOIDE, S.; MERGILI, M. Does parameterization influence the performance of slope stability model results? A case study in Rio de Janeiro, Brazil. **Landslides**, v. 14, n. 4, p. 1389-1401, 2017.
- SILVA, D.C.O. **Aplicação do modelo SHALSTAB na previsão de deslizamentos em Petrópolis**. Rio de Janeiro. 2006. 132 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro.

- SILVA, R.V. **Desenvolvimento de um modelo hidrológico distribuído por meio de células voronoi com consideração das profundidades do solo.** Florianópolis. 2010. 226 p. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina.
- SORBINO, G.; SICA, C.; CASCINI, L. Susceptibility analysis of shallow landslides source areas using physically based models. **Natural Hazards**, n. 53, p. 313-332, 2010.
- SORBINO, G.; SICA, C.; CASCINI, L.; CUOMO, S. Un'applicazione dei modelli di innesco su area vasta sede di frane rapide in terreni piroclastici. In: INCONTRO ANNUALE DEI RICERCATORI DI GEOTECNICA, Italia, Pisa. 006. **Anais ...Pisda**, 2006.
- TOMAZZOLI, E.R.; PARIZOTO, D.G.V.; ABREU, J.; PELLERIN, J. R. G. M. **Análise e mapeamento das áreas de risco a movimentos de massa e inundações nos municípios de Gaspar, Ilhota e Luiz Alves (Complexo do Morro do Baú)**, SC. FAPESC - Convênio 16319/2010-8. UFSC, Florianópolis, 2012. 207 p.
- ZAINDAN, R.T. & FERNANDES, N.F. Zoneamento de susceptibilidade a escorregamentos em encostas aplicado à bacia de drenagem urbana do Córrego da Independência - Juiz de Fora (MG). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 10, n. 2, 2009.
- ZIZIOLI, D.; MEISINA, C.; VALENTINO, R.; MONTRASIO, L. Comparison between different approaches to modeling shallow landslide susceptibility: a case history in Oltrepo Pavese, Northern Italy. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v.13, p. 559-573, 2013.

*Submetido em 4 de setembro de 2023
Aceito para publicação em 12 de maio de 2024*