

Anne Biehl

**FERRAMENTA PARA ESTIMATIVA DE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS
UTILIZANDO QGIS:
DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE DESEMPENHOS**

Porto Alegre
Novembro de 2021

Anne Biehl

**FERRAMENTA PARA ESTIMATIVA DE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS
UTILIZANDO QGIS:
DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE DESEMPENHO**

Trabalho de conclusão apresentado ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheira Hídrica.

Orientador: Prof. Dr. Gean Paulo Michel

Coorientador: Me. Heron Schwarz

Porto Alegre

Novembro de 2021

CIP - Catalogação na Publicação

Biehl, Anne

Ferramenta para estimativa de estabilidade de
encostas utilizando QGIS: desenvolvimento e análise de
desempenho / Anne Biehl. -- 2021.

157 f.

Orientador: Gean Paulo Michel.

Coorientador: Heron Schwarz.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia Hídrica,
Porto Alegre, BR-RS, 2021.

1. Escorregamentos. 2. Estabilidade. 3. SHALSTAB.
4. QGIS. 5. Python. I. Michel, Gean Paulo, orient.
II. Schwarz, Heron, coorient. III. Título.

Folha de Aprovação

Anne Biehl

**FERRAMENTA PARA ESTIMATIVA DE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS
UTILIZANDO QGIS:
DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE DESEMPENHO**

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Hídrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido e aprovado em 24/11/2021 pela Comissão Avaliadora constituída pelos professores:

Banca Examinadora:

.....
Prof. Dr. Gean Paulo Michel - Orientador

.....
Prof. Dr. Masato Kobiyama – Departamento de. Obras Hidráulicas

.....
Me. Leonardo Rodolfo Paul – PPGRHSA – IPH/UFRGS

AGRADECIMENTOS

Aos professores que contribuíram para a minha formação e fizeram eu me apaixonar pela Engenharia Hídrica.

Ao Gean, meu orientador, que me acolheu em 2017 para uma bolsa de iniciação científica e sempre me desafiou e acreditou no meu potencial. Também ao meu coorientador, Heron, que participou ativamente de todo esse processo, me auxiliando e incentivando.

Ao Leonardo Paul, por toda a ajuda com o misterioso Python.

Ao William, pela paciência, carinho e companheirismo, sempre. Por ser assistência técnica, crítica visual e terapia. O amor não sai com água, nem com lágrimas da engenharia.

A minha família que compreendeu minha ausência em tantos momentos, me apoiou e possibilitou a realização deste sonho. Em especial a minha irmã, Ursula, que segurou as pontas, serviu de banca examinadora, vibrou comigo e hoje talvez saiba mais do que eu mesma sobre o assunto.

Aos meus amigos; os que estiveram junto comigo nessa jornada e os que se fizeram presentes mesmo com a distância. Vocês tornaram tudo mais fácil!

A todos que aturaram meus dramas durante esses muitos anos de engenharia.

A Deus, pela vida.

RESUMO

Os desastres relacionados a movimentos de massa e produção de sedimentos são motivo de grande preocupação atualmente, pois representam risco de vida à população e, também, são responsáveis por grandes volumes de solo erodido e degradação da qualidade da água. O desenvolvimento tecnológico possibilitou a criação de diversas ferramentas para o mapeamento, a caracterização e a avaliação de áreas de risco. Modelagens computacionais aliadas ao Sistema de Informação Geográfica (SIG) auxiliam na predição de escorregamentos. Existem diversos modelos para a identificação de áreas suscetíveis a movimentos de massa, dentre eles, um dos mais utilizados, é o SHALSTAB (*Shallow Landsliding Stability Model*). Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta de análise de suscetibilidade a movimentos translacionais. Trata-se de uma adaptação do modelo SHALSTAB, para o ambiente do *software* livre QGIS, utilizando linguagem de programação Python e incluindo na análise o efeito da vegetação. A incorporação do modelo na plataforma do *software* QGIS, a partir de uma sequência de cálculos sobre arquivos em formato *raster*, que permite a entrada de dados discretizados, visa aprimorar e atualizar o processo de aplicação da ferramenta. Para a análise de desempenho utilizou-se a bacia do rio Mascarada, no nordeste do Rio Grande do Sul, região que sofreu com diversos movimentos de massa em 2017. O método de avaliação é o de curvas *ROC* (*Receiver Operating Characteristics*), com índice de acertos e erros e comparação da área abaixo da curva (*AUC*). Foram realizadas simulações com diferentes valores para os parâmetros de entrada. Para cada simulação realizada, com alteração nos parâmetros de entrada, houve variação nos índices de acerto e erro e, consequentemente, no valor de *AUC*, indicando a possibilidade de otimização da ferramenta com a realização de simulações em lote e análise de curvas *ROC*. Os valores para os parâmetros de entrada, que melhor representaram o evento de 2017, são resultados de ensaios realizados na bacia, com *AUC* de 0,80, *IA* de 75% e *IE* de 23%, confirmando a importância do monitoramento em campo. De modo geral, o modelo proposto conseguiu representar os fenômenos estudados. A ferramenta demonstrou eficácia e acurácia, quando confrontada com as cicatrizes de escorregamentos. A modelagem de estabilidade de encostas é um instrumento muito útil para o gerenciamento da ocupação territorial. A previsão de escorregamentos poderia diminuir, e muito, os impactos gerados.

Palavras-chave: escorregamentos; estabilidade; SHALSTAB; QGIS; Python.

ABSTRACT

Disasters related to landslides and sediments currently are of great concern, representing risks to the lives of the population and are also responsible for large volumes of eroded soil and water quality degradation. The development in technology made the creation of many mapping, description and evaluation of risk areas possible. Computational modeling combined with the Geographic Information System (GIS), help in the prediction of landslides. There are many models that work with the identification of areas susceptible to landslides, and among them is the SHALSTAB model (*Shallow Landsliding Stability Model*), one of the most used for this end. This undergraduate project aims to develop a shallow landslide susceptibility analysis tool as an adaptation of the SHALSTAB model, made for the QGIS free software environment, using python as its programming language and adding to the final analysis the effects of the vegetation. The goal is to improve this tool through the incorporation of the model for the QGIS software platform, using a sequence of calculations on files in raster format, allowing for discretized data entry. For the performance analysis, the Mascarada river basin, in the northeast of Rio Grande do Sul was used. This region suffered with many landslides in 2017. The valuation method uses *ROC* curves (*Receiver Operating Characteristics*), with an index of results and area comparison under the *AUC* Curve. Simulations were performed with different values for input parameters. For each simulation performed, with changes in the input parameters, there was a variation in the success rates and, consequently, in the *AUC* value, indicating the possibility of an optimization in the tool by performing batch simulations and the analysis of the *ROC* curves. The values for the input parameters, which best represented the 2017 event, are the results of tests carried out in the basin, with *AUC* of 0.80, *IA* of 75% and *IE* of 23%, confirming the importance of field monitoring. In general, the proposed model was able to successfully represent the studied phenomena. The tool also represented accuracy and efficiency with landslide scars calculations. The slope stability model is a very useful tool for managing land use, and the prediction of landslides could greatly reduce those impacts.

Keywords: Landslides; Stability; SHALSTAB; QGIS; Python.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de movimentos de massa.....	23
Figura 2 - Escorregamento translacional em Friburgo - RJ.....	24
Figura 3 - Distribuição global dos deslizamentos de terra fatais.....	25
Figura 4 - Registros de movimentos de massa no Brasil, de 1991 a 2012.....	26
Figura 5 - Frequência mensal dos movimentos de massa ocorridos no Brasil, de 1991 a 2012.....	27
Figura 6 - Representação do modelo de encosta infinita.....	36
Figura 7 - Representação esquemática do modelo hidrológico.....	38
Figura 8 - Fluxograma das atividades.....	43
Figura 9 - Mapa de localização da bacia do rio Mascarada.....	44
Figura 10 - Declividade da bacia do rio Mascarada.....	45
Figura 11 - a) Bacia do rio Mascarada dez/2016 (Sensor Sentinel-2A); b) Bacia do rio Mascarada dez/2017 (Sensor Sentinel-2B).....	46
Figura 12 - Diagrama de funcionamento do algoritmo D-infinito.....	48
Figura 13 - Tipos de solo na bacia.....	50
Figura 14 - Geodiversidade na bacia.....	52
Figura 15 - Unidades Geotécnicas e pontos de amostragem.....	53
Figura 16 - Interface do modelo de estabilidade de encostas.....	58
Figura 17 - Mapa de ideias para o nome do modelo.....	59
Figura 18 - Esquema ilustrativo para definição dos parâmetros envolvidos no cálculo do <i>IA</i> e <i>IE</i>	62
Figura 19 - Exemplo genérico de uma curva <i>ROC</i> com <i>AUC</i> destacada em rosa.....	63
Figura 20 - Resultado do modelo: mapa de estabilidade para a simulação 7.....	66
Figura 21 - Detalhe das cicatrizes no mapa de estabilidade para a simulação 7 sem influência da vegetação.....	67
Figura 22 - Resultado do modelo: mapa de estabilidade para a simulação 7 com influência da vegetação.....	69
Figura 23 - Detalhe das cicatrizes no mapa de estabilidade para a simulação 7 com influência da vegetação.....	70
Figura 24 - Curvas <i>ROC</i> com e sem a influência da vegetação.....	71
Figura 25 - Curvas <i>ROC</i> com a variação da coesão do solo.....	73
Figura 26 - Curvas <i>ROC</i> com a variação dos parâmetros de entrada.....	76

Figura 27 - Curvas <i>ROC</i> com a variação dos parâmetros, melhor e pior caso.....	78
Figura 28 - Mapa de estabilidade da Bacia Hidrográfica do Rio Mascarada (Simulação 9). ..	80
Figura 29 - Detalhe das cicatrizes no mapa de estabilidade da Bacia Hidrográfica do Rio Mascarada (Simulação 9). ..	81

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Métodos de classificação de movimentos de massa.....	21
Quadro 2 - Métodos de análise.....	30
Quadro 3 - Valores dos parâmetros distribuídos nas unidades geotécnicas	53
Quadro 4 - Valores constantes utilizados para os parâmetros	54
Quadro 5 - Valores utilizados nas simulações.....	60
Quadro 6 - Valores utilizados nas simulações com variação da coesão do solo.....	61
Quadro 7 - <i>AUC</i> para simulações com variação do ângulo de atrito interno do solo.....	74
Quadro 8 - <i>IA/IE</i> e escolha do limiar para simulações com variação da coesão do solo.	74
Quadro 9 - <i>AUC</i> para simulações com variação do conjunto de parâmetros de entrada.....	77
Quadro 10 - <i>IA/IE</i> e escolha do limiar para simulações com variação dos parâmetros.	78

LISTA DE SIGLAS

AUC – Area under the curve

BHST – Borehole Shear Test

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

MDT – Modelo Digital de Terreno

ROC – Receiver Operating Characteristic

SHALSTAB – Shallow Landsliding Stability Model

SIG – Sistema de Informação Geográfica

TauDEM – Terrain Analysis Using Digital Elevation Models

UG – Unidade Geotécnica

UNISDR – United Nations Office for Disaster Risk Reduction

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
a	Área de contribuição a montante	m^2
A_{dentro}	Área considerada instável pelo modelo que está dentro de cicatrizes de escorregamentos	-
$A_{\text{estável}}$	Área da encosta que não foi afetada pelo escorregamento	-
A_{fora}	Área considerada instável pelo modelo fora de cicatrizes de escorregamento	-
$A_{\text{instável}}$	Área da cicatriz de escorregamento	-
b	Comprimento de contorno da fronteira inferior de cada elemento	m
C	Coesão	Pa
c_r	Coesão das raízes	Pa
c_s	Coesão do solo	Pa
g	Aceleração da gravidade	m/s^2
h	Altura da coluna d'água	m
IA	Índice de acertos	-
IE	Índice de erros	-
n	número de cicatrizes de escorregamentos ou encostas analisadas	-
q	Taxa de recarga uniforme	m/dia
S_w	Sobrecarga devido ao peso da vegetação	Pa
T	Transmissividade do solo	m^2/dia
u	Poro pressão	Pa
w	Umidade do solo	m/m
z	Profundidade do solo	m
ρ_s	Massa específica do solo úmido	kg/m^3
ρ_w	Massa específica da água	kg/m^3
θ	Declividade do terreno	graus
ϕ	Ângulo de atrito interno do solo	graus
τ	Tensão cisalhante	Pa
σ	Tensão normal	Pa

SUMÁRIO

1	Introdução	14
2	Objetivos	17
2.1.	Objetivo geral.....	17
2.2.	Objetivos específicos	17
3	Revisão bibliográfica	18
3.1.	Movimentos de massa.....	18
3.1.1.	Classificação.....	19
3.1.2.	Escorregamentos translacionais.....	22
3.1.3.	Ocorrência	25
3.1.4.	Metodologias para a avaliação da estabilidade de encostas	27
3.2.	Modelagem de movimentos de massa	31
3.2.1.	Classes de modelos para o mapeamento de movimento e massa.....	32
3.2.2.	Modelos de suscetibilidade a escorregamentos translacionais	33
3.2.3.	Comparação entre modelos mais difundidos.....	34
3.2.4.	SHALSTAB	35
3.3.	Otimização de modelos.....	40
3.4.	QGIS	42
3.5.	Python	42
4	Materiais e métodos	43
4.1.	Área de estudo.....	44
4.2.	Parâmetros de entrada.....	47
4.3.	SHALSTAB	54
4.4.	Criação do modelo de estabilidade de encostas.....	55
4.4.1.	Bibliotecas de Python utilizadas.....	55
4.4.2.	Código	56
4.4.3.	Limitações do modelo	57

4.4.1.	Criação da interface	57
4.4.2.	Escolha do nome.....	58
4.5.	Cenários propostos.....	59
4.6.	Análise de desempenho	61
5	Resultados e discussão	65
5.1.	Funcionamento do modelo SHALSANN	65
5.2.	Otimização do modelo	72
5.3.	Evento de 2017 na Bacia Hidrográfica do Rio Mascarada	75
6	Conclusões e recomendações	83
	Referências bibliográficas	84
	Apêndice A	94
	Apêndice B	105
	Apêndice C	118
	Apêndice D	144

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da humanidade depende do meio em que esta está inserida. Processos naturais de transformação da paisagem, contudo, são frequentemente desconhecidos ou desconsiderados ante o estabelecimento de moradias, comunidades ou cidades. Assim, fenômenos naturais podem transformar-se em desastres de grandes proporções. Segundo a UNISDR (2009), desastres são graves perturbações do funcionamento de uma sociedade ou comunidade, que geram impactos humanos, materiais, econômicos e ambientais, muitas vezes excedendo a capacidade de recuperação do sistema.

O número de desastres naturais registrados vem aumentando nos últimos anos, assim como os prejuízos causados por eles, atingindo um número cada vez maior de pessoas (COPPOLA, 2015). Os desastres relacionados a movimentos de massa e produção de sedimentos são motivo de grande preocupação atualmente, pois representam risco de vida a população e, também, são responsáveis por grandes volumes de solo erodido e degradação da qualidade da água. Os movimentos de massa, transportam elevado volume de detritos até a calha fluvial, afetando em larga escala as taxas de produção de sedimentos da bacia (KORUP *et al.*, 2004). Entre os movimentos de massa mais comuns, em regiões tropicais e subtropicais, estão os escorregamentos translacionais, objeto deste estudo.

No Brasil a realidade não é diferente. No início de 2020, ocorreram diversos casos de escorregamentos de terra na região sudeste do país. As chuvas intensas, nos estados de Espírito Santo, Minas Gerais e São Paulo, causaram inúmeros escorregamentos na região e, consequentemente, muitos prejuízos, incluindo perdas de vidas humanas. Regiões montanhosas, quando atingidas por precipitações intensas, são mais suscetíveis a esse tipo de fenômeno. É o caso da região nordeste do Rio Grande do Sul, onde, devido condições geomorfológicas e climáticas propícias, escorregamentos translacionais são recorrentes.

A ocupação desordenada em áreas de risco transforma esses eventos em grandes desastres, potencializando a incidência dos mesmos e agravando seus impactos. A relação do ser humano com a natureza ao longo da história evoluiu de respeito e aceitação dos fenômenos naturais para a visão equivocada de dominação pela tecnologia (TOMINAGA, 2009). A apropriação do relevo pelo homem é responsável por alterações substanciais da estrutura natural com uso intensivo do solo e remoção da cobertura vegetal, aumentando a fragilidade do terreno. Prever estes incidentes auxiliaria na mitigação dos impactos causados, evitando perdas humanas, ambientais e econômicas.

Para Castro (1998), a magnitude do evento e a vulnerabilidade do sistema afetado definem a intensidade de um desastre. Porém, muitas vezes os eventos surpreendem até mesmo as comunidades mais bem preparadas para enfrentá-los. Por esse motivo, é de extrema importância o estudo e a criação de métodos para a avaliação e predição destes eventos.

Dentro da gestão de risco, existem medidas preventivas que usualmente são divididas em dois grupos: estruturais e não estruturais (TOMINAGA, 2009). A primeira classe envolve obras de engenharia, geralmente com alto custo. Já a segunda, é realizada por meio de políticas públicas voltadas ao planejamento do uso do solo e ao gerenciamento. Para o planejamento é imprescindível a definição de áreas de risco e, no caso dos movimentos de massa, o mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos.

O desenvolvimento tecnológico possibilitou a criação de diversas ferramentas para o mapeamento, a caracterização e a avaliação de áreas de risco, que podem auxiliar na gestão e redução dos desastres naturais e dos prejuízos que esses podem causar à sociedade. Modelos matemáticos aliados a Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e parâmetros do solo vêm contribuindo no mapeamento de possíveis escorregamentos. Existem diversos modelos para a identificação de áreas suscetíveis a escorregamentos translacionais, dentre eles o *Shallow Landsliding Stability Model* (SHALSTAB), proposto por Dietrich e Montgomery (1998). O SHALSTAB é um modelo fisicamente embasado que utiliza o critério de ruptura de Mohr-Coulomb e adota a teoria de encosta infinita, aliado a um modelo hidrológico.

Porém, o SHALSTAB, em sua forma original, apresenta algumas limitações: está disponível em um *software* pouco utilizado, não considera a heterogeneidade espacial dos parâmetros do solo e não considera o efeito da vegetação na estabilidade de encostas. Com o intuito de superar essas limitações, o presente trabalho propõe a adaptação do modelo para o *software* QGIS, incluindo a influência da vegetação.

A incorporação do modelo na plataforma SIG do *software* QGIS, a partir de uma sequência de cálculos sobre arquivos em formato *raster*, que permite a entrada de dados distribuídos, visa aprimorar a ferramenta. Além de proporcionar a utilização do modelo em um *software* livre e amplamente utilizado, permite a utilização de dados especializados no modelo, sem restrição do número de píxeis. O produto final, o mapa de estabilidade de encostas, pode subsidiar a organização territorial e a gestão ambiental de cidades.

O modelo será testado na bacia do Rio Mascarada localizada nos municípios de Rolante, Riozinho e São Francisco de Paula, no nordeste do estado. Em janeiro de 2017, a bacia foi atingida por um evento de precipitação extrema que resultou na deflagração de diversos escorregamentos, afetando os municípios a jusante. Como resultados desse evento

houve a elevação brusca da turbidez na bacia hidrográfica do Rio dos Sinos o que impactou a coleta de água para abastecimento público na região. Esta bacia faz parte da Região Hidrográfica do Guaíba, região com a maior concentração demográfica do estado (BLUME *et al.*, 2010). A ferramenta será aplicada a partir de dados obtidos através de medições em campo e informações obtidas em outros trabalhos desenvolvidos na mesma região.

Espera-se que a ferramenta desenvolvida possibilite a obtenção de resultados mais acurados, com maior rapidez e eficácia, representando os eventos de forma realista e, consequentemente, auxiliando na prevenção de desastres.

2 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho estão classificados em geral e específicos e serão descritos a seguir.

2.1. Objetivo geral

Implementar um modelo computacional de suscetibilidade a escorregamentos translacionais, o SHALSTAB, em ambiente SIG, com considerações de efeitos de vegetação.

2.2. Objetivos específicos

- Adaptar o modelo SHALSTAB, para ferramenta no ambiente do software QGIS, utilizando linguagem de programação Python e incluindo na análise o efeito da vegetação;
- Testar *AUC (Area under the curve)* como métrica guia para a calibração e validação do modelo; e
- Verificar o desempenho do modelo modificado.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão teórica tem como objetivo delimitar o problema de estudo com o conhecimento do “estado da arte”, em que se descreve, através da literatura publicada anteriormente, o que já se sabe sobre o tema, quais são as lacunas existentes e os obstáculos teóricos e metodológicos a serem ultrapassados (LUNA, 2011). Neste capítulo serão apresentados os principais conceitos que embasam esse trabalho com o objetivo de delimitar o estudo. A seguir será feita uma breve explicação sobre os movimentos de massa, com foco principal nos escorregamentos translacionais, suas classificações, históricos de ocorrência e métodos de análise. Também são indicados alguns modelos utilizados para definir áreas suscetíveis a escorregamentos. Por último, é discutido o conceito de otimização de modelos, posteriormente aplicado na criação das ferramentas.

3.1. Movimentos de massa

Movimentos de massa são configurados pelo deslocamento, em conjunto, de solo ou material rochoso das vertentes, causado pela ação da gravidade, sem a influência direta de outros fatores como água, ar ou gelo (SELBY, 1993). Entretanto, tais elementos geralmente estão envolvidos nesses processos, afetando a resistência dos materiais e alterando a plasticidade e fluidez dos solos (TOMINAGA, 2009). Segundo Bloom (1970), a água exerce papel importante na mobilização de material, causando a redução no coeficiente de atrito, facilitando o deslizamento, e aumentando o peso dos fragmentos, acelerando o movimento do material.

Portanto, é correto dizer que outras circunstâncias favorecem estes deslocamentos. Para Bigarella *et al.* (2003), a estrutura geológica, a topografia, o regime de chuvas, a remoção de vegetação e a influência de atividades antrópicas são condicionantes importantes para este tipo de fenômeno. Isso se deve ao equilíbrio entre as tensões no interior da massa ser regido principalmente pelo teor de água e pela interação e coesão entre os grãos que formam o solo. Assim sendo, os movimentos de massa podem ser desencadeados por eventos pluviométricos extremos e chuvas prolongadas de intensidade moderada.

Considerado um dos principais processos erosivos em encostas, o movimento de massa pode desempenhar função relevante na produção de sedimentos nas bacias hidrográficas (BURTON & BATHURST, 1998). Embora façam parte da dinâmica superficial natural do planeta, sendo responsáveis pela evolução da paisagem e manutenção dos canais, os movimentos de massa causam grandes impactos socioeconômicos (GUIDICINI &

NIEBLE, 1984). Quando se desenvolvem em ambientes antropizados causam impactos ambientais, econômicos e sociais, podendo acarretar perda de vidas humanas. Por esses motivos, são objeto de estudos em todo o mundo, sendo seus processos e efeitos avaliados e abordados de diversas maneiras.

3.1.1. Classificação

Existem diferentes propostas à categorização dos movimentos de massa pelo mundo. Isso se explica pela grande variedade de materiais e fatores condicionantes envolvidos, pelas diferentes formas de evolução e pelas diversas possibilidades de enfoques na análise. Os sistemas de classificação geralmente se baseiam em uma combinação entre o material e o mecanismo de movimento. Para Selby (1993) o tipo de material, a velocidade e a mecânica do movimento, o modo de deformação, a geometria da massa movimentada e o nível de umedecimento se destacam como os critérios mais utilizados para a diferenciação destes processos.

Devido à variedade de parâmetros envolvidos, a separação dos movimentos de massa em classes se torna bastante difícil. Qualquer organização proposta apresenta limitações devido à complexidade dos processos na natureza, com a dificuldade em estabelecer limites entre as classes e a manifestação de várias classes em um mesmo movimento (FERNANDES & AMARAL, 1996).

A primeira proposta de classificação amplamente aceita foi desenvolvida por Sharpe (1938), a qual serviu de base para diversos trabalhos posteriores. Atualmente, entre os sistemas de classificação de maior relevância encontra-se o trabalho de Varnes (1978). A proposta ganha destaque devido a sua simplicidade, em que o autor se baseia apenas no tipo de movimento e no tipo de material transportado. Entre as classificações mais complexas tem notoriedade a proposta por Hutchinson (1988), que considera dados geológicos e geomorfológicos e a mecânica dos movimentos. Este esquema requer um grande volume de informações dificultando sua utilização em campo. Tanto o método de Varnes (1978) quanto o de Hutchinson (1988) se consagraram no meio científico, sendo desde então os mais utilizados em pesquisas e como base para outras classificações. Cruden & Varnes (1996) alteraram a proposta anterior, de 1978, estabelecendo o que seria o sistema utilizado atualmente pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS).

No âmbito nacional destacam-se as classificações de Freire (1965), de Guidicini & Nieble (1984) e de Augusto Filho (1992), sendo a última a mais utilizada em produções

acadêmicas e pela Defesa Civil, devido a sua simplicidade. O Quadro 1 apresenta, de forma resumida, as principais classes de movimentos de massa propostas pelos autores supracitados.

Quadro 1 - Métodos de classificação de movimentos de massa.

Sharpe (1938)	Freire (1965)	Varnes (1978)	Guidicini & Nieble (1984)	Hutchinson (1988)	Augusto Filho (1992)	Cruden & Varnes (1996)
Corridas: solifluxão; avalanche de detritos; rastejos; fluxos de terra e lama. Escorregamentos: escorregamentos; quedas.	Escoamentos: rastejos ou reptações; corridas. Escorregamentos: rotacionais; translacionais. Subsidências: subsidências; recalques; desabamentos. Formas de transição ou termos de passagem Movimentos complexos	Quedas Tombamentos Escorregamentos: rotacionais; translacionais. Espalhamentos Corridas Movimentos complexos	Escoamentos: rastejos; corridas. Escorregamentos: rotacionais; translacionais; quedas de blocos; quedas de detritos. Subsidências: subsidências; recalques; desabamentos. Formas de transição - movimentos complexos	Recuos Rastejos Fraturamento de vertentes de montanha Escorregamentos Movimentos de detritos em forma de fluxo Tombamentos Quedas Movimentos complexos	Rastejos Escorregamentos: planares ou translacionais; circulares ou rotacionais; em cunha. Quedas: rolamento de matação; tombamento; desplacamento. Corridas	Quedas Tombamentos Escorregamentos Expansões laterais Escoamentos ou fluxos

As diferenças entre as classes propostas são decorrentes da variedade de parâmetros utilizados nos estudos e dos valores atribuídos a eles. Apesar disso, alguns tipos de movimentos de massa são comuns na maior parte das classificações, entre eles os escorregamentos translacionais, objeto desse estudo e descritos no item a seguir.

3.1.2. Escorregamentos translacionais

Escrregamentos são movimentos rápidos, com volume geralmente bem definido, cujo centro de gravidade se desloca para baixo e para fora da encosta (AUGUSTO FILHO, 1992). De acordo com Fernandes & Amaral (1996), são movimentos caracterizados por ter curta duração e plano de ruptura bem definido, possibilitando a distinção entre o material escorregado e o que não foi movimentado.

São subdivididos em função do plano de ruptura, da geometria e do material mobilizado, que pode ser solo, rocha, detritos, colúvio e tálus. A existência ou não de planos de fragilidade definem a geometria destes movimentos, pois condicionam a formação das superfícies de ruptura. Sendo assim, existem diversos tipos de escorregamentos, como os planares ou translacionais e os circulares ou rotacionais. Além disso, quando aliados a um grande volume de precipitação pluviométrica os escorregamentos translacionais podem se transformar em fluxo de detritos, percorrendo maiores distâncias. Esse processo ocorre rapidamente, dificultando a diferenciação entre os movimentos. Os tipos de escorregamentos supracitados são esquematizados na Figura 1.

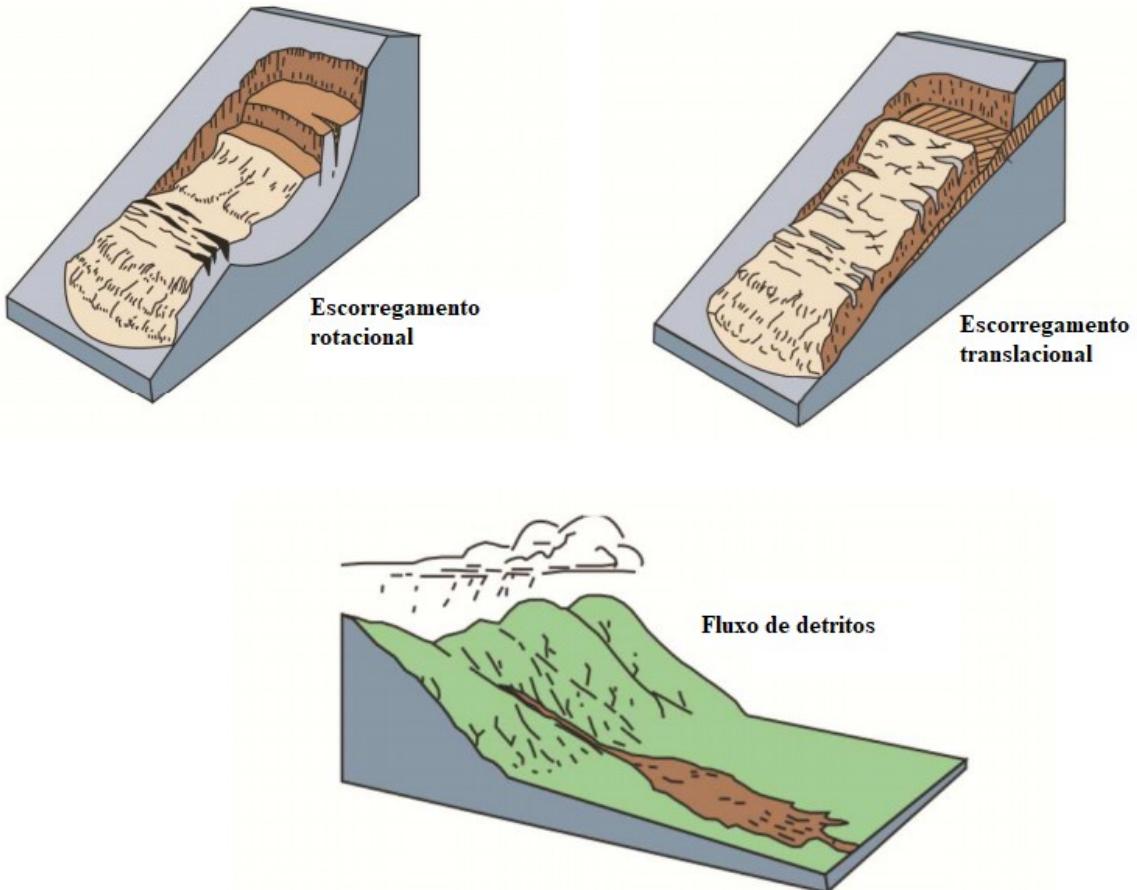


Figura 1 - Tipos de movimentos de massa.

Fonte: adaptado de USGS (2004).

Associados a solos pouco desenvolvidos e apresentando curta duração os escorregamentos translacionais são o tipo de movimento de massa mais frequente nas encostas serranas. São caracterizados por uma dinâmica de translação, com pouco movimento rotacional, que ocorre em superfícies relativamente planas ou onduladas (VARNES, 1978). Possuem superfície de ruptura plana que geralmente acompanha descontinuidades mecânicas do material.

Deflagrados, no Brasil, geralmente após eventos pluviométricos intensos, em que ocorre a saturação do solo, com a taxa de infiltração superior à taxa de retirada de água do interior da encosta (DIAS *et al.*, 2002), os movimentos planares tem a topografia como principal limitador (MONTGOMERY & DIETRICH, 1994). Ao contrário dos escorregamentos rotacionais, pode avançar indefinidamente se a superfície for suficientemente inclinada e enquanto o cisalhamento e a resistência ao longo desta permanecerem menores do que a força motriz menos constante (VARNES, 1978). A Figura 2

apresenta um exemplo de escorregamento translacional ocorrido no estado do Rio de Janeiro, em 2011.



Figura 2 - Escorregamento translacional em Friburgo - RJ.

Fonte: Shana Reis (2011). Disponível em: <https://veja.abril.com.br/galeria-fotos/chuvas-no-rio-de-janeiro/>.

Nos escorregamentos planares a massa se rompe por cisalhamento e sofre intensa deformação. A geometria do material movimentado é estreita, retangular e pouco espessa. De acordo com Skempton & Hutchinson (1969), a relação entre espessura e comprimento do movimento é tipicamente inferior ou igual a 0,1. O sentido do movimento é paralelo a inclinação geral do talude. Ocorre geralmente em superfícies de fraqueza geradas por falhas, juntas, planos de acamamento com variação de resistência ao cisalhamento entre as camadas ou ainda pelo contato entre o substrato rochoso e a camada superficial de solo. A profundidade do plano de ruptura varia entre 0,5 m e 5,0 m (FERNANDES & AMARAL, 1996).

O estudo deste tipo de escorregamento é de extrema importância, em função de sua grande interferência nas atividades humanas. Mas não é uma tarefa fácil, além das dificuldades derivadas das atividades antrópicas e das rápidas transformações que ocorrem nas cicatrizes dos deslizamentos, há também extrema variância na escala, complexidade de causas e mecanismos e variabilidade de materiais envolvidos.

3.1.3. Ocorrência

A frequência de ocorrência de desastres relacionados a movimentos de massa tem aumentado nos últimos anos, bem como a magnitude dos eventos. Segundo o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (CEPED UFSC, 2013), o número de incidentes com movimentos de massa cresceu 21,7 vezes no Brasil, de 1991 a 2012, sendo o maior aumento entre os desastres naturais analisados.

Os escorregamentos de terra são onipresentes em qualquer ambiente terrestre com declives, impulsionados por diferentes motivos, naturais e antrópicos (FROUDE & PETLEY, 2018). Para Petley (2012), a distribuição global de escorregamentos fatais é bastante heterogênea, mas áreas com alto relevo combinadas com chuvas intensas e alta densidade populacional tem maior probabilidade de apresentar deslizamentos de terra fatais (Figura 3).

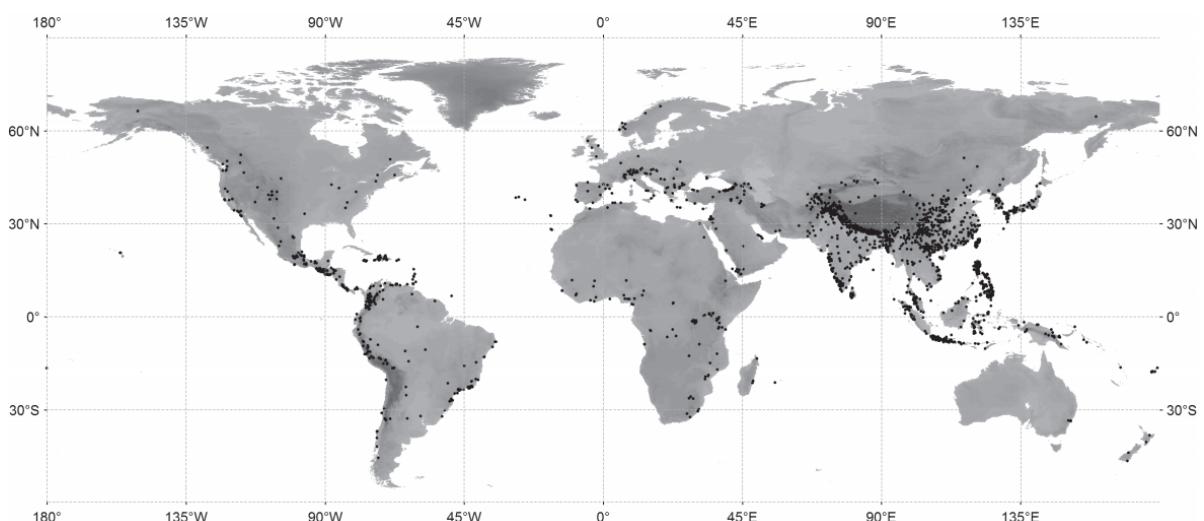


Figura 3 - Distribuição global dos deslizamentos de terra fatais.

Fonte: Petley (2012).

Na América Latina e Caribe foram registrados 611 deslizamentos de terra no período entre 2004 e 2013, segundo o Banco de Dados Aprimorado de Deslizamentos Fatais de Durham (EDFLD), causando 11.631 mortes (SEPÚLVEDA & PETLEY, 2015). Quase 90% dos casos registrados foram desencadeados por chuvas intensas, sendo 15% relacionados a furacões ou tempestades tropicais. No Brasil, este tipo de desastre é o segundo maior responsável por vítimas fatais, ficando atrás somente das enxurradas (CEPED UFSC, 2013). Contudo, o sistema de classificação brasileiro registra a ocorrência de desastres múltiplos ou complexos através do desastre de maior magnitude, de forma que escorregamentos

decorrentes de precipitação extrema são, muitas vezes, não registrados devido sua concomitância com enxurradas ou inundações.

De acordo com dados da ONU (1993), os movimentos de massa estão entre os fenômenos naturais que causam mais prejuízos financeiros e mortes no mundo. Isoladamente ou em associação com outros fenômenos, seus impactos são superiores ao de qualquer outro desastre natural, incluindo terremotos, inundações e tempestades (WP-WLI, 1993).

O processo de urbanização e aumento da concentração populacional faz com que regiões suscetíveis a movimentos de massa sejam habitadas. As características físicas do solo e do relevo e as condições climáticas aliadas aos padrões de ocupação populacional, estão associadas ao aumento das ocorrências dos movimentos de massa (MONTGOMERY, 1994). O mapa da Figura 4 mostra a distribuição das ocorrências no Brasil, entre os anos de 1991 até 2012.

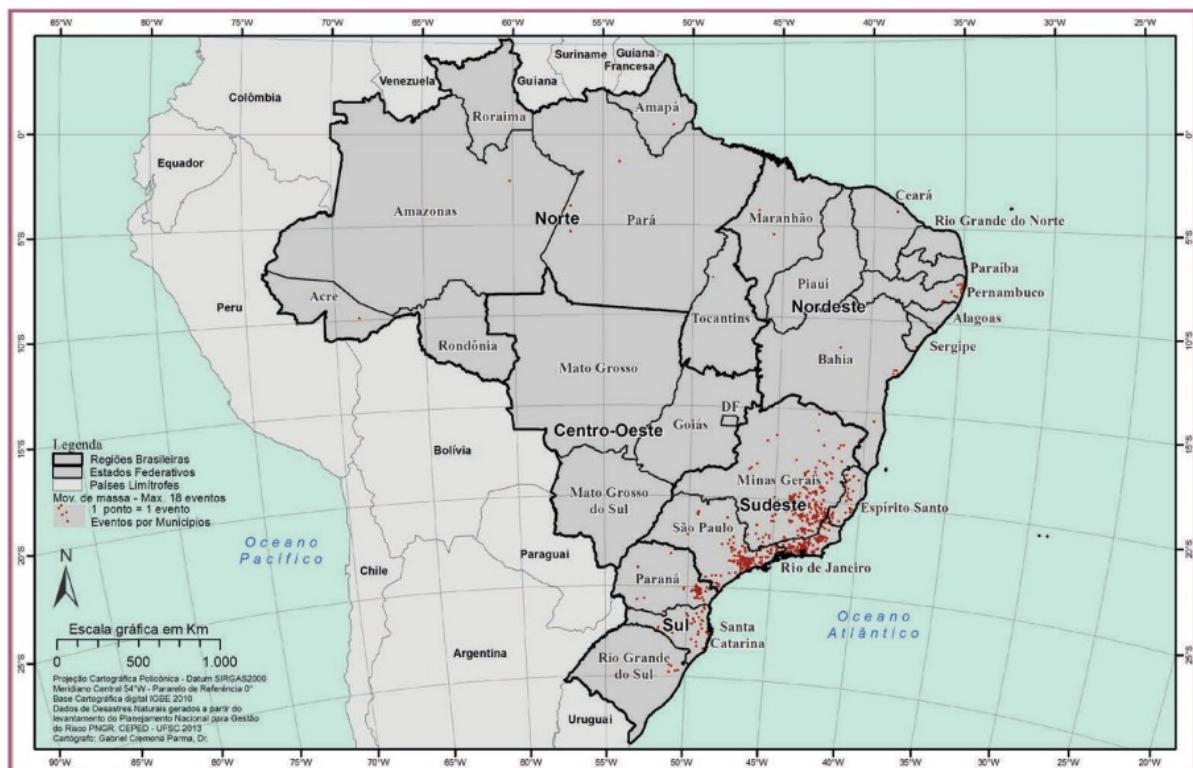


Figura 4 - Registros de movimentos de massa no Brasil, de 1991 a 2012.

Fonte: CEPED UFSC (2013).

As regiões com maior ocorrência são a Sudeste e a Sul. Os principais focos se situam em regiões litorâneas com encostas escarpadas. Também no litoral brasileiro se encontra a

maior densidade populacional (IBGE, 2020), consequência de um processo histórico de ocupação que se deu a partir das regiões litorâneas, com a implantação das primeiras comunidades e, posteriormente, aos interiores.

Além do relevo, as precipitações intensas têm papel fundamental na deflagração destes escorregamentos. Após analisar 2.620 movimentos de massa fatais não-sísmicos ao redor do mundo Petley (2012) concluiu que estes fenômenos estão fortemente relacionados com o relevo e com a incidência de chuva da região. No Brasil, estão intimamente relacionados com estações chuvosas, como mostra o gráfico da Figura 5.

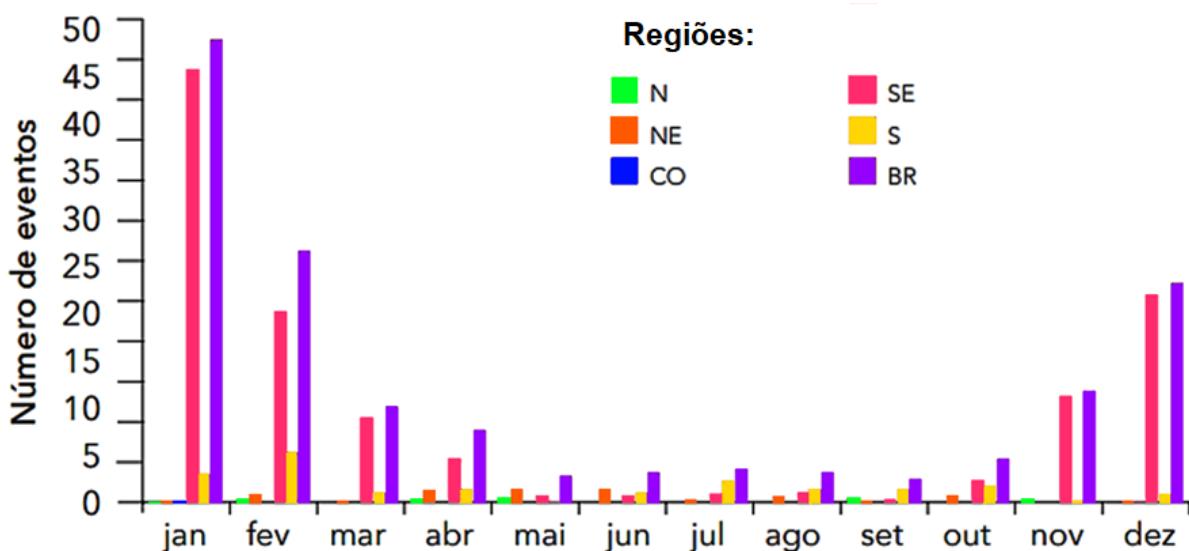


Figura 5 - Frequência mensal dos movimentos de massa ocorridos no Brasil, de 1991 a 2012.

Fonte: adaptado de CEPED UFSC (2013).

Portanto, a região sul do Brasil, com sua dinâmica climática caracterizada por precipitações de elevada intensidade nos meses de verão, apresenta alta probabilidade de ocorrência de movimentos de massa nas regiões declivosas.

3.1.4. Metodologias para a avaliação da estabilidade de encostas

O estudo sobre a estabilidade de encostas tem sido abordado por diferentes áreas do conhecimento ao longo dos anos. Na engenharia, anteriormente, a atenção estava voltada para a análise de falhas em casos particulares e suas medidas corretivas, o que não permitia o zoneamento de áreas extensas de acordo com sua suscetibilidade aos fenômenos de instabilidade (SOETERS & VAN WESTEN, 1996). O planejamento adequado, com delimitação de zonas suscetíveis a escorregamentos, pode diminuir custos com obras de

contenção e recuperação de áreas atingidas. Assim, para abordar essa problemática, foram desenvolvidas diferentes técnicas de análise.

Existem, basicamente, quatro tipos de metodologias de análise: (i.) abordagem determinística; (ii.) abordagem estatística; (iii.) abordagem heurística, e; (iv.) abordagem probabilística (baseada em inventário de escorregamentos) (VAN WESTEN *et al.*, 2005). Resumidamente, as diferentes abordagens podem ser definidas da seguinte maneira, de acordo com Soeters & van Westen (1996):

- i. **Abordagem determinística:** consiste na utilização de modelos de estabilidade de encostas combinados com modelos hidrológicos. Tem como vantagens permitir calcular valores quantitativos de estabilidade, por meio de fatores de segurança, e sua simplicidade de aplicação. Em contrapartida, apresenta problemas em função da simplificação excessiva, pela falta de informações ou pela complexidade de obtenção dos parâmetros de entrada, devido sua variabilidade espacial ou dificuldade de medição.
- ii. **Abordagem estatística:** determinação estatística das combinações de fatores que desencadearam escorregamentos no passado. Possibilita a previsão quantitativa de possíveis movimentos de massa para áreas sem ocorrência, mas que apresentam condições semelhantes. Existem dois tipos de análise estatística para risco de escorregamentos, a bivariada e a multivariada.
- iii. **Abordagem heurística:** comumente considera a opinião de especialista em geomorfologia, presente no levantamento em campo, para classificar o perigo. Representa uma combinação entre a análise do mapeamento dos movimentos de massa e da configuração geomorfológica. Esse tipo de abordagem pode ser ainda subdividido em análise geomorfológica e combinação qualitativa de mapas.
- iv. **Abordagem probabilística:** baseia-se em dados históricos de ocorrências de escorregamentos em uma área, determinando regiões suscetíveis a escorregamentos. Considerada a abordagem mais direta para o zoneamento de risco, também pode ser usada na elaboração de mapas de perigo. Os inventários de escorregamentos podem ser utilizados para análises quanto a distribuição, a atividade e a densidade de escorregamentos.

A escolha do método a ser empregado está diretamente ligada ao tamanho da área de abrangência do estudo. Mantovani *et al.* (1996) classificam três escalas comumente utilizadas: regional ($<1:100.000$), média (1:50.000 a 1:25.000) e grande ($>1:10.000$).

Além da escala da área de estudo, outros fatores têm influência na escolha, como o tempo de análise, a existência de dados ou sua facilidade de obtenção e a disponibilidade de recursos financeiros. Assim sendo, o Quadro 2 apresenta as diferentes metodologias de análises de movimentos de massa, bem como suas subdivisões e principais características.

As análises auxiliam na identificação de áreas de risco, com base no estudo da condição natural do meio físico, do detalhamento dos processos envolvidos e possíveis mecanismos desencadeadores de movimentos e da distribuição espacial das ocorrências (SOETERS & VAN WESTEN, 1996). Van Westen *et al.* (2005) consideram os dados sobre as ocorrências anteriores, como histórico de escorregamentos, os mais importantes, pois fornecem informações sobre a frequência dos fenômenos, os tipos envolvidos, os volumes movimentados e danos causados. Entretanto, nem sempre essas informações estão disponíveis.

Quadro 2 - Métodos de análise.

Tipo de análise	Técnica de análise	Características	Escala recomendada		
			Regional (1:100.000)	Média (1:25.000)	Grande (1:10.000)
Inventário	Distribuição dos escorregamentos;	Análise de distribuição e classificação dos escorregamentos.	Sim ^b	Sim	Sim
	Atividade de escorregamentos;	Análise temporal das mudanças nas características do meio.	Não	Sim	Sim
	Densidade de escorregamentos.	Cálculo da densidade de escorregamentos em unidades de terreno ou a partir de isoetas.	Sim ^b	Não	Não
Análise Heurística	Geomorfológica;	Utilização de opinião especialista de campo.	Sim	Sim ^c	Sim ^c
	Combinação qualitativa de mapas.	Utilização de opinião especialista para atribuição de pesos aos parâmetros analisados.	Sim ^d	Sim ^c	Não
Análise Estatística	Bivariada;	Calcula a importância da contribuição de fatores combinados.	Não	Sim	Não
	Multivariada.	Calcula a equação de previsão a partir de uma matriz de dados.	Não	Sim	Não
Análise Determinística	Fatores de segurança.	Aplicação de modelos hidrológicos e de estabilidade de encostas. Investigação mais detalhada.	Não	Não	Sim ^a

^a Somente em condições de terreno homogêneas, considerando a variabilidade dos parâmetros geotécnicos.

^b Somente com dados confiáveis de distribuição de escorregamentos pois um mapeamento seria muito dispendioso.

^c Somente com forte suporte de outras técnicas quantitativas para obtenção de níveis de objetividade aceitáveis.

^d Somente se existe uma base de dados confiáveis de distribuição espacial dos fatores controladores dos escorregamentos.

Fonte: adaptado de Soeters & van Westen (1996).

Atualmente, a maioria das pesquisas sobre escorregamentos de terra, para o mapeamento de áreas com suscetibilidade e risco, faz uso de ferramentas digitais para o tratamento de dados espaciais como SIG, GPS e sensoriamento remoto (VAN WESTEN, 2008). Os sistemas de informação geográfica tornaram-se essenciais para a avaliação de risco, vulnerabilidade e perigo de deslizamento, constituindo uma ferramenta sólida de gestão de desastres. Também definem o tipo de análise que pode ser realizado. As aplicações abrangem o monitoramento e a prevenção de desastres, bem como as fases de mitigação, preparação, resposta e recuperação. Os diversos componentes da avaliação de risco de escorregamento devem ser integrados em sistemas de informação utilizados no apoio à decisão espacial para a gestão de risco.

3.2. Modelagem de movimentos de massa

Um modelo é uma ferramenta de abstração que tenta representar a realidade de acordo com a sua função utilitária e por meio do seu modo de expressão, sua estrutura, suas igualdades e desigualdades (SAYÃO, 2001). É uma maneira de descrever fenômenos qualitativamente e/ou quantitativamente.

Inúmeras metodologias vêm sendo empregadas na avaliação de suscetibilidade a escorregamentos em nível de bacia hidrográfica, incluindo mapeamento geomorfológico direto, abordagens heurísticas e estatísticas e modelos fisicamente embasados (GUZZETTI *et al.*, 2006). Existem diversas classes de modelos de estabilidade de encostas, nesta revisão serão abordados os seguintes tipos:

- Modelos de estabilidade clássicos:

Com base determinística.

Com base estatística e probabilística.

- Modelos semi-empíricos:

Inventário de escorregamentos.

Abordagem heurística.

- Combinação de modelagem hidrogeológica com métodos clássicos de cálculo de estabilidade.
- Correlação semiquantitativa entre precipitação e escorregamentos.

3.2.1. Classes de modelos para o mapeamento de movimento e massa

Modelos com base determinística: métodos mais utilizados na área de geotecnia, por sua simplicidade e facilidade de uso (MOSTYN & SMALL, 1987). Porém, geram resultados muito localizados e operam com diversas premissas ou simplificações, o que pode comprometer os resultados. Aplicáveis, em geral, em áreas geologicamente e geomorfologicamente homogêneas, com escorregamentos simples (SOETERS & VAN WESTEN, 1996). Os resultados deste tipo de modelo de estabilidade são quantitativos.

Apesar dos resultados localizados, a utilização de modelos determinísticos na análise de grandes áreas tem sido possível com o auxílio de SIG, que permite manusear um grande número de dados e cálculos (AHRENDT, 2005). Quando combinados com métodos probabilísticos relacionados à variabilidade dos dados de entrada e períodos de retorno dos eventos desencadeadores, pode se obter a probabilidade de falha destes modelos (VAN WESTEN *et al.*, 2005).

Modelos com base estatística e probabilística: os modelos de base probabilística trabalham com a probabilidade de ocorrência de escorregamentos, avaliando a chance de ruptura. Os métodos que envolvem estatística podem ser divididos em análises multivariada e bivariada. De acordo com Ahrendt (2005), na primeira todos os fatores relevantes são considerados em uma malha com unidades morfométricas e analisados com regressão múltipla ou análise discriminante. Já na bivariada, a autora considera que cada fator tem seu peso definido a partir da densidade de escorregamentos, sendo combinados com o mapa de distribuição dos movimentos.

Essa classe de modelos visa ultrapassar as incertezas dos modelos determinísticos ocasionadas pela heterogeneidade dos parâmetros do solo. A categoria tem como um dos seus exemplares mais conhecidos o método de simulação de Monte Carlo, muito útil na análise de estabilidade em grandes áreas. Este consiste em resolver um problema determinístico diversas vezes a fim de construir uma distribuição estatística para a solução (MOSTYN & SMALL, 1987).

Embora a abordagem seja mais quantitativa do que os mapeamentos manuais, é de natureza empírica com limitações para a extração além da região de estudo (DIETRICH *et al.*, 2001).

Modelos baseados em inventário de escorregamentos: baseados no levantamento de informações sobre escorregamentos ocorridos anteriormente na área, tem como resultado a

distribuição espacial dos movimentos de massa. Servem como uma análise inicial para o zoneamento de áreas suscetíveis a escorregamentos e podem ser combinadas com outras análises (AHRENDT, 2005). Entretanto devem ser utilizados com cautela, visto que não consideram a variação temporal dos locais.

Modelos com base heurística: combinação do mapeamento de movimentos de massa com a avaliação das características geomorfológicas. O método pode ser dividido em duas categorias: abordagem geomorfológica e combinação qualitativa de mapas (AHRENDT, 2005).

Combinação de modelagem hidrogeológica com métodos clássicos de cálculo de estabilidade: avalia a possibilidade de ocorrência de escorregamentos deflagrados por precipitações pluviométricas. Baseia-se na análise hidrogeológica em um modelo determinístico de estabilidade de encostas (AHRENDT, 2005).

Correlação semiquantitativa entre precipitação e escorregamentos: considera a correlação entre intensidade e duração das chuvas e a ocorrência de escorregamentos. A relação existe e pode servir como base para a previsão dos fenômenos, mas ainda há obstáculos a serem ultrapassados, como a capacidade de acertar as condições de umidade preliminares e a limitação da área de abrangência (AHRENDT, 2005).

Para Feel (1994), esta correlação é útil na previsão de escorregamentos e deve ser considerada quando não houver possibilidade de investigação mais detalhada, mesmo que seja uma aproximação subjetiva. Embora seja citado na literatura como uma classe de modelo para a análise de estabilidade de encostas, este último difere dos outros tipos pois trata da análise da deflagração dos movimentos e não do seu mapeamento.

Como visto, a avaliação de suscetibilidade a escorregamentos vem sendo aprimorada com a modelagem. De acordo com Safaei *et al.* (2011), a técnica fornece boas informações quantitativas que podem ser usadas diretamente em projetos de engenharia ou na quantificação de risco, especialmente a abordagem determinística. Entretanto, para a adequada utilização dos modelos se faz necessário o detalhamento de inúmeros parâmetros de entrada, oriundos de ensaios de laboratório e medições de campo, limitando a utilização em grande escala (VAN WESTEN *et al.*, 2005).

3.2.2. Modelos de suscetibilidade a escorregamentos translacionais

Modelos que possam auxiliar na definição de estratégias de gestão a nível de bacia, com a previsão de possíveis escorregamentos e produção de sedimentos, se fazem

necessários, em apoio ao planejamento do uso do solo e projetos de engenharia (BATHURST *et al.*, 2005). A avaliação da suscetibilidade a escorregamentos geralmente se dá por meio de modelos resultantes do produto do acoplamento de um modelo mecânico, correspondente a estabilidade, e um modelo hidrológico (MICHEL, 2013).

No caso dos escorregamentos translacionais, o modelo de encosta infinita, descrito por Selby (1993), corresponde a parcela mecânica. Os modelos hidrológicos podem ser estacionários ou dinâmicos. O primeiro tipo é mais simples e limitado a um fluxo subsuperficial permanente paralelo a encosta, sem considerar a variação temporal (MICHEL, 2013). Já os modelos dinâmicos examinam a infiltração transiente e a redistribuição dos padrões de saturação do solo ao longo do tempo (SAFAEI *et al.*, 2011).

Entre os modelos de maior destaque na literatura, para análise de estabilidade de encostas, estão: SHALSTAB (DIETRICH & MONTGOMERY, 1998), TRIGRS (BAUM *et al.*, 2002) e SINMAP (PACK *et al.*, 1998). Sendo os dois primeiros determinísticos e o último probabilístico.

O SHALSTAB é voltado para o mapeamento de suscetibilidade a escorregamentos translacionais, enquanto o TRIGRS permite a simulação do avanço da frente de infiltração nas encostas e o SINMAP avalia o fator de estabilidade nas vertentes.

3.2.3. Comparação entre modelos mais difundidos

Para avaliar as particularidades dos modelos de estabilidade mais utilizados, uma das maneiras é consultar estudos que comparam o desempenho dos modelos em diferentes contextos. Isso permite compreender melhor a aplicabilidade de um modelo para determinado problema.

Ao confrontarem o modelo SHALSTAB com o modelo SINMAP, Meisina & Scarabelli (2007) e Andriola *et al.* (2009) concluíram que o primeiro modelo obteve resultados mais realistas do que os do modelo probabilístico. Porém, Andriola *et al.* (2009) mostrou, ainda, que o SHALSTAB foi mais conservador em sua análise, com a maior área indicada com alta suscetibilidade aos movimentos. Ambos os modelos funcionam como uma extensão dentro de um SIG e possibilitam que mapas de natureza probabilística possam ser utilizados como dados de entrada (SIMÕES *et al.*, 2016).

Os resultados obtidos por Vieira *et al.* (2009), na comparação entre os modelos TRIGRS e SHALSTAB, se mostraram bastante semelhantes, decorrentes do importante papel desempenhado pela topografia no controle da susceptibilidade a escorregamentos. Entretanto,

em análise similar, Sorbino *et al.* (2010) concluíram que o TRIGRS apresenta desempenho superior. Análises realizadas por Baum (2005) também demonstraram maior eficácia do modelo TRIGRS para a investigação de movimentos de massa em comparação com outros modelos de estabilidade. Entretanto, embora o modelo TRIGRS apresente melhor desempenho em relação a outros modelos em muitos estudos, ele também é mais complexo, necessitando de um maior número de parâmetros de entrada (LISTO *et al.*, 2006).

Estudo comparativo entre os modelos SHALSTAB, SINMAP e TRIGRS concluiu que na ausência de informações é preferível a utilização de modelos mais simples, como o SHALSTAB (PAUL *et al.*, 2019). Michel *et al.* (2012) recomenda a aplicação do SHALSTAB para identificar áreas suscetíveis a escorregamentos translacionais rasos, enquanto que o SINMAP poderia ser aplicado para o zoneamento de perigo ou outros fins menos específicos. Ambos os modelos são fisicamente embasados e contam com a grande vantagem, em relação a outros métodos, de não necessitarem de histórico de escorregamentos em suas análises (LISTO *et al.*, 2006).

3.2.4. SHALSTAB

O SHALSTAB demonstra bom desempenho no mapeamento de áreas suscetíveis a escorregamentos translacionais em comparação com outros modelos, sendo considerado uma boa opção para a análise. O modelo tem sido utilizado na identificação destas áreas em diversos países (D'AMATO AVANZI *et al.*, 2009; ANDRIOLA *et al.*, 2009), inclusive no Brasil (GUIMARÃES *et al.*, 2003; MICHEL, *et al.*, 2014; REGINATTO *et al.*, 2012).

A análise de escorregamentos translacionais rasos é feita, comumente, por meio de um modelo de estabilidade de encosta infinita, aplicado para situações em que o comprimento da encosta é muito maior que a profundidade do solo (MICHEL *et al.*, 2012). Por esse motivo e considerando sua boa performance, o modelo escolhido como base para este estudo é o *Shallow Landsliding Stability Model*, abreviado para SHALSTAB e desenvolvido por Dietrich e Montgomery (1998).

A incorporação do modelo matemático de Montgomery e Dietrich (1994) em ambiente SIG, com a geração do SHALSTAB, permite uma análise espacialmente discretizada da suscetibilidade a escorregamentos translacionais. A proposta consiste em um modelo determinístico distribuído, regrado pela combinação do modelo de estabilidade de encosta infinita e do modelo hidrológico de regime permanente e uniforme.

Para o modelo de estabilidade de encosta infinita utiliza o critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Este compara os componentes desestabilizadores da gravidade e os componentes

estabilizadores do atrito e da coesão em um plano de falha paralelo à superfície do solo, desprezando os efeitos das margens. Do modelo de estabilidade de encosta para vertentes infinitas, representado na Figura 6, se extraem as equações (1), (2) e (3).

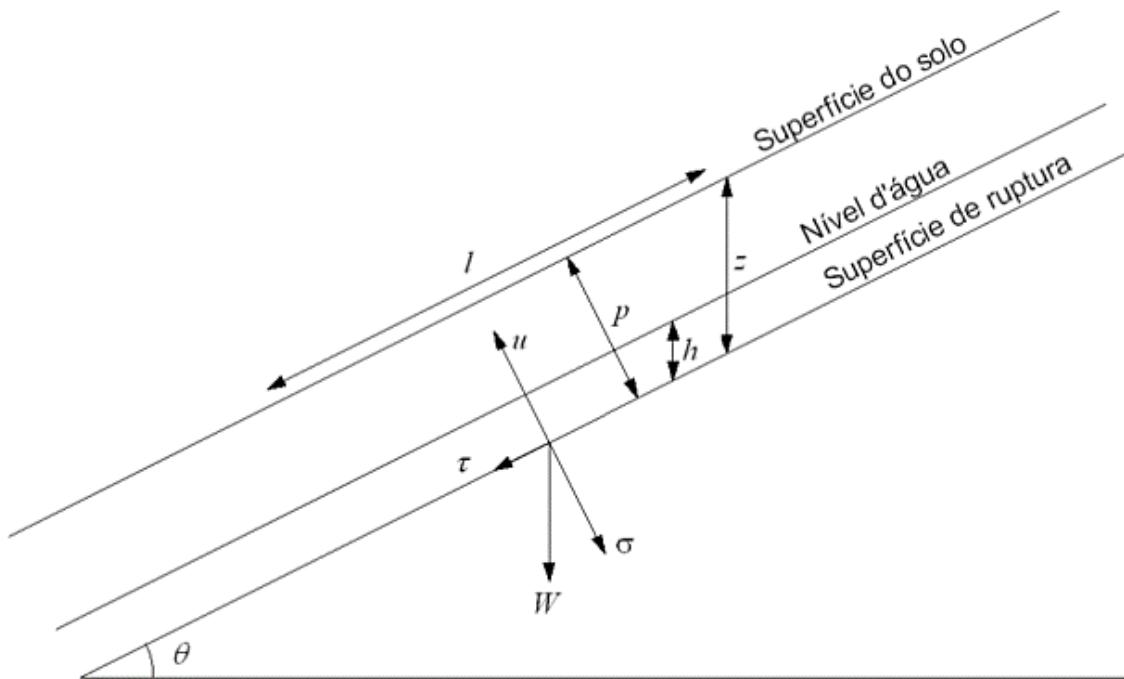


Figura 6 - Representação do modelo de encosta infinita.

Fonte: Michel (2013).

$$\tau = z \cdot \rho_s \cdot g \cdot \cos\theta \cdot \sin\theta \quad (1)$$

onde:

τ = tensão cisalhante (Pa);

z = profundidade do solo (m);

ρ_s = massa específica do solo (kg/m^3);

g = aceleração da gravidade (m/s^2);

θ = declividade do terreno (graus).

$$\sigma = z \cdot \rho_s \cdot g \cdot \cos^2\theta \quad (2)$$

onde:

σ = tensão normal (Pa);

$$u = h \cdot \rho_w \cdot g \cdot \cos^2 \theta \quad (3)$$

onde:

u = poro pressão (Pa);

h = altura da coluna d'água (m);

ρ_w = massa específica da água (kg/m^3);

O critério de falha de Mohr-Coulomb pode então ser avaliado usando a seguinte expressão (4):

$$\tau = C + \sigma - u \cdot \tan \phi \quad (4)$$

onde:

C = coesão (Pa);

ϕ = ângulo de atrito interno do solo (graus).

Assim, unindo as equações supramencionadas obtém-se a porção saturada do solo no momento da ruptura da encosta (h/z), como mostra a equação (5).

$$\frac{h}{z} = \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi}\right) + \frac{C}{z \cdot g \cdot \cos^2 \theta \cdot \tan \phi \cdot \rho_w} \quad (5)$$

Por meio da equação (5) é possível identificar a altura da coluna d'água presente dentro da camada de solo necessária para a desestabilização da encosta. Também, pode-se definir duas condições extremas: (i) o solo está completamente seco e há ausência de coluna d'água, desta maneira $h/z = 0$; e (ii) o solo está completamente saturado e h torna-se igual a z , consequentemente $h/z = 1$.

Para cada uma das condições acima é possível estabelecer um valor limite de inclinação do talude, inferior ou superior, para o qual a estabilidade é alterada. Para a primeira condição, define-se um ângulo de θ limite, acima do qual não há possibilidade de estabilidade, mesmo em condições de escassez total de água. Quando algum pixel apresenta θ acima deste ângulo limite, o pixel é dito incondicionalmente instável. Este ângulo é dado pela equação (6).

$$\tan \theta \geq \tan \phi + \frac{C}{z \cdot g \cdot \cos^2 \theta \cdot \rho_s} \quad (6)$$

Em contrapartida, para a segunda condição é possível estabelecer um ângulo de θ abaixo do qual, mesmo em condições de saturação completa do solo, o terreno permanece estável. Pixéis que apresentarem θ menor do que o ângulo limite serão classificados como incondicionalmente estáveis. Esta condição extrema é descrita pela equação (7).

$$\tan\theta \leq \tan\phi \cdot \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_w}\right) + \frac{C}{z \cdot g \cdot \cos^2\theta \cdot \rho_s} \quad (7)$$

Quando uma encosta não é íngreme o suficiente ao ponto de ser incondicionalmente instável ou tão suave ao ponto de ser incondicionalmente estável, há uma altura de coluna d'água capaz de ocasionar sua falha. A definição da porcentagem de saturação necessária para gerar instabilidade se dá por meio de um modelo hidrológico.

O modelo hidrológico empregado no SHALSTAB é o de estado uniforme de recarga, proposto por O'Loughlin (1986), que estabelece uma relação entre a saturação do solo, a área de contribuição específica, a quantidade de chuva, a transmissibilidade e a declividade. A metodologia empregada mostra que a saturação do solo depende da área de drenagem, do contorno e do comprimento do declive e define o índice de saturação como uma relação entre a espessura do solo saturado e a espessura total do solo (SAKAMOTO *et al.*, 2015). A Figura 7 sintetiza o modelo hidrológico de estado uniforme, representado pela equação (8).

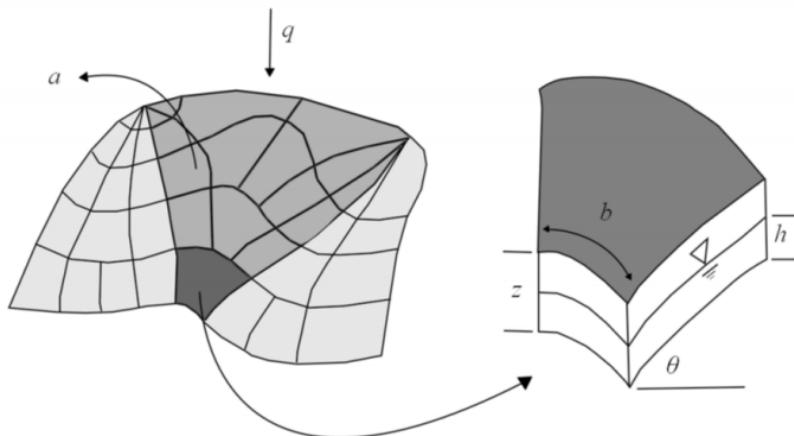


Figura 7 - Representação esquemática do modelo hidrológico.

Fonte: Michel (2013) adaptado de Montgomery e Dietrich (1994).

$$w = \frac{q \cdot a}{T \cdot b \cdot \sin\theta} \quad (8)$$

onde:

w = umidade do solo (m/m);

q = taxa de recarga uniforme (m/dia);

a = área de contribuição a montante (m^2);

T = transmissividade do solo (m^2/dia);

b = comprimento de contorno da fronteira inferior de cada elemento (m).

Assim, igualando as equações (5) e (8) é possível estabelecer a parcela saturada do solo em determinado ponto, através de parâmetros geomorfológicos e hidrológicos. Como apresentado na equação (9).

$$\frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi}\right) + \frac{C}{z \cdot g \cdot \cos^2\theta \cdot \tan\phi \cdot \rho_w} = \frac{q \cdot a}{T \cdot b \cdot \sin\theta} \quad (9)$$

A solução da equação (9) é dada em função de dois parâmetros hidrológicos, q e T , como mostra a equação (10). Esta é utilizada pelo SHALSTAB para a determinação das classes de estabilidade não extremas.

$$\frac{q}{T} = \frac{b}{a} \cdot \sin\theta \cdot \left\{ \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi}\right) + \frac{C}{z \cdot g \cdot \cos^2\theta \cdot \tan\phi \cdot \rho_w} \right\} \quad (10)$$

O resultado do SHALSTAB classifica a região de interesse em classes de suscetibilidade a deslizamentos translacionais rasos: as classes mais extremas incondicionalmente estável e saturado e incondicionalmente instável e não saturado e outras em função do parâmetro livre da relação entre a quantidade de chuva e a transmissividade do solo (q/T).

Portanto, para a aplicação do modelo SHALSTAB, são necessários dados de entrada topográficos, hidrológicos e geotécnicos. As simulações são realizadas no software ArcView 3.2. Ao total são seis parâmetros de entrada: coesão do solo (c_s), ângulo de atrito interno (ϕ), profundidade do solo (z), massa específica do solo (ρ_s), área de contribuição específica (ab) e declividade do terreno (θ). Sendo os dois últimos extraídos de um modelo digital de terreno (MDT) em formato *raster*, resultando em um valor único para cada célula, possibilitando uma análise individual. A escala dos mapeamentos realizados define a qualidade destas informações.

A fim de aprimorar o equacionamento do modelo, Michel (2013) avaliou a influência dos parâmetros de vegetação na análise de estabilidade de encostas, com a inclusão da coesão das raízes e sobrecarga da vegetação. Os novos parâmetros foram inseridos no modelo de estabilidade, alterando a equação (5) para a equação (11).

$$\frac{h}{z} = \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} + \frac{S_w}{z \cdot g \cdot \cos\theta \cdot \rho_w} \right) \cdot \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi}\right) + \frac{c_s + c_r}{z \cdot g \cdot \cos^2\theta \cdot \tan\phi \cdot \rho_w} \quad (11)$$

onde:

S_w = sobrecarga devido ao peso da vegetação (Pa);

c_s = coesão do solo (Pa);

c_r = coesão das raízes (Pa).

Desta forma as classes extremas também têm seu equacionamento alterado. As equações (6) e (7) são reescritas pelas equações (12) e (13), respectivamente.

$$\tan\theta \geq \tan\phi + \frac{c_s + c_r}{z \cdot g \cdot \cos^2\theta \cdot \rho_s \cdot \left(1 + \frac{S_w}{z \cdot g \cdot \cos\theta \cdot \rho_s}\right)} \quad (12)$$

$$\tan\theta \leq \left(1 - \frac{1}{\frac{S_w}{z \cdot g \cdot \cos\theta \cdot \rho_w} + \frac{\rho_s}{\rho_w}}\right) \cdot \tan\phi + \frac{c_s + c_r}{z \cdot g \cdot \cos^2\theta \cdot \rho_s \cdot \left(1 + \frac{S_w}{z \cdot g \cdot \cos\theta \cdot \rho_s}\right)} \quad (13)$$

Por fim, o parâmetro livre, anteriormente descrito pela equação (10), é modificado para a equação (14).

$$\frac{q}{T} = \frac{b}{a} \cdot \sin\theta \cdot \left\{ \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} + \frac{S_w}{z \cdot g \cdot \cos\theta \cdot \rho_w} \right) \cdot \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi} \right) + \frac{c_s + c_r}{z \cdot g \cdot \cos^2\theta \cdot \tan\phi \cdot \rho_w} \right\} \quad (14)$$

O equacionamento utilizado para o presente trabalho é o proposto por Michel (2013), que considera o efeito da vegetação para o cálculo de estabilidade.

O SHALSTAB, em sua forma original, apresenta algumas limitações: está disponível em um *software* pouco utilizado, não considera a heterogeneidade espacial dos parâmetros do solo e não considera o efeito da vegetação na estabilidade de encostas. Já versões posteriores, como as criadas para o ArcGIS e QGIS com modelador gráfico (GODOY *et al.*, 2018), apresentam limitações quanto a compatibilidade das versões dos *softwares*, ou não estão inseridas em um *software* livre e não consideram a influência da vegetação. Esses aspectos tornam a ferramenta menos acessível, fazendo com que sua utilização seja dificultada. A inserção da ferramenta SHALSTAB em um programa gratuito e globalmente difundido, com linguagem Python, permitindo a utilização de dados discretizados e considerando a influência da vegetação, visa superar as limitações das versões anteriores.

3.3. Otimização de modelos

O resultado de um modelo só é válido quando for calibrado previamente. A calibração dos parâmetros de um determinado problema inicia com a avaliação das variáveis relevantes, o que pode ser feito através de uma análise de sensibilidade, na qual é verificada a influência de cada variável individualmente (MENEZES, 2015). Porém, pela grande quantidade de possibilidades, muitas vezes a análise é demasiadamente demorada ou até impraticável. Em

situações como essa é necessário otimizar os processos, em busca da melhor solução possível de maneira rápida.

Atualmente os ajustes manuais dão lugar aos métodos matemáticos de otimização que permitem a automatização da calibração, facilitando seu uso. Os algoritmos de otimização auxiliam na busca do ponto ótimo de um arranjo de forma mais eficiente. A grandeza a ser otimizada dependerá de características do sistema, conhecidas como variáveis de projeto, e o objetivo é determinar quais variáveis resultarão no valor ótimo da função (MENEZES, 2015).

Durante o processo de calibração existe a possibilidade de o modelo simular valores muito próximos aos observados mesmo empregando parâmetros irrealistas. A fim de evitar inconsistências desse tipo essa estimativa ótima deve estar dentro da faixa de variação aceitável dos parâmetros do modelo (CENSI, 2019). Deve-se estabelecer limites inferiores ou superiores para os valores a serem otimizados, para que os parâmetros estabelecidos sejam condizentes com a realidade. Não basta que o modelo reproduza assertivamente o comportamento do sistema estudado se não o faz pelas razões corretas (OLIVA, 2003).

Segundo Leal (2002), os elementos básicos de um problema de otimização são: conjunto de instâncias ou objetos de entrada; conjunto de soluções viáveis ou objetos de saída, associados a cada instância; uma função medida definida para cada solução viável; e declaração do objetivo ótimo do problema: maximização ou minimização.

Diversos autores utilizam métodos de otimização para melhorar a aplicação de modelos (CELESTE & CHAVES, 2014; KRENN *et al.*, 2017). Um dos métodos mais recorrentes para a determinação dos valores ótimos é a análise numérica de Monte Carlo. O método de Monte Carlo consiste basicamente, em gerar diversos cenários futuros aleatórios e analisar a distribuição probabilística de cada um deles. Usado especialmente em situações em que o número de fatores incluídos no problema é tão grande que a sua solução analítica é demorada ou dita impossível (DORNELLES FILHO, 2000).

Para avaliar os resultados de diferentes simulações um método comumente utilizado (PAUL, 2020; SCHWARZ, 2019) é a análise de curvas *ROC* (*Receiver Operating Characteristics*) (FAWCETT, 2006). As curvas *ROC* relacionam a taxa de verdadeiros positivos com falsos positivos, possibilitando a escolha do cenário com melhores resultados. No entanto, para avaliar a curva inteira, é necessário extrair algumas características distintivas dela, como a área sob a curva (BRADLEY, 1997).

3.4. QGIS

O QGIS, antigo Quantum GIS, é um Sistema de Informação Geográfica que permite a visualização, edição e análise de dados georreferenciados. Um software livre de código aberto, o que permite a criação e inclusão de novas ferramentas pelos usuários.

O *software* é um projeto oficial da *Open Source Geospatial Foundation* (OSGeo), licenciado segundo a Licença Pública Geral GNU. Um programa mundialmente difundido que funciona em diversos sistemas operacionais, entre eles Android, Linux, Mac OSX e Windows e suporta inúmeros formatos de arquivos como vetores, *rasters*, bases de dados e funcionalidades.

O programa oferece a integração com outros pacotes GIS de código aberto, incluindo PostGIS, GRASS e MapServer para dar ao usuário a capacidade de estender suas funcionalidades. Escrito em C++, permite, ainda, a inserção de plugins desenvolvidos usando código em linguagem de programação C++ ou Python.

3.5. Python

Python é desenvolvido sob uma licença de código aberto aprovado pela OSI (*Open System Interconnection*), tornando-o livremente utilizável e distribuível, mesmo para uso comercial. A licença do Python é administrada pela *Python Software Foundation*.

Uma linguagem de programação criada por Guido van Rossum, em 1991, cujos objetivos eram: produtividade e legibilidade. A fim de cumprir esses propósitos a linguagem tem como características:

- baixo uso de caracteres especiais;
- o uso de identação para marcar blocos;
- uso praticamente inexistente de palavras-chave voltadas para a compilação; e
- coletor de lixo para gerenciar automaticamente o uso da memória.

Além disso, Python suporta múltiplos padrões de programação, podendo ser usado para programas simples e rápidos, mas com estruturas de dados complexas. Combinado com ferramentas de geoprocessamento, como o QGIS, possibilita a criação de ferramentas para diversas funcionalidades, incluindo a análise de estabilidade de encostas.

A ferramenta proposta no presente trabalho será programada em linguagem Python, visando a eficácia e rapidez na modelagem e objetivando a representação dos eventos de forma realista.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho visa à criação de uma ferramenta de análise de estabilidade de encostas em ambiente SIG. Neste capítulo serão descritos os materiais e métodos utilizados para atender aos objetivos estabelecidos na etapa de apresentação.

De maneira geral, os métodos adotados para este trabalho consistem na inclusão de modelo baseado no SHALSTAB no software QGIS, considerando o efeito da vegetação. Após, foram realizadas análises de desempenho do modelo com base nos escorregamentos resultantes do evento ocorrido em 2017 na bacia de estudo. O fluxo de trabalho está representado em fluxograma na Figura 8.

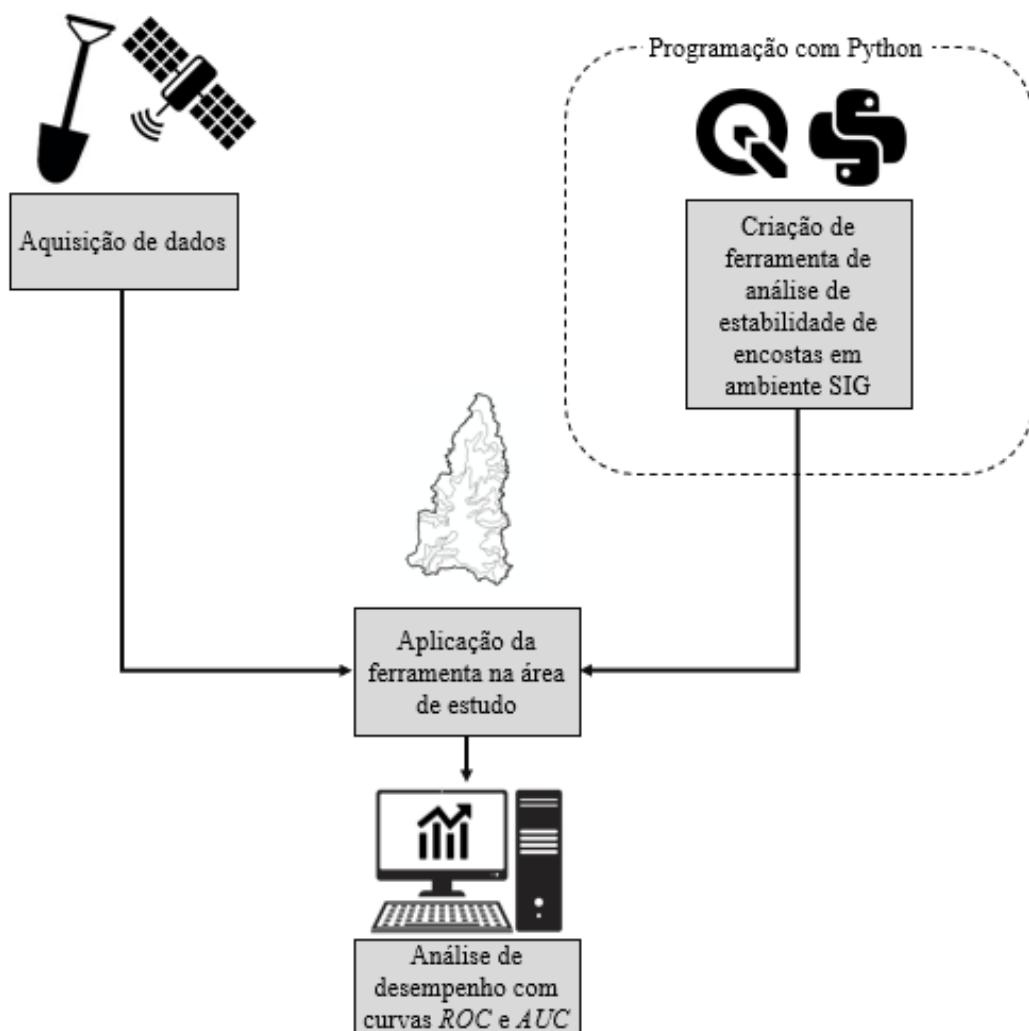


Figura 8 - Fluxograma das atividades.

4.1. Área de estudo

A área de estudo do presente trabalho é a Bacia Hidrográfica do Rio Mascarada, no nordeste do estado do Rio Grande do Sul. Com área de aproximadamente 318 km², a bacia abrange parcialmente os municípios de Riozinho, Rolante e São Francisco de Paula, sendo este último sede da nascente do rio que dá nome a bacia. O rio Mascarada é tributário do rio Rolante, que por sua vez deságua no rio dos Sinos.

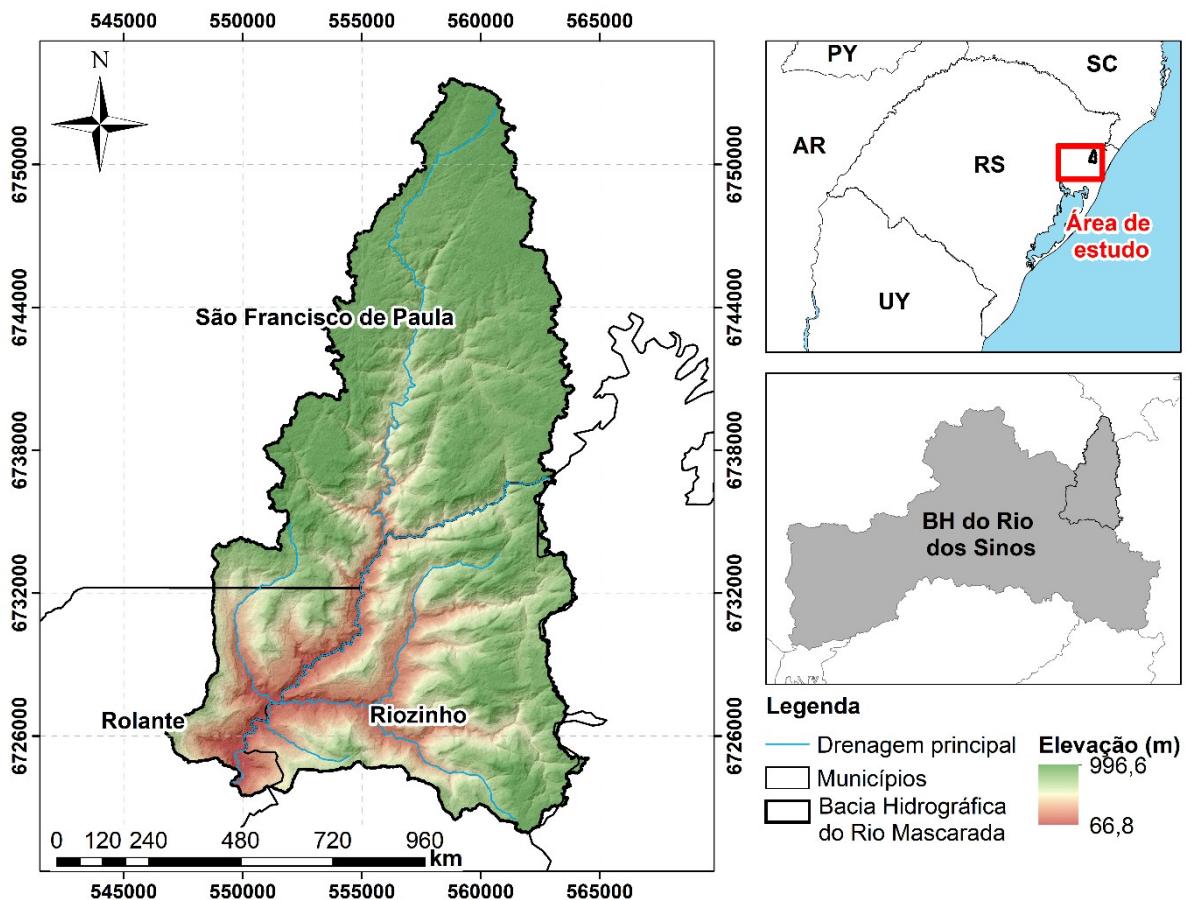


Figura 9 - Mapa de localização da bacia do rio Mascarada.

Dantas *et al.* (2010) afirma que os solos da região são pouco profundos, entretanto, devido a elevada umidade, concentram uma vegetação de porte florestal significativa. Para o autor estas condições tornam a região suscetível à movimentos de massa, com destaque para os escorregamentos translacionais e fluxos de detritos.

A bacia possui elevada amplitude altimétrica, com diferença de 930 m entre os pontos de máxima e mínima altitude. Com declividades que variam de 0 a 87°. Considerando as

classes de declividade sugeridas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) (1979) e que a maior parte dos valores de declividade se encontram na faixa de 10 a 35°, pode-se determinar que a bacia é caracterizada por um relevo ondulado a fortemente ondulado com diversas áreas escarpadas e regiões montanhosas. A Figura 10 apresenta o mapa de declividades da bacia.

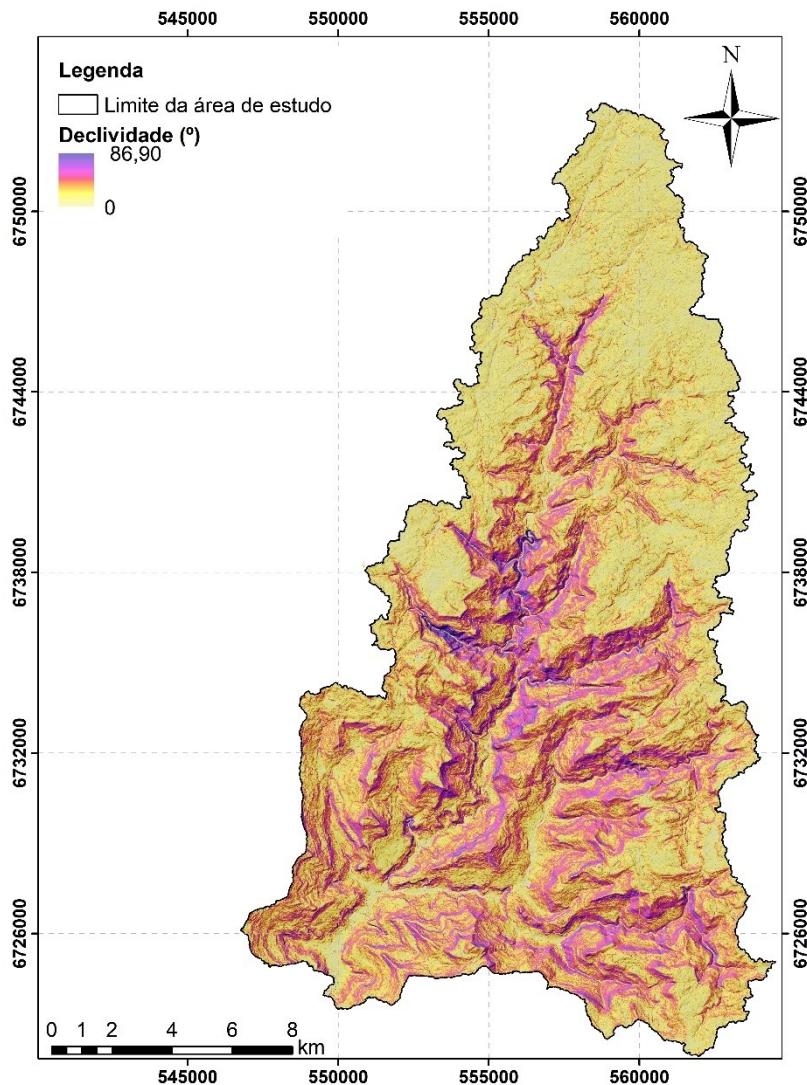


Figura 10 - Declividade da bacia do rio Mascarada.

De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, a região se encontra na interface entre as classes Cfa e Cfb. Logo, apresenta clima temperado subtropical a oceânico, com inverno e verão bem definidos e elevados índices pluviométricos distribuídos ao longo do ano, porém com picos nos meses quentes (PEEL *et al.*, 2007). Segundo o Atlas Climático do Rio Grande do Sul a temperatura média dessa região é de 20°C, com regime de chuvas

anual médio de 1.600 mm (MATZENAUER *et al.*, 2011). A orografia, que causa o movimento ascensional do ar, tem forte influência nos eventos de precipitação na cabeceira da bacia.

No dia 5 de janeiro de 2017, a região foi atingida por um evento de precipitação pluviométrica extremo que favoreceu a ocorrência de movimentos de massa. Segundo dados de pluviômetros rurais não oficiais, foram registrados valores máximos de 272 mm em poucas horas (SEMA, 2017). A comparação da situação da bacia, antes e após a deflagração dos escorregamentos, pode ser visualizada na Figura 11 a) e b).



Figura 11 - a) Bacia do rio Mascarada dez/2016 (Sensor Sentinel-2A); b) Bacia do rio Mascarada dez/2017 (Sensor Sentinel-2B).
Fonte: Schwarz (2019).

Após o episódio foram contabilizadas um total de 407 cicatrizes ao longo da bacia, sendo que 356 são de escorregamentos e as 51 restantes são de fluxo de detritos (CARDOZO *et al.*, 2021). Os escorregamentos ocorridos na bacia foram, principalmente, do tipo translacional, com uma superfície plana de ruptura e baixa profundidade (SCHWARZ, 2019). Segundo o Diagnóstico Preliminar emitido pelo Departamento de Recursos Hídricos (SEMA, 2017), o evento que ocasionou os movimentos de massa também causou inundações nos municípios de Rolante e Taquara e elevado aporte de sedimentos ao curso hídrico, o que resultou na interrupção do abastecimento de água nos municípios a jusante dos escorregamentos.

4.2. Parâmetros de entrada

O modelo exige a implementação de oito parâmetros de entrada, obtidos através de modelo digital de terreno ou coleta de dados em campo. Os dados de entrada necessários para os cálculos são: ângulo de atrito interno do solo [graus], área de contribuição específica ou área de contribuição dividida pelo comprimento de célula [m], coesão das raízes [Pa], coesão do solo [Pa], declividade do terreno [graus], massa específica do solo [kg/m³], profundidade do solo [m] e sobrecarga da vegetação [Pa]. Os arquivos no formato de mapas podem conter valores discretizados ou constantes.

O MDT utilizado foi elaborado pela empresa NTT DATA Corporation, no formato GeoTIFF. O arquivo tem como projeção original a *World Geodetic System - WGS 1984* e possui resolução espacial por pixel de 1 m x 1 m. A alta resolução do modelo digital de terreno é resultado da coleta de imagens de múltiplos satélites da constelação DigitalGlobe, estas representam a área sob múltiplos ângulos e são processadas em conjunto (PAUL, 2020).

Do MDT são extraídas as informações de dois parâmetros de entrada, são eles: área de contribuição específica e declividade do terreno. O primeiro parâmetro a ser criado é o de área de contribuição específica. Para auxiliar no processo são utilizadas ferramentas da extensão TauDEM 5.1 do software QGIS.

De acordo com Tarboton (2003), o TauDEM (*Terrain Analysis Using Digital Elevation Models*) é um conjunto de ferramentas para a extração e análise de informações hidrológicas a partir de modelos digitais de elevação. A extensão foi desenvolvida pelo Grupo de Pesquisa em Hidrologia (*Hydrology Research Group*) da *Utah State University*, nos Estados Unidos. A utilização de extensões como o TauDEM tem se consolidado ao longo do tempo, pois automatiza a obtenção de informações importantes para a gestão dos recursos hídricos (LEAL *et al.*, 2017).

Para determinar as direções dos fluxos e o acúmulo da água com o TauDEM optou-se pelo método de análise em infinitas direções, isto é, D-Infinito (TARBOTON, 1997). Estudos de Tarboton (1997) e Bosquia *et al.* (2013) demonstram a eficiência do método escolhido e que o mesmo supera as limitações de outros métodos, como D8, ao considerar infinitas possibilidades de direção para o fluxo.

O ângulo da direção do fluxo D-infinito é determinado pelo declive mais acentuado dentre oito feições triangulares formadas em um grid 3x3, centrado na célula de grade de interesse, com orientação entre 0 e 2π . A partir da direção, são calculados os ângulos utilizados no particionamento do fluxo entre duas células. Esses ângulos são calculados a

partir do leste no sentido anti-horário e são formados pelo vetor do fluxo e as duas arestas das feições triangulares, como mostra a Figura 12.

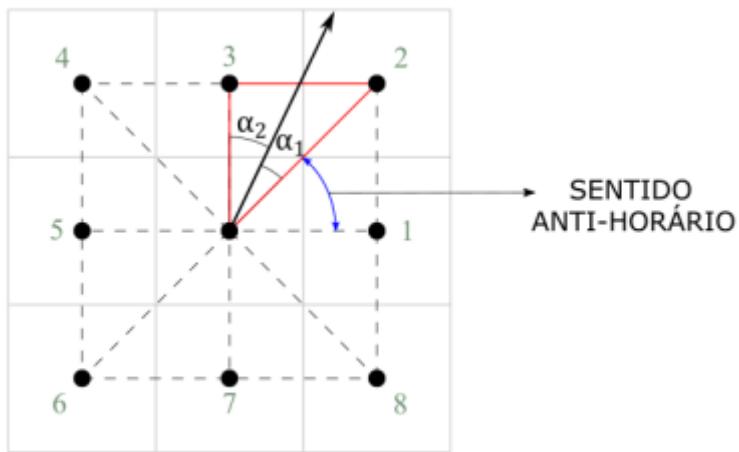


Figura 12 - Diagrama de funcionamento do algoritmo D-infinito.

Fonte: Paul (2020) adaptado de Tarboton (1997).

O fluxo resultante é proporcional entre as duas células vizinhas que definem a faceta triangular. A área de contribuição de cada célula é então a sua própria contribuição mais o aporte das células vizinhas que têm alguma fração drenando para ela. Esse é o funcionamento da ferramenta escolhida para a análise de fluxo, o procedimento de utilização é descrito a seguir:

- i) O primeiro passo é preencher falhas no MDT, o que é feito com a função **Remover depressão** (*Pit remove*) das *Ferramentas de análise de grade básicas* do TauDEM. Esta ferramenta remove todos os poços, depressões e buracos espúrios;
- ii) Após remover as depressões espúrias utiliza-se a ferramenta **Direções de fluxo D-Infinito** (*D-infinity Flow Direction*) nas *Ferramentas de análise de grade básicas* do TauDEM. Este algoritmo calcula o fluxo de água em infinitas direções e também gera o mapa de declividades, que será utilizado posteriormente;
- iii) Após determinar as direções de fluxo utiliza-se a ferramenta **Área de contribuição D-Infinito** (*D-infinity Contributing Area*) presente nas *Ferramentas de análise de grade básicas* do TauDEM. Este algoritmo apresenta a rede de drenagem ou área de contribuição específica.

O segundo parâmetro a ser gerado é a declividade, com base no mapa de **declividade** (*D-Infinity Slope Grid*), gerado anteriormente com a ferramenta **Direções de fluxo D-Infinito**

(*D-infinity Flow Direction*). Com a *calculadora raster* é possível realizar a conversão por meio do arcotangente deste *raster*, multiplicado por 180 e dividido pela constante π .

Os parâmetros ângulo de atrito interno do solo, coesão do solo e profundidade do solo foram coletados em campo, através de ensaios com *Borehole Shear Test* (BHST) e medições de profundidade em pontos de interesse da bacia e posteriormente distribuídas pelas unidades geotécnicas (UG). As unidades geotécnicas são zonas de ocorrência de solos com perfis de origem, características físicas e morfológicas e comportamento geotécnico semelhante (BASTOS & DIAS, 1995). São diversos os estudos sobre a determinação de UG, de forma que a metodologia adotada para a bacia do Mascarada considera a sobreposição da litologia e da pedologia. Com a geologia é possível inferir as características do horizonte de alteração da rocha, já a pedologia permite determinar as características dos horizontes superficiais (DIAS, 1995).

Segundo o Levantamento de Reconhecimento de Solos do Estado do Rio Grande do Sul, em escala 1:750.000 (BRASIL, 1973), são encontrados três tipos de solo principais na região, são estes: argissolo bruno-acinzentado, cambissolo húmico alumínico e neossolo regolítico húmico. A Figura 13 apresenta a pedologia da bacia.

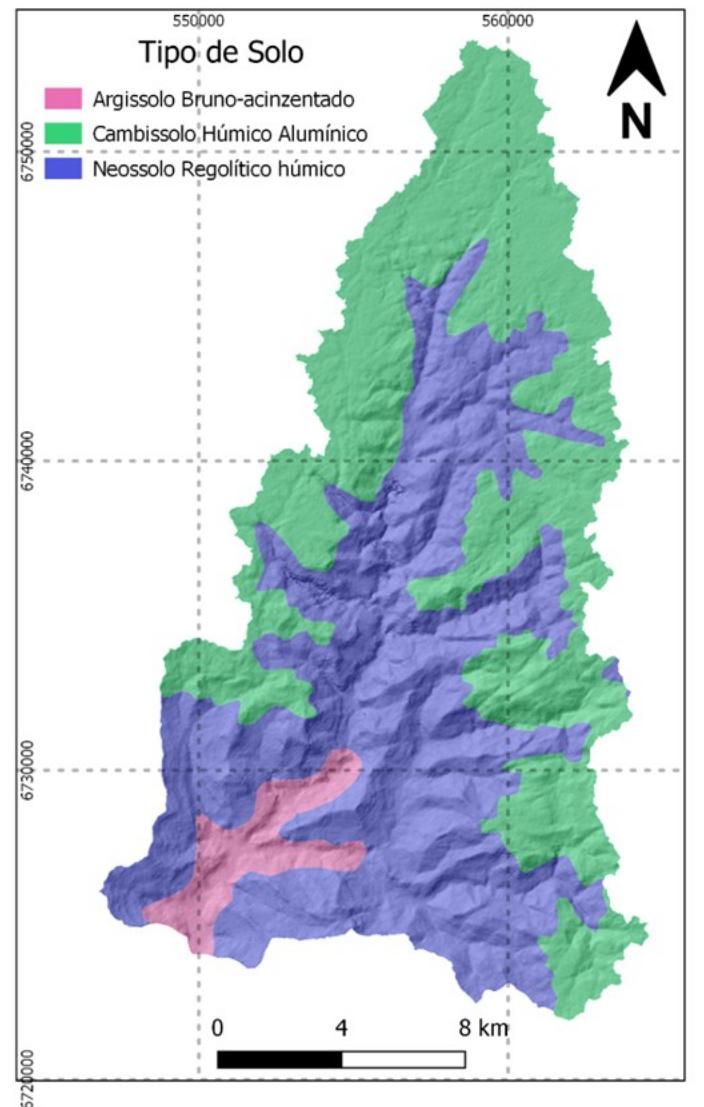


Figura 13 - Tipos de solo na bacia.

Fonte: Schwarz (2019).

Os argissolos têm como característica marcante um aumento do teor de argila dos horizontes mais superficiais para os mais profundos (EMBRAPA, 2018). A profundidade é variável, mas de modo geral são solos profundos a muito profundos (KAMPF & STRECK, 2010). Na bacia do Mascarada, estes solos estão associados a regiões de menor altitude, próximas ao exutório da bacia. A cor bruno-acinzentada indica drenagem moderada ou imperfeita (KAMPF & STRECK, 2010).

Os cambissolos são solos pouco desenvolvidos, rasos à profundos. As características deste tipo de solo são variadas, devido à heterogeneidade do material de origem, das formas de relevo e das condições climáticas (EMBRAPA, 2018). A nomenclatura húmica indica que

há uma camada superficial rica em matéria orgânica. Segundo Kampf e Streck (2010), essa é uma característica de ambientes com elevada pluviosidade. Na área de estudo estes solos ocorrem em regiões de planalto, com elevada altitude.

Os neossolos são solos bastante jovens, como o nome já sugere, com baixo grau de desenvolvimento pedogenético. São constituídos por material mineral ou orgânico pouco espesso sem alterações expressivas em relação ao material originário (EMBRAPA, 2018). A subordem regolítica, indica que o contato lítico ocorre em profundidade maior do que 50 cm, sendo o horizonte superficial assentado sobre a rocha alterada (KAMPF & STRECK, 2010). Na bacia hidrográfica do rio Mascarada, estes solos estão associados à região de escarpa da Serra Geral, com maior declividade e maior tendência a processos erosivos.

A litologia da área de estudo é bastante diversa. Segundo Schwarz (2019), as regiões da bacia com menor altitude contam com arenitos característicos da formação Botucatu. O autor também descreve a presença da formação Serra Geral na bacia e o contato entre as fácies Gramado e Caxias, resultando em patamares cujas escarpas apresentam elevada declividade. A Figura 14 representa a geodiversidade da bacia.

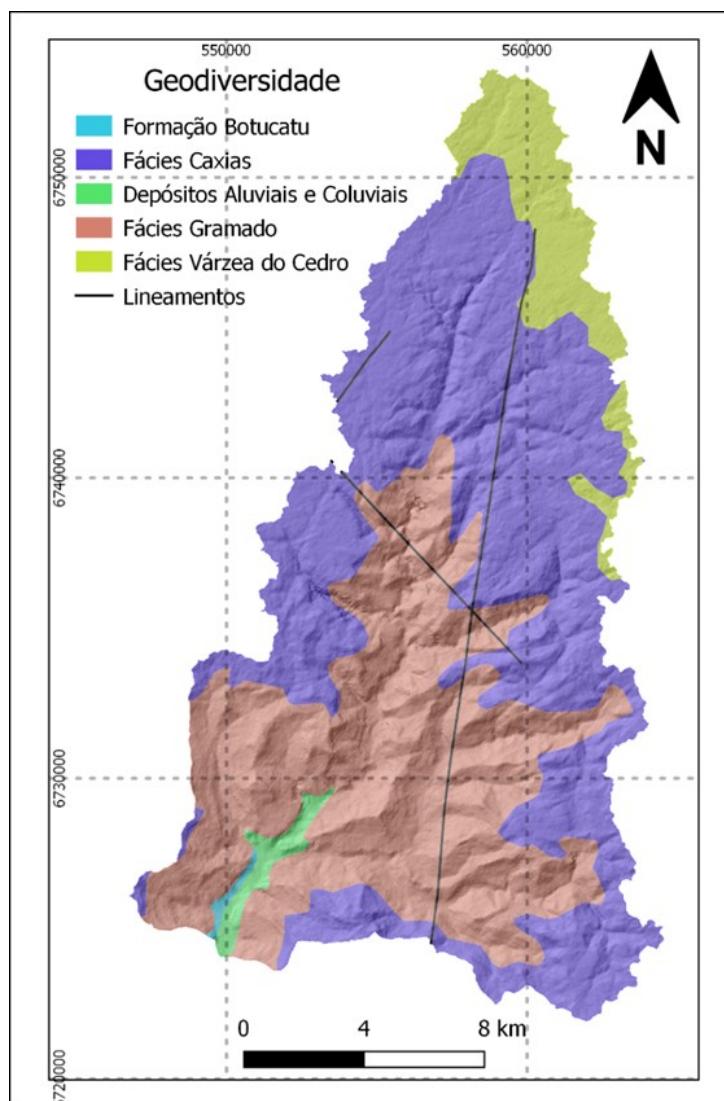


Figura 14 - Geodiversidade na bacia.

Fonte: Schwarz (2019).

Assim sendo, as unidades geotécnicas definidas para a bacia do Mascarada são apresentadas na Figura 15. Os pontos para coleta de dados foram escolhidos por meio da divisão das UG, sendo demarcado um ponto em cada unidade, totalizando 7.

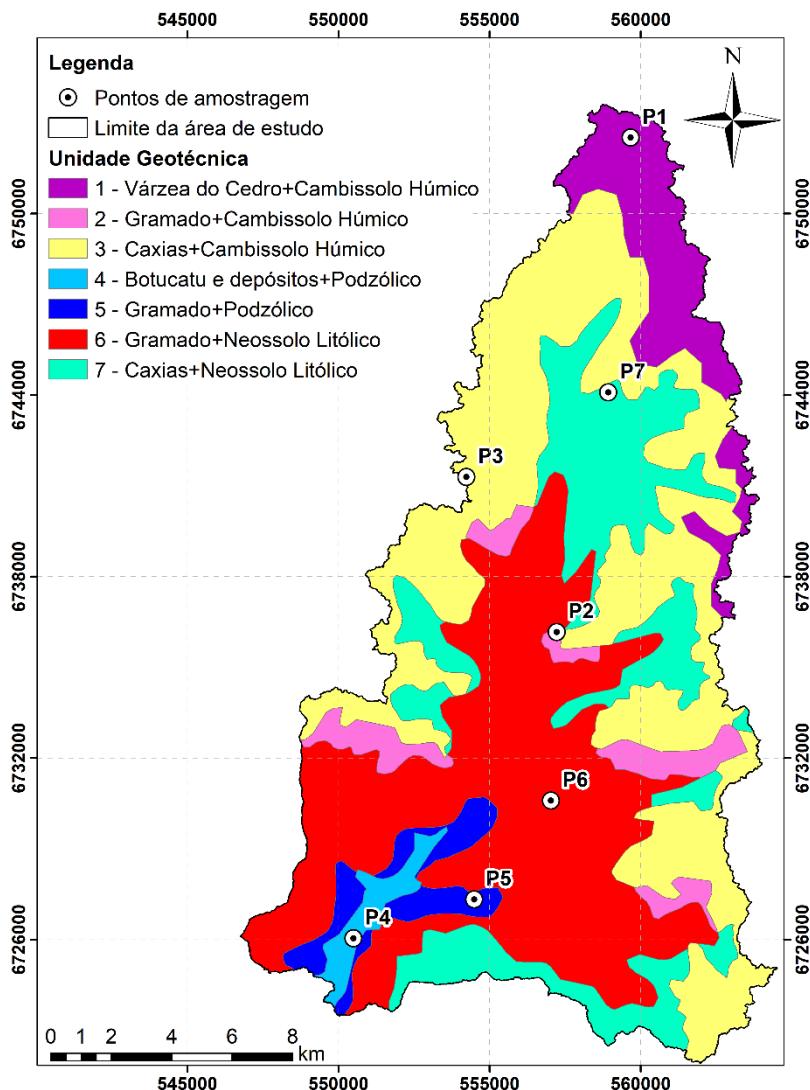


Figura 15 - Unidades Geotécnicas e pontos de amostragem.

Porém, em campo alguns pontos foram descartados devido à dificuldade de acesso ou impossibilidade de realização do ensaio BHST. Por fim foram realizadas coletas em somente quatro pontos, P1, P2, P3 e P7. Para as demais UG foram utilizados os valores médios das coletas. Os valores utilizados para cada um dos parâmetros são apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 - Valores dos parâmetros distribuídos nas unidades geotécnicas.

UG	Ângulo de atrito interno do solo (graus)	Coesão do solo (kPa)	Profundidade do solo (m)
1	34,99	3,00	0,98
2	21,30	2,60	0,53
3	33,02	0,00	1,80
4	32,67	1,87	0,98
5	32,67	1,87	0,98
6	32,67	1,87	0,98

UG	Ângulo de atrito interno do solo (graus)	Coesão do solo (kPa)	Profundidade do solo (m)
7	41,35	1,87	0,60

Além dos valores coletados em campo, foram utilizados para as análises valores da literatura estimados para a mesma região ou para o mesmo tipo de solo, considerando o solo com maior ocorrência de cicatrizes, o neossolo litólico. Os valores constantes utilizados são apresentados no Quadro 4.

Quadro 4 - Valores constantes utilizados para os parâmetros.

Parâmetro	Valor	Fonte
Ângulo de atrito interno do solo (graus)	12,68	Schwarz & Michel, 2017
	38,00	Cardozo <i>et al.</i> , 2021
Coesão do solo (kPa)	4,67	Schwarz & Michel, 2017
Profundidade do solo (m)	0,50	Embrapa, 2018
	1,05	Schwarz & Michel, 2017

O valor de massa específica do solo foi considerado constante para toda a bacia. Foram utilizados os valores de 1.500 kg/m³ (MICHELON, 2005) e 1.800 kg/m³ (CARDOZO *et al.*, 2021) e 1.750 kg/m³, sendo este último um valor médio padrão. Os valores de coesão das raízes e sobrecarga da vegetação não foram utilizados na calibração, somente para análise de funcionamento da ferramenta.

As cicatrizes utilizadas para a calibração do modelo correspondem ao evento ocorrido em 5 de janeiro de 2017. A delimitação das cicatrizes tem como referência o mapeamento prévio realizado por Cardozo *et al.* (2021).

4.3. SHALSTAB

A ferramenta de análise de estabilidade de encostas aqui desenvolvida tem como base o modelo SHALSTAB de Dietrich e Montgomery (1998). Este modelo tem como resultado final o mapa de estabilidade de encostas a movimentos translacionais. Para isto, é calculado o valor de q/T requerido para que o terreno se torne instável.

O resultado do SHALSTAB original, bem como sua versão adaptada, é dado em função de classes de estabilidade determinadas em função de intervalos em relação a quantidade de chuva precipitada necessária para ocorrência de escorregamento. Além disso, existem duas classes extremas (incondicionalmente instável e incondicionalmente estável) que não dependem das condições hidrológicas para serem estabelecidas. Desta maneira, é

necessário determinar um valor para o parâmetro q/T para representar o limiar de estabilidade da bacia.

As classes de estabilidade representam uma probabilidade de ocorrência de escorregamento, com o aumento da probabilidade de falha em função do decréscimo do valor de q/T (MICHEL, 2013). Com a aplicação de um único valor de q/T para o limiar de estabilidade é possível reduzir a classificação para quatro categorias distintas: incondicionalmente instável; instável; estável; e incondicionalmente estável.

4.4. Criação do modelo de estabilidade de encostas

A elaboração da ferramenta de estabilidade de encostas foi feita com o terminal Python do QGIS 3.16.7. Para a criação do script utilizou-se a versão do Python 3.7.0, gerando um arquivo com a extensão .py.

Os arquivos de entrada da ferramenta são no formato matricial (*raster*). No código são escritas equações com a utilização de diversos operadores matemáticos para a geração do resultado final. Além disso, foram utilizadas bibliotecas do QGIS para auxiliar na manipulação dos dados.

4.4.1. Bibliotecas de Python utilizadas

Para o manejo dos dados *raster* no código foram utilizadas duas bibliotecas do Python - QGIS são elas: GDAL e NumPy. Para acessar os recursos destes módulos, foi necessário carregá-los usando o *import*, respeitando a sintaxe do código.

A biblioteca GDAL foi utilizada para leitura e manipulação dos arquivos *rasters*. Já o NumPy foi aplicado no cálculo de funções trigonométricas e resolução de condicionais.

Como os parâmetros do modelo são inseridos como arquivos no formato *raster* é necessário fazer a leitura dos mesmos como *arrays*, para otimizar o processamento. Os *arrays* são vetores unidimensionais ou bidimensionais (matrizes) e seus elementos podem ser manipulados através de índices. A utilização de *arrays* na programação fornece uma sintaxe poderosa, compacta e expressiva para acessar, manipular e operar dados em vetores e matrizes (HARRIS *et al.*, 2020). Por ser eficiente e facilitar a computação de grandes volumes de dados numéricos, esse tipo de estrutura é muito utilizado em programação.

A biblioteca GDAL, de abstração de dados geoespaciais, serve para a manipulação de dados *raster* (GDAL/OGR, 2021). Algumas das funções dessa extensão são abrir os arquivos e converter esse tipo de dado em diferentes formatos. Com o GDAL, é possível ler e escrever, em Python, diversos formatos de arquivos *raster*, entre eles TIFF e GeoTIFF.

O NumPy é uma poderosa biblioteca Python, usada principalmente para realizar cálculos em *arrays* multidimensionais por suportar o processamento de grandes arranjos e matrizes (NUMPY, 2021). A extensão fornece diversas rotinas para operações rápidas em matrizes, incluindo matemática, lógica, manipulação de forma, classificação, seleção, entre outras. Com isso, o processamento de *arrays* se torna menos dispendioso e, consequentemente, mais eficiente.

Outras bibliotecas nativas do QGIS foram utilizadas para a criação da interface e auxiliam na configuração da mesma, sendo: QSettings, QTranslator, QCoreApplication, QIcon, QAction, QDialog, QgsProject e Qgs.

4.4.2. Código

O código do *script* em Python é uma combinação de manipulações computacionais de arquivos e equações matemáticas. As entradas do modelo são: ângulo de atrito interno do solo (ϕ) [graus], área de contribuição específica ou área de contribuição dividida pelo comprimento de célula (ab) [m], coesão das raízes (c_r) [Pa], coesão do solo (c_s) [Pa], declividade do terreno (θ) [graus], massa específica do solo (ρ_s) [kg/m^3], profundidade do solo (z) [m] e sobrecarga da vegetação (S_w) [Pa]. Todos em formato *raster*, com valores discretizados ou constantes. O resultado final é o mapa de suscetibilidade a escorregamentos translacionais.

As equações utilizadas são descritas da equação (15) a equação (18).

Para determinação da parcela incondicionalmente estável:

$$is = \left\{ \left\{ 1 - \left[\frac{1}{\left(\frac{\rho_s}{1000} \right) + \left(\frac{S_w}{1000 \cdot 9,81 \cdot z \cdot \cos\theta} \right)} \right] \right\} \cdot \tan\phi \right\} \\ + \left\{ \frac{c_s + c_r}{\rho_s \cdot 9,81 \cdot z \cdot \cos^2\theta \cdot \left[1 + \left(\frac{S_w}{\rho_s \cdot 9,81 \cdot z \cdot \cos\theta} \right) \right]} \right\} \quad (15)$$

Para determinação da parcela incondicionalmente instável:

$$iu = \tan\phi + \left\{ \frac{c_s + c_r}{\rho_s \cdot 9,81 \cdot z \cdot \cos^2\theta \cdot \left[1 + \left(\frac{S_w}{\rho_s \cdot 9,81 \cdot z \cdot \cos\theta} \right) \right]} \right\} \quad (16)$$

Para determinação da parcela em função do parâmetro livre da relação entre a quantidade de chuva e a transmissividade do solo:

$$\begin{aligned}
 qt = & \left(\frac{\sin s}{ab} \right) \cdot \left\{ \left(\frac{c_s + c_r}{1000.9,81. \cos^2 \theta. \tan \phi. z} \right) \right. \\
 & \left. + \left\{ \left[1 - \left(\frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \right] \cdot \left[\left(\frac{S_w}{9,81. z. \cos \theta. 1000} \right) + \left(\frac{\rho_s}{1000} \right) \right] \right\} \right\}
 \end{aligned} \tag{17}$$

onde:

ab = área de contribuição específica (m).

Por fim, o mapa final é dado por dois condicionais aninhados que envolvem os resultados das equações anteriores.

$$st = \text{con}(\tan \theta < is, 10, \text{con}(\tan \theta > iu, -10, \log_{10}(qt))) \tag{18}$$

O código completo em linguagem Python é apresentado no Apêndice A.

4.4.3. Limitações do modelo

A ferramenta apresenta algumas limitações em seu processamento e sua utilização deve ser feita com cautela para gerar corretamente os resultados. Quando os arquivos de entrada são muito grandes, como os utilizados nesse estudo, requer uma grande capacidade computacional, não sendo possível rodar em alguns computadores. Para contornar esse entrave pode-se trabalhar com resoluções menores, incorrendo em resultados menos precisos espacialmente.

As entradas do modelo precisam estar alinhadas com a mesma resolução, tamanho (número de linhas e colunas) e projeção. Além disso, em um *array* todos os elementos devem ser de um mesmo tipo numérico, como *int* ou *float*.

4.4.1. Criação da interface

Com o script pronto foi necessário criar a interface para o usuário, para facilitar a utilização do modelo. Para tanto se utilizou o *Qt Creator*, estrutura de desenvolvimento de *software* usada para desenvolver aplicativos que rodam em Windows, Mac, Linux, bem como em vários sistemas operacionais móveis.

Buscou-se criar uma interface simples e intuitiva para melhor utilização do usuário. A interface final é apresentada na Figura 16.

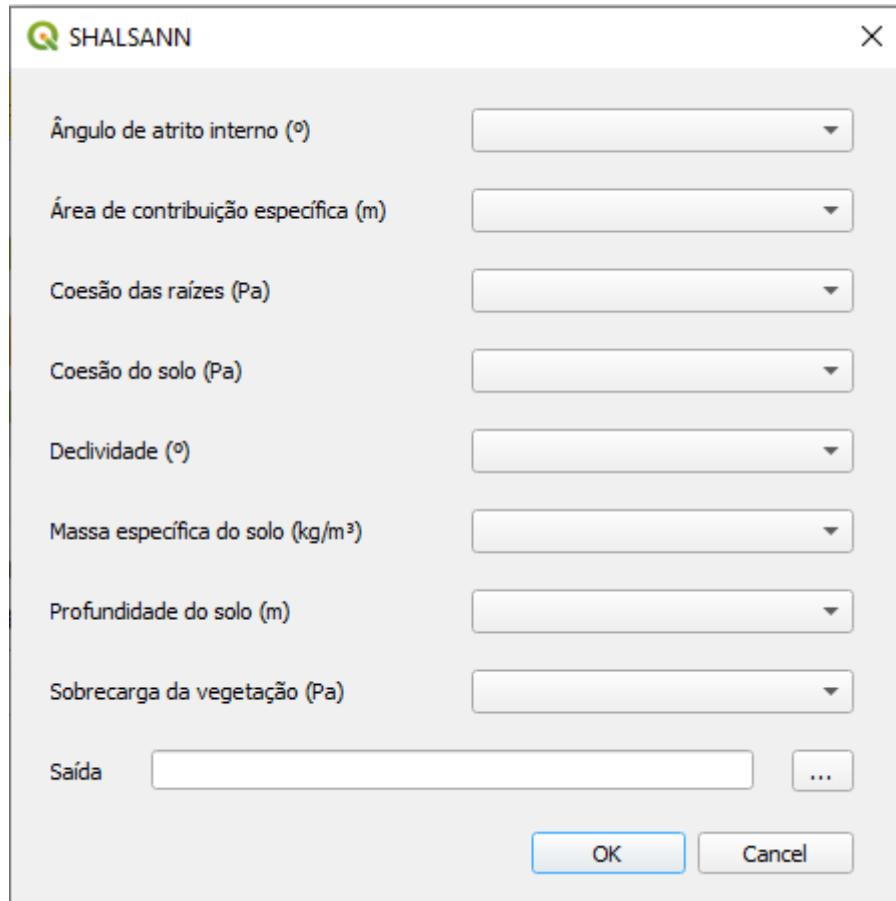


Figura 16 - Interface do modelo de estabilidade de encostas.

4.4.2. Escolha do nome

Para a escolha do nome da ferramenta criada foi montado um mapa de ideias com algumas palavras chave. A Figura 17 apresenta o mapa gerado.

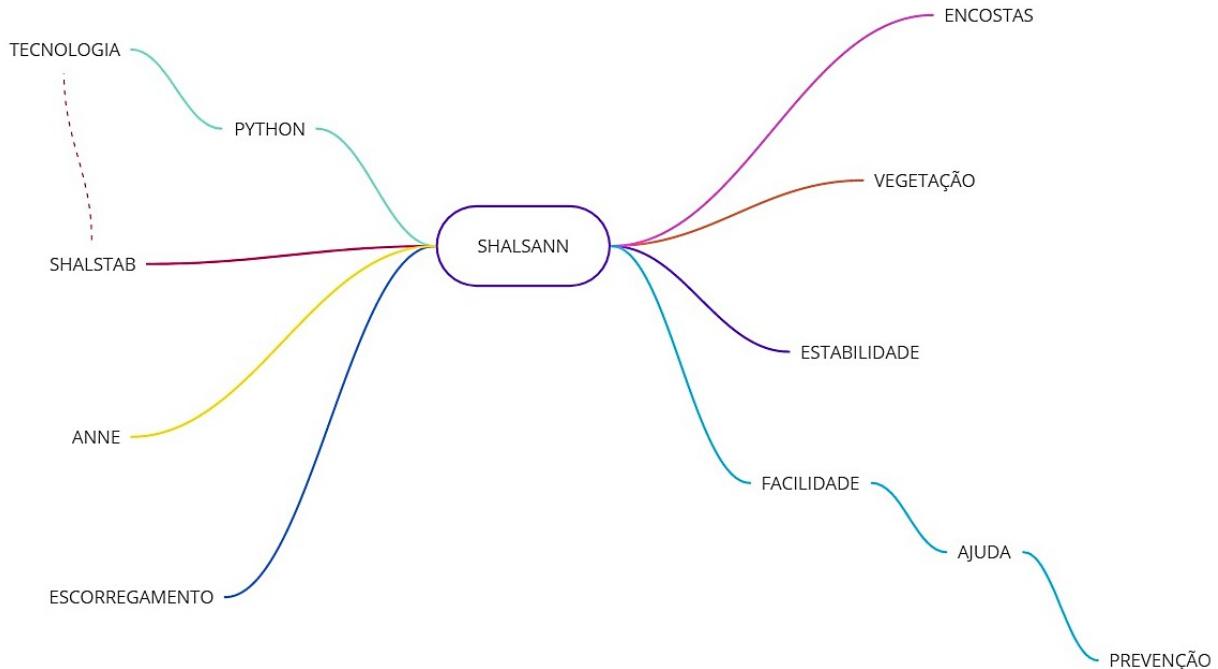


Figura 17 - Mapa de ideias para o nome do modelo.

Optou-se por utilizar o nome do modelo original, SHALSTAB, que significa modelo de estabilidade a escorregamentos rasos e uni-lo com o nome da autora da ferramenta. Assim, o resultado final foi SHALSANN.

O nome remete ao chamado de um super herói dos quadrinhos. Quando pronunciada a palavra, um jovem comum se transforma em um super herói que utiliza seus poderes para combater o perigo e salvar pessoas. Essa também é a motivação do modelo SHALSANN, transformar dados de fácil aquisição em um mapa de estabilidade que pode auxiliar na redução de desastres.

4.5. Cenários propostos

Para a verificação do funcionamento do modelo foram realizadas diferentes análises. O desempenho da ferramenta foi avaliado por meio da realização de simulações e comparação dessas com o inventário de cicatrizes.

Para a definição do melhor cenário para representação do evento de 2017, ocorrido na área de estudo, foram realizadas diversas simulações combinando os diferentes valores para os parâmetros de entrada, tanto do monitoramento em campo quanto da literatura. Foram utilizados dados constantes (literatura) e distribuídos (dados de campo). As combinações foram feitas de forma a preservar os conjuntos de dados originais misturando os dados faltantes, resultando em 29 simulações. Os dados de campo são os valores das coletas

realizadas nos pontos e distribuídos pelas UG, conforme descrito anteriormente. Os valores adotados em cada simulação são apresentados no Quadro 5.

Quadro 5 - Valores utilizados nas simulações.

Simulação	Ângulo de atrito interno do solo (graus)	Coesão do solo (kPa)	Massa específica do solo (kg/m³)	Profundidade (m)
1	38	Dado de campo	1.800	0,50
2	38	Dado de campo	1.800	Dado de campo
3	38	Dado de campo	1.800	1,05
4	38	4,67	1.800	Dado de campo
5	38	4,67	1.500	0,50
6	38	4,67	1.750	0,50
7	Dado de campo	Dado de campo	1.800	Dado de campo
8	Dado de campo	Dado de campo	1.750	Dado de campo
9	Dado de campo	Dado de campo	1.500	Dado de campo
10	Dado de campo	4,67	1.500	0,50
11	Dado de campo	4,67	1.750	0,50
12	Dado de campo	4,67	1.800	0,50
13	12,68	4,67	1.800	1,05
14	12,68	4,67	1.750	1,05
15	12,68	4,67	1.500	1,05
16	12,68	4,67	1.800	0,50
17	12,68	4,67	1.750	0,50
18	12,68	4,67	1.500	0,50
19	38	4,67	1.800	1,05
20	38	4,67	1.800	0,50
21	38	Dado de campo	1.500	0,50
22	Dado de campo	Dado de campo	1.500	0,50
23	12,68	Dado de campo	1.500	0,50
24	38	Dado de campo	1.750	0,50
25	38	Dado de campo	1.800	0,50
26	Dado de campo	Dado de campo	1.800	0,50
27	Dado de campo	Dado de campo	1.750	0,50

Simulação	Ângulo de atrito interno do solo (graus)	Coesão do solo (kPa)	Massa específica do solo (kg/m ³)	Profundidade (m)
		campo		
28	12,68	Dado de campo	1.750	0,50
29	12,68	Dado de campo	1.800	0,50

Além das simulações descritas no quadro acima, foram testados cenários com variação de um único parâmetro, a coesão do solo. Michel *et al.* (2021), apontam a coesão do solo como o parâmetro de entrada do modelo com maior influência para solos rasos. Os valores adotados para coesão do solo são apresentados no Quadro 6, para os demais parâmetros foram utilizados valores de monitoramento em campo, distribuídos pelas UG, e ρ_s igual a 1.800 kg/m³.

Quadro 6 - Valores utilizados nas simulações com variação da coesão do solo.

Simulação	Coesão do solo (kPa)	Referência
30	3,00	Dado de campo para a UG 1
31	2,60	Dado de campo para a UG 2
32	0,00	Dado de campo para a UG 3
33	1,87	Dado de campo médio
34	4,67	Schwarz & Michel, 2017
35	2,38	Michel <i>et al.</i> , 2021

Por serem de difícil aquisição e não haverem medições para a área de estudo, os parâmetros referentes a vegetação foram considerados nulos em todas as simulações propostas. Foram utilizados os dados de Michel *et al.* (2021) para a sobrecarga da vegetação e coesão das raízes, somente para a comprovação de que estes parâmetros são considerados no modelo. Para tanto, realizou-se novamente a simulação 7 com coesão das raízes igual a 4,0 kPa e sobrecarga da vegetação igual a 2,6 kPa.

4.6. Análise de desempenho

Os mapas de estabilidade gerados a partir de cada conjunto de parâmetros foram confrontados com o inventário de cicatrizes. A análise foi realizada por meio de dois índices propostos por Sorbino *et al.* (2010): índice de acerto (*IA*) e índice de erro (*IE*). Segundo Michel (2015), o *IA* representa o percentual da área definida como instável pelo modelo que coincide com a área das cicatrizes dos escorregamentos. O mesmo autor define o *IE* como as áreas ditas como instáveis pelo modelo, mas que não foram afetadas por escorregamentos na realidade.

O método utilizado é descrito pelas equações (19) e (20) e exemplificado na Figura 18.

$$IA = \frac{\sum \left(\frac{A_{\text{dentro}}}{A_{\text{instável}}} \right)}{n} \quad (19)$$

$$IE = \frac{\sum \left(\frac{A_{\text{fora}}}{A_{\text{estável}}} \right)}{n} \quad (20)$$

onde:

IA = índice de acertos;

IE = índice de erros;

A_{dentro} = área considerada instável pelo modelo que está dentro de cicatrizes de escorregamentos;

A_{fora} = área considerada instável pelo modelo fora de cicatrizes de escorregamento;

$A_{\text{instável}}$ = área da cicatriz de escorregamento;

$A_{\text{estável}}$ = área da encosta que não foi afetada pelo escorregamento;

n = número de cicatrizes de escorregamentos ou encostas analisadas.

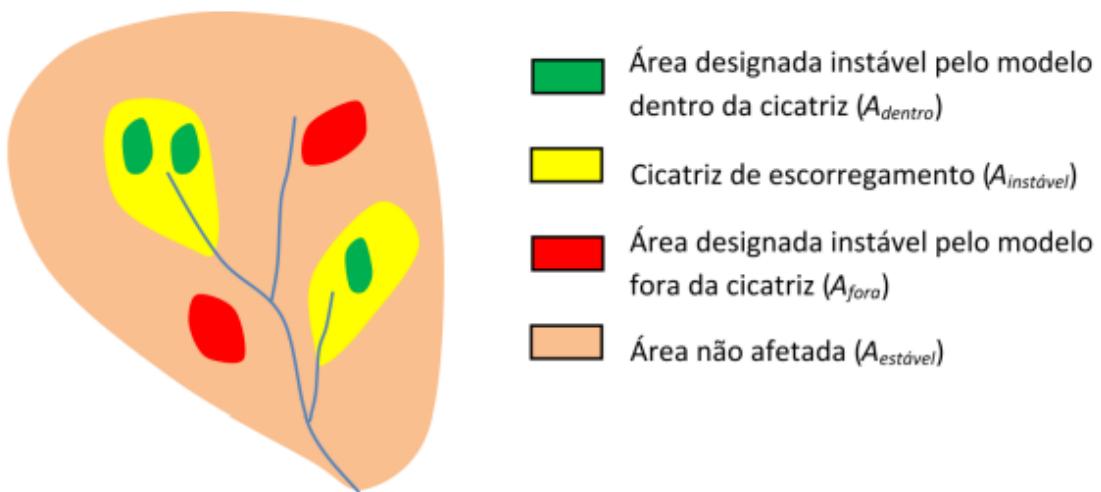


Figura 18 - Esquema ilustrativo para definição dos parâmetros envolvidos no cálculo do IA e IE.

Fonte: Michel (2015) adaptado de Sorbino *et al.* (2010).

Sorblino *et al.* (2010) ainda sugerem que, para a comparação de diferentes cenários, seja calculada a relação IA/IE . Quanto maior for o resultado da relação IA/IE , melhor o desempenho do modelo.

Associado aos índices de acerto e erro, para avaliar a performance das simulações, empregou-se a análise através da curva *ROC*. As curvas *ROC* são gráficos bidimensionais nos quais a taxa de verdadeiros positivos (*IA*) é traçada no eixo das ordenadas e a taxa de falsos positivos (*IE*) é traçada no eixo das abscissas (FAWCETT, 2006).

O passo a passo para a construção das curvas *ROC* é descrito nos itens i. a iv.:

- i. Análise de área instável e estável variando o limiar $\log(q/T)$, atividade realizada com o auxílio da ferramenta *Curva hipsométrica (Hypsometric curves)* do QGIS e com o passo de 0,1;
- ii. Cálculo do índice de acertos (eixo *y*) e do índice de erros (eixo *x*) para cada linha (sempre considerando de forma cumulativa);
- iii. Inclusão dos pontos mínimo (0, 0) e máximo (1, 1);
- iv. Construção do gráfico com a taxa de verdadeiros positivos no eixo *y* e a taxa de falsos positivos no eixo *x*.

Para auxiliar na definição do conjunto ótimo de parâmetros para a simulação, optou-se pela análise da área sob a curva *ROC* (*AUC*), uma forma de resumir a curva *ROC* em um único valor. A Figura 19 exemplifica a curva *ROC* e a *AUC*.

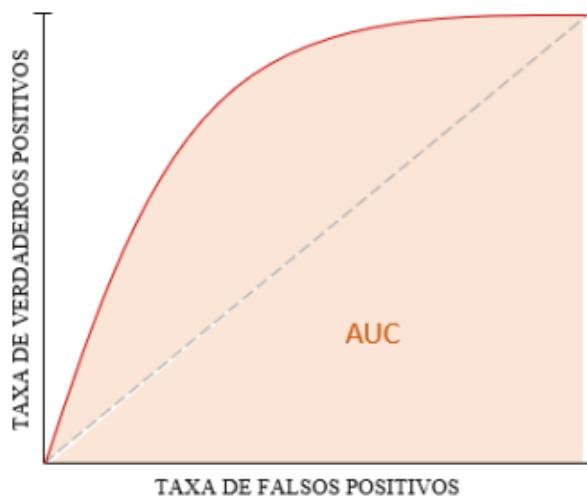


Figura 19 - Exemplo genérico de uma curva *ROC* com *AUC* destacada em rosa.

Fonte: Paul (2020).

O valor da *AUC*, a partir das taxas de acerto e erro, apresenta amplitude de variação de 0,00 a 1,00, em que a área máxima representa um cenário ideal, onde a taxa de acertos é máxima a taxa de erros, nula. Desta forma, o valor médio (0,50) indica a igualdade de acertos e erros. Quanto maior o valor de *AUC*, melhor o desempenho da simulação.

A escolha do melhor limiar foi feita por meio da definição da menor distância euclidiana entre o ponto da curva *ROC* e o ponto do gráfico que representa o resultado perfeito (0,1), como mostra a equação (21).

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (21)$$

onde:

d = distância entre os dois pontos;

x_I = valor de *IE* do limiar;

y_I = valor de *IA* do limiar;

x_2 = coordenada x do resultado perfeito, igual a 0;

y_2 = coordenada y do resultado perfeito, igual a 1.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este item se destina a apresentar os principais resultados obtidos com este trabalho. A ferramenta desenvolvida foi avaliada quanto ao seu funcionamento, quanto à possibilidade de otimização e quanto a melhor representação do evento estudado. Para as comparações, utilizaram-se as cicatrizes de escorregamento, previamente mapeadas, do evento extremo ocorrido em janeiro de 2017, na Bacia Hidrográfica do Rio Mascarada.

5.1. Funcionamento do modelo SHALSANN

A ferramenta proposta no presente trabalho conseguiu realizar as simulações de forma rápida e representando numericamente as equações matemáticas utilizadas. A partir das simulações realizadas foi possível representar as áreas de instabilidade da bacia. A relação entre índice de acertos e erros variou de 4,92 a 2,74, sempre acima de 1, o que significa que houve mais áreas classificadas corretamente do que erroneamente. A Figura 20 representa o resultado do modelo para a simulação 7, o mapa de estabilidade gerado a partir dos dados de campo, adotando ρ_s igual a 1.800 kg/m^3 e parâmetros relacionados a vegetação nulos. O detalhe das cicatrizes de escorregamentos pode ser visualizado na Figura 21.

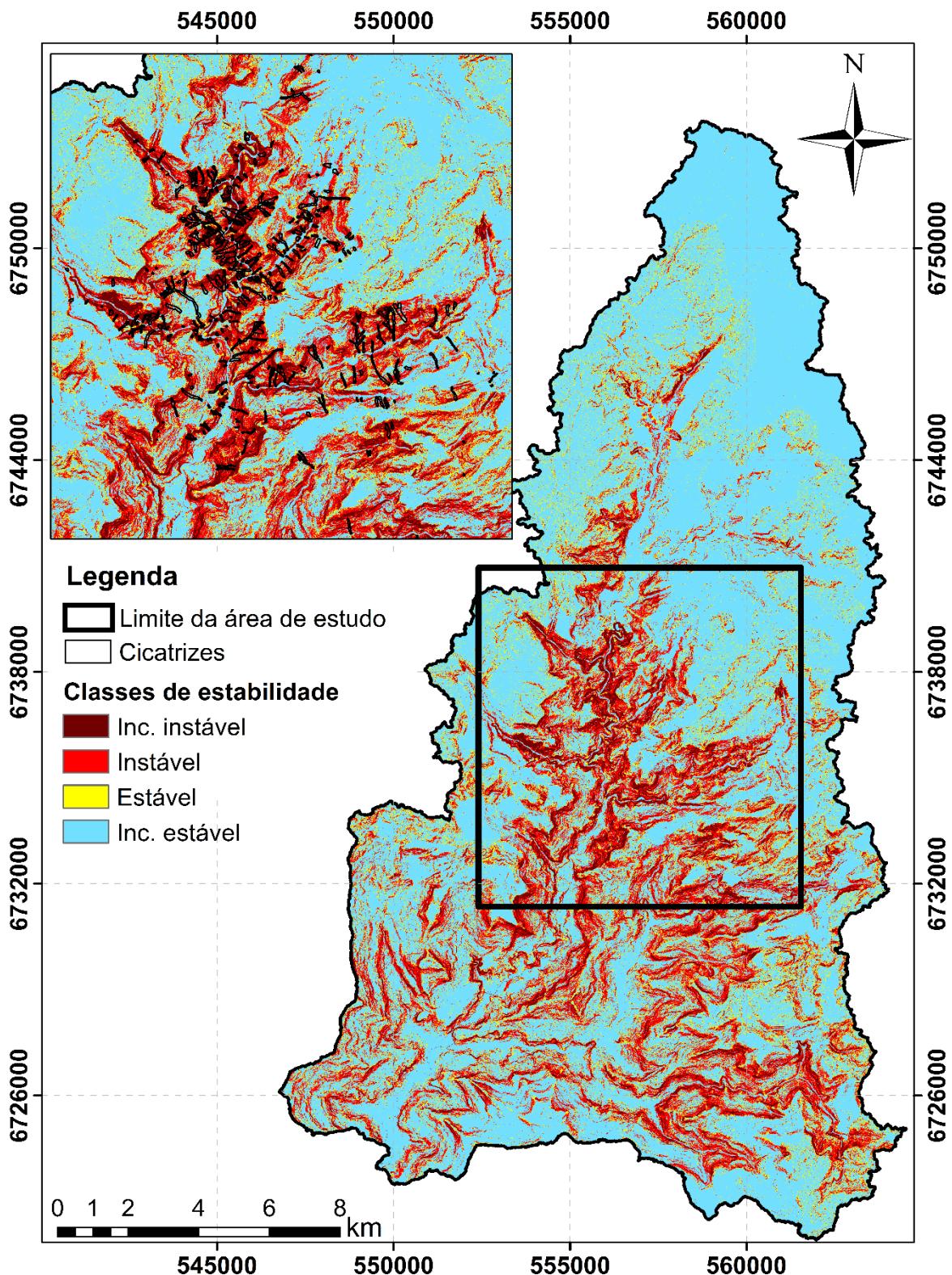


Figura 20 - Resultado do modelo: mapa de estabilidade para a simulação 7.

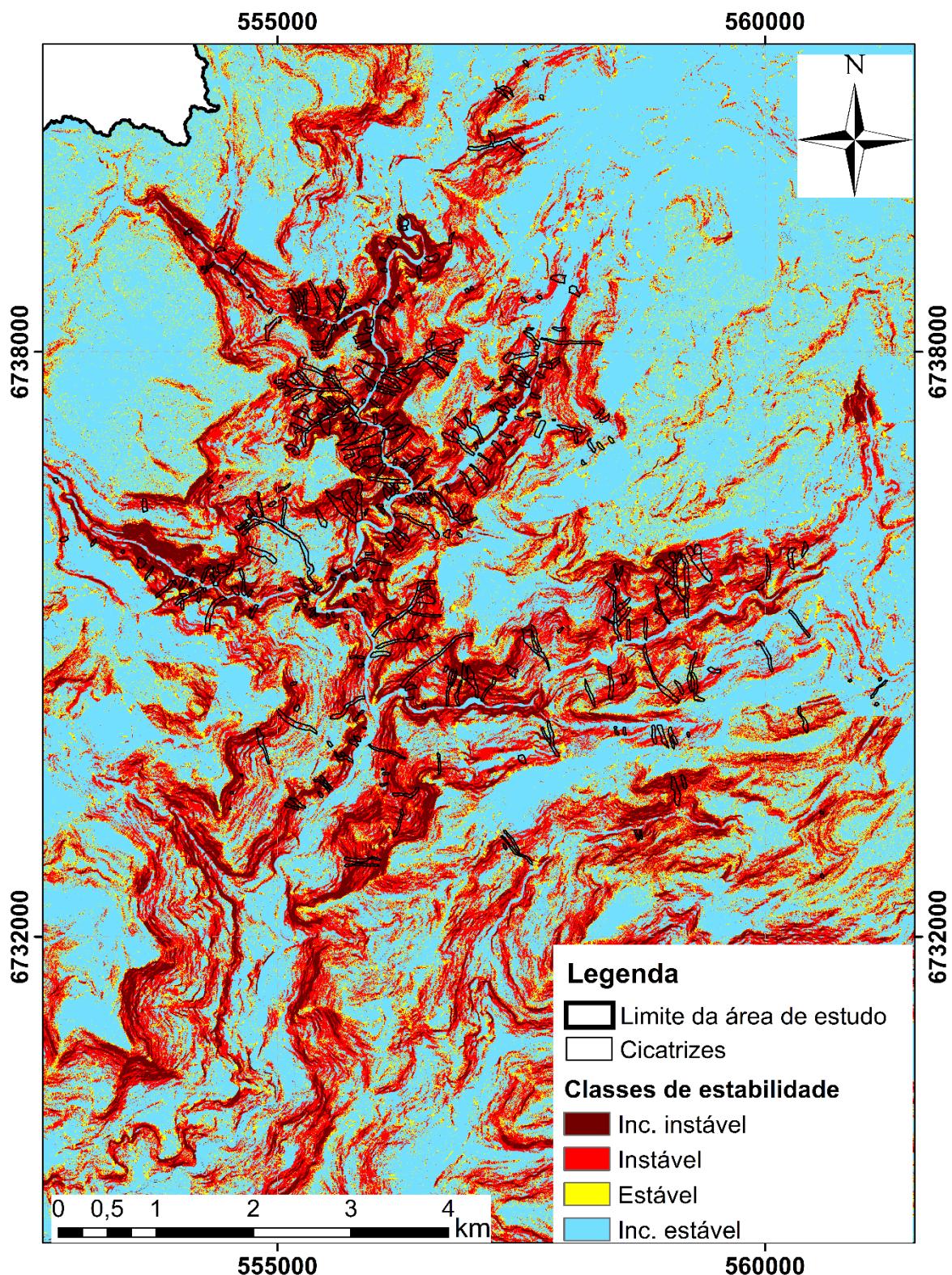


Figura 21 - Detalhe das cicatrizes no mapa de estabilidade para a simulação 7 sem influência da vegetação.

Como esperado, em todas as simulações realizadas as classes incondicionalmente instável e instável ocorreram principalmente nas regiões associadas aos patamares da

formação Serra Geral, escarpas de elevada declividade. As regiões menos declivosas da bacia, com declividade entre 0 e 13 graus, foram classificadas como incondicionalmente estáveis e estáveis em todos os cenários. As áreas de cicatrizes também foram bem representadas, com IA acima de 50% em 27 das 29 simulações propostas.

Para verificar se a ferramenta considera a influência dos parâmetros relacionados a vegetação, sobrecarga da vegetação e coesão das raízes, realizou-se a mesma simulação com valores não nulos para estes parâmetros. Para a coesão das raízes optou-se pelo valor de 4,0 kPa e para a sobrecarga da vegetação o valor de 2,6 kPa, conforme descrito anteriormente. O resultado da simulação é apresentado na Figura 22 e o detalhe das cicatrizes de escorregamento na Figura 23.

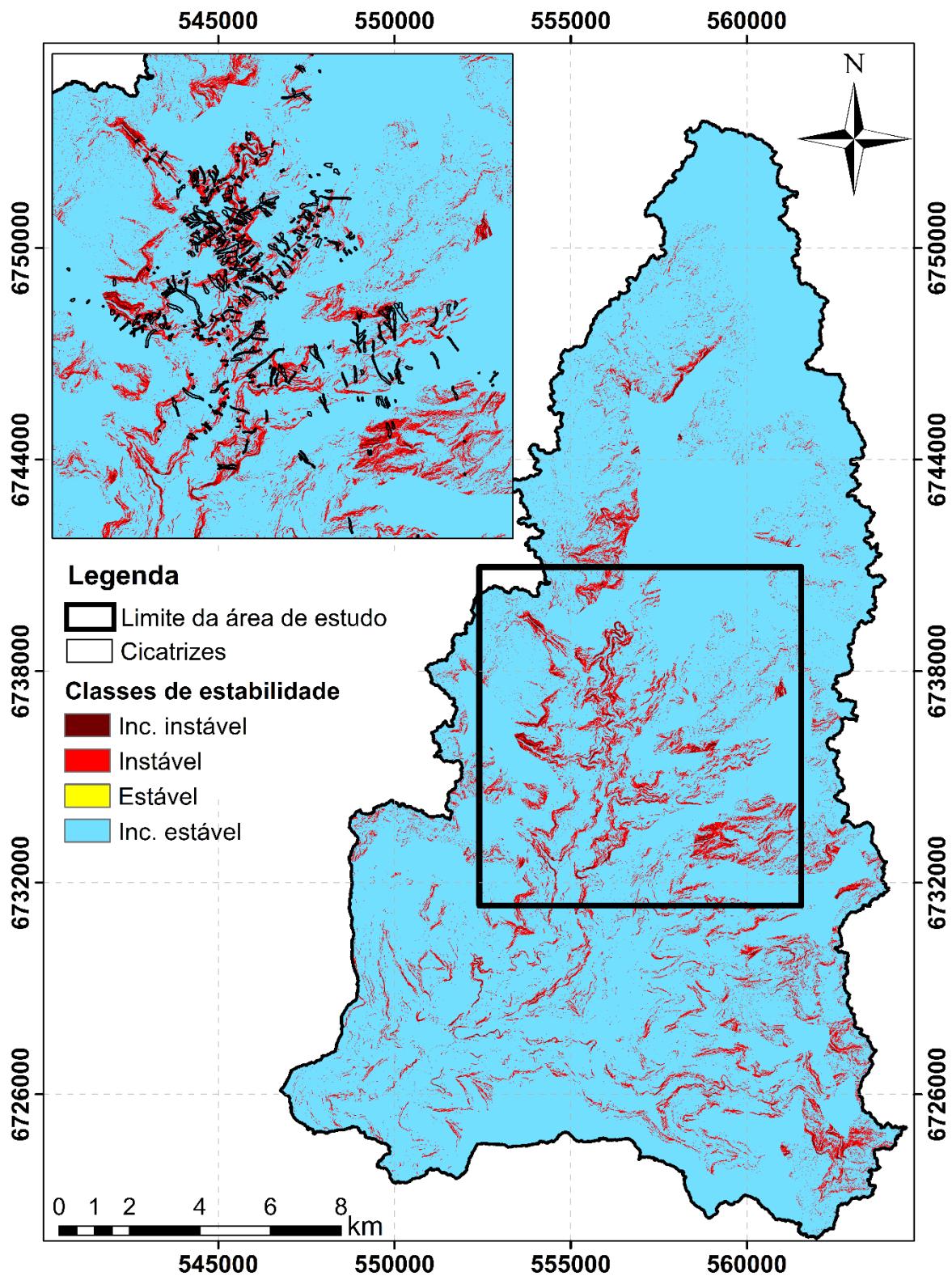


Figura 22 - Resultado do modelo: mapa de estabilidade para a simulação 7 com influência da vegetação.

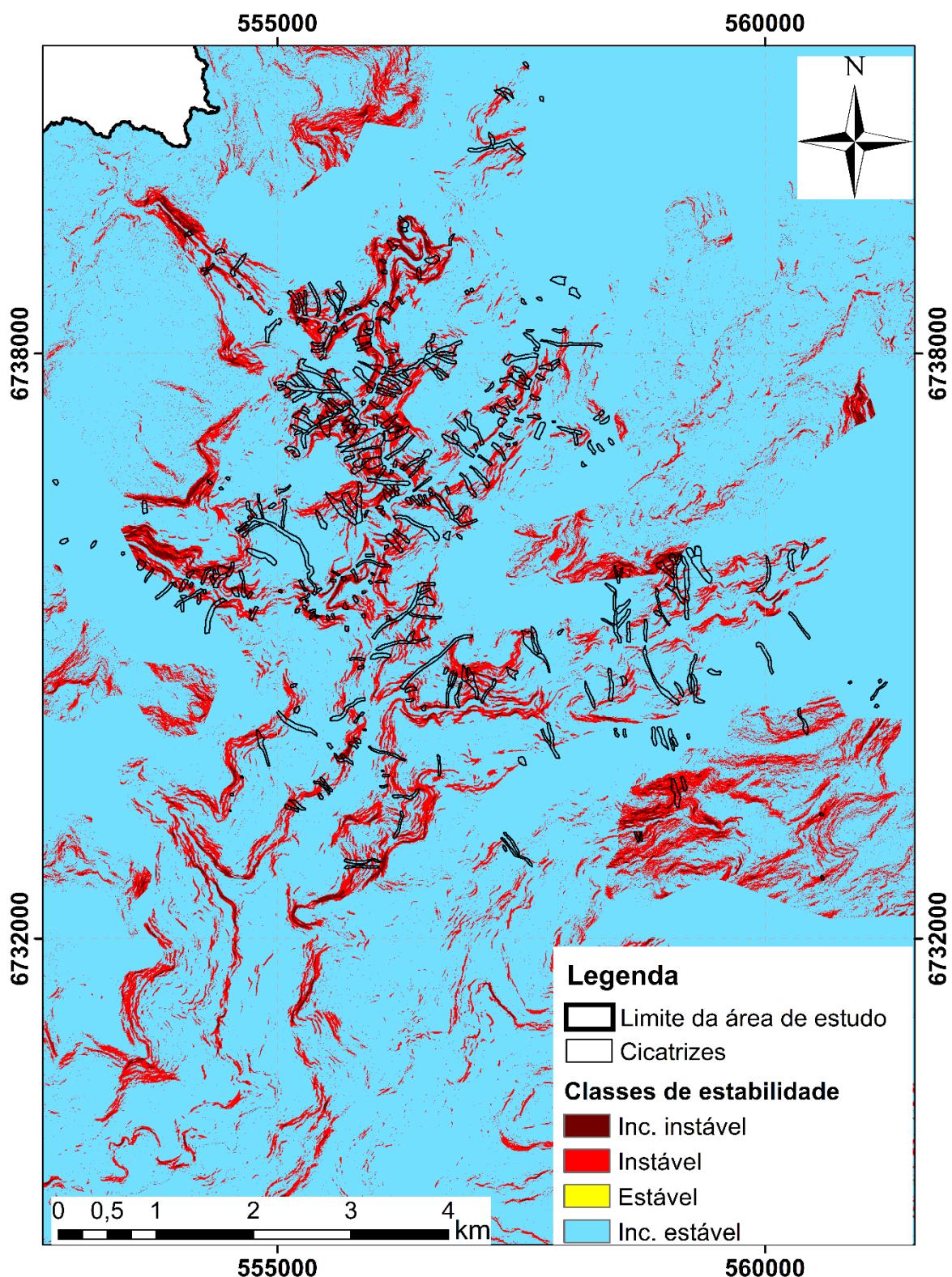


Figura 23 - Detalhe das cicatrizes no mapa de estabilidade para a simulação 7 com influência da vegetação.

Os resultados das duas simulações apresentam diferenças perceptíveis, tendo o segundo mapa, com parâmetros não nulos, mais áreas estáveis. As curvas *ROC* das duas simulações são apresentadas na Figura 24.

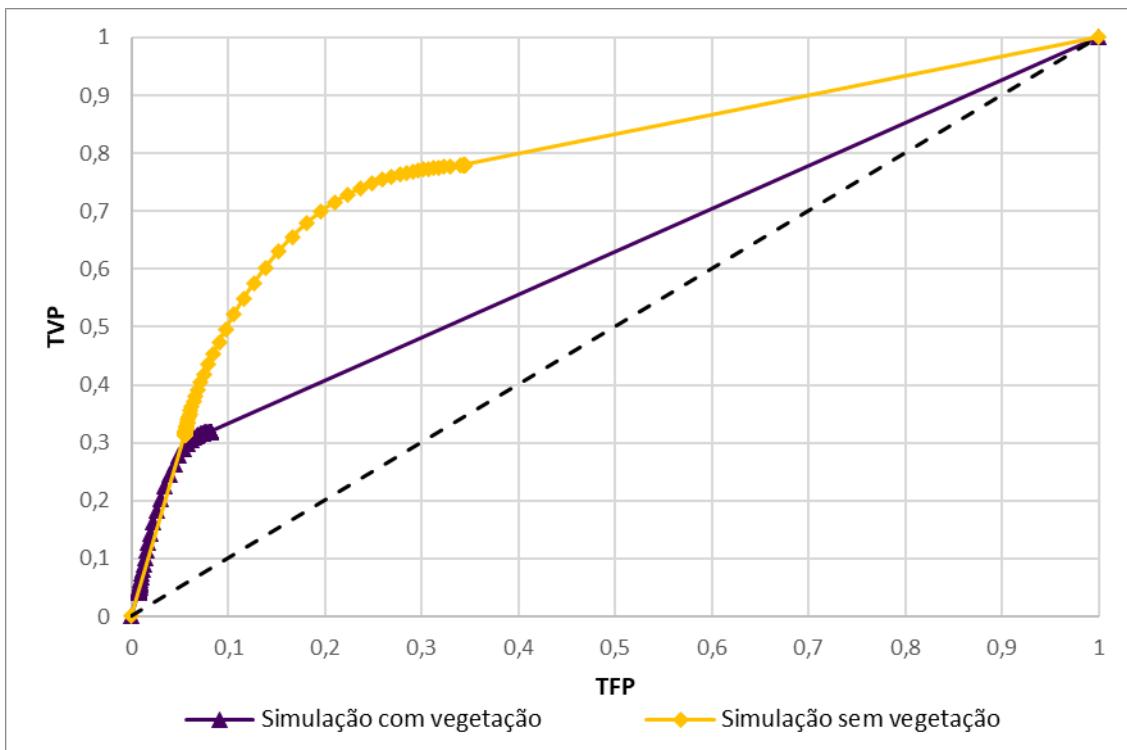


Figura 24 - Curvas *ROC* com e sem a influência da vegetação.

A curva *ROC* da simulação com parâmetros de vegetação não nulos apresenta um achamento em relação a simulação sem a vegetação. As taxas de verdadeiros positivos variam de 0,0 a 0,3, enquanto que na simulação sem a vegetação esses valores chegam próximos a 0,8. Entretanto, vale ressaltar que os dados utilizados para esta verificação não foram medidos em campo, apenas servem para verificar a influência dos parâmetros de vegetação no modelo.

Houve uma diminuição significativa do valor de *AUC*, com a inclusão dos parâmetros de sobrecarga da vegetação e coesão das raízes, de 0,78 para 0,62. Já para a relação de *IA/IE* houve um aumento, passando de 3,25 para 3,9. Porém, a simulação sem a influência da vegetação foi mais assertiva, com 75% de *IA*, enquanto a outra teve somente 32%. Portanto, é possível afirmar que a ferramenta apresenta sensibilidade aos parâmetros relacionados a vegetação.

5.2.Otimização do modelo

A possibilidade de otimização da ferramenta foi analisada através das *AUC* das curvas *ROC*, sob variação de um único parâmetro. Este teste foi realizado para verificar se a métrica escolhida é adequada para a calibração e validação do modelo. Como dito anteriormente, quanto maior a *AUC*, melhor é o resultado do modelo. O parâmetro escolhido para ser variado foi o de coesão do solo, por se tratar de um parâmetro ao qual o modelo é mais sensível.

Foram realizadas seis simulações, com valores encontrados na literatura e valores medidos na área de interesse. Para os demais parâmetros foram utilizados os dados de campo distribuídos pelas UG e ρ_s igual a 1.800 kg/m³. O gráfico da Figura 25 apresenta a variação das curvas *ROC* com a alteração do valor de entrada. As curvas são apresentadas individualmente no Apêndice B.

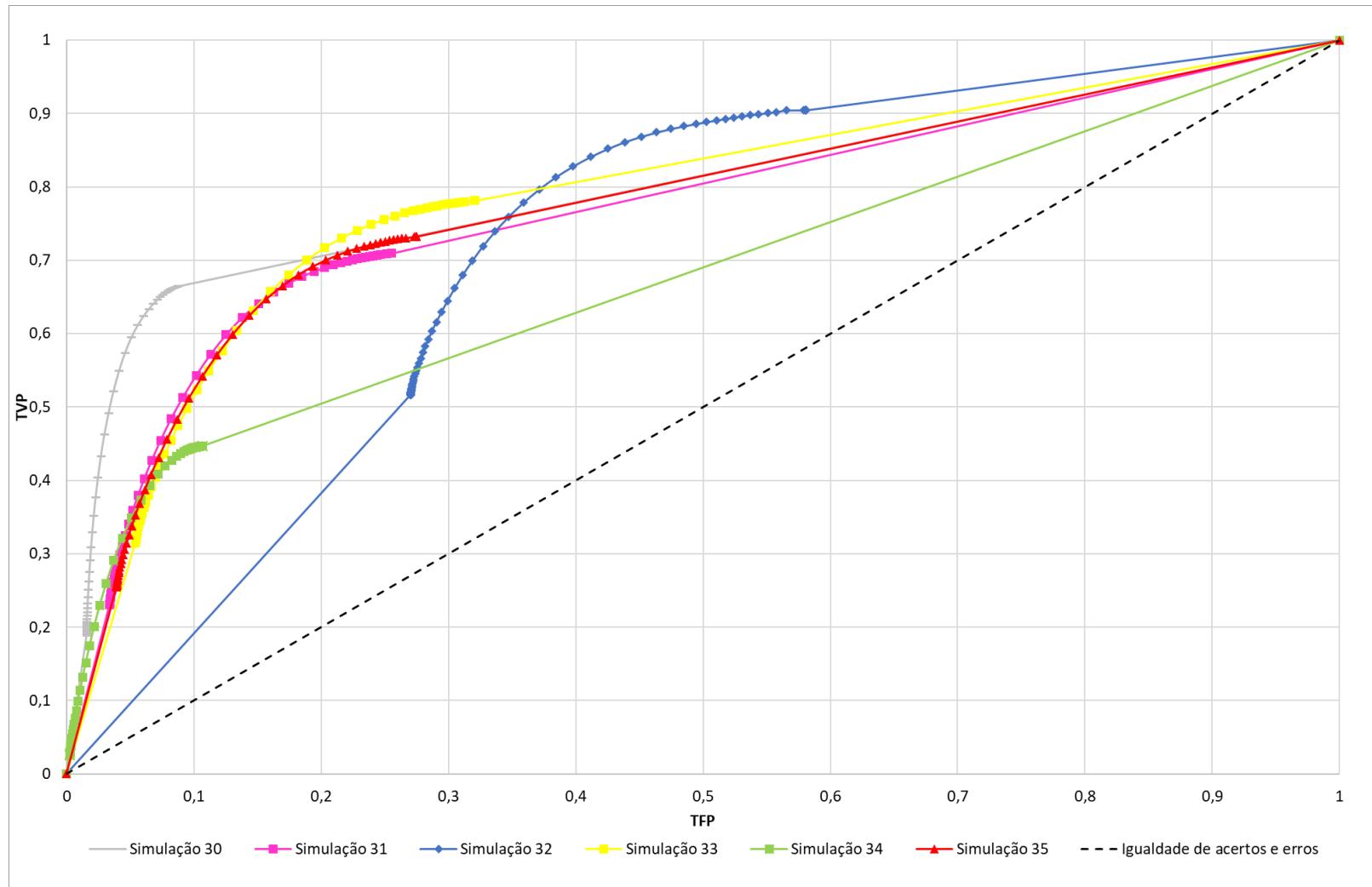


Figura 25 - Curvas ROC com a variação da coesão do solo.

Mesmo havendo bastante variação no formato das curvas, os valores de *AUC* ficaram bastante próximos, variando entre 0,68 e 0,79. O Quadro 7 apresenta os resultados de cada simulação.

Quadro 7 - *AUC* para simulações com variação do ângulo de atrito interno do solo.

Simulação	Coesão do solo (kPa)	<i>AUC</i>
30	3,00	0,79
31	2,60	0,77
32	0,00	0,72
33	1,87	0,79
34	4,67	0,68
35	2,38	0,77

Cada variação gerou um resultado diferente, aumentando ou diminuindo o valor da *AUC*. Considerando essa métrica, as simulações 30 e 33 obtiveram o melhor resultado. Os valores mínimo (simulação 32) e máximo (simulação 34) utilizados geraram os menores valores de *AUC*.

Os resultados de *IA/IE* obtidos para a menor distância euclidiana e o limiar relacionado são apresentados no Quadro 8. Os mapas gerados a partir da seleção do melhor limiar podem ser visualizados no Apêndice C.

Quadro 8 - *IA/IE* e escolha do limiar para simulações com variação da coesão do solo.

Simulação	Distância euclidiana	<i>IA/IE</i>	Limiar log (<i>q/T</i>)
30	0,35	7,58	-0,3
31	0,37	3,52	-1,7
32	0,42	2,17	-2,6
33	0,35	3,25	-1,9
34	0,56	4,18	-0,2
35	0,36	3,32	-1,7

As taxas de acertos das simulações 30 e 33 são 66% e 74%, respectivamente. Enquanto que a simulação 34 teve uma taxa de acertos de 45%. A simulação 30 também obteve o maior valor para a relação *IA/IE*, com 7,58. Esse resultado representa a melhor calibração para o modelo, com a variação do parâmetro de coesão do solo.

Assim, pode-se concluir que é possível otimizar o modelo com a realização de simulações em lote a partir de uma faixa de valores para os parâmetros de entrada, adotando a métrica de *AUC* das curvas *ROC*. Neste estudo as análises foram feitas de forma manual, mas

o desenvolvimento de uma ferramenta que automatizasse o processo poderia gerar resultados ainda melhores. Portanto, o objetivo de trabalhos futuros é a automatização dos processos de calibração e validação do modelo.

5.3. Evento de 2017 na Bacia Hidrográfica do Rio Mascarada

Para estabelecer o mapa que melhor representa o evento extremo de 2017, ocorrido na Bacia Hidrográfica do Rio Mascarada, foram realizadas diversas simulações combinando os diferentes valores para os parâmetros de entrada (simulações 1 a 29). Após implementação do modelo, algumas simulações foram descartadas por classificarem a bacia inteira como incondicionalmente estável ou incondicionalmente instável. São elas: simulações 16, 17, 18 e 20 como incondicionalmente estáveis; simulações 5, 6, 10, 11 e 12 como incondicionalmente instáveis.

Para cada simulação foi gerada uma curva *ROC* diferente (Apêndice B). A variação no formato das curvas pode ser vista na Figura 26.

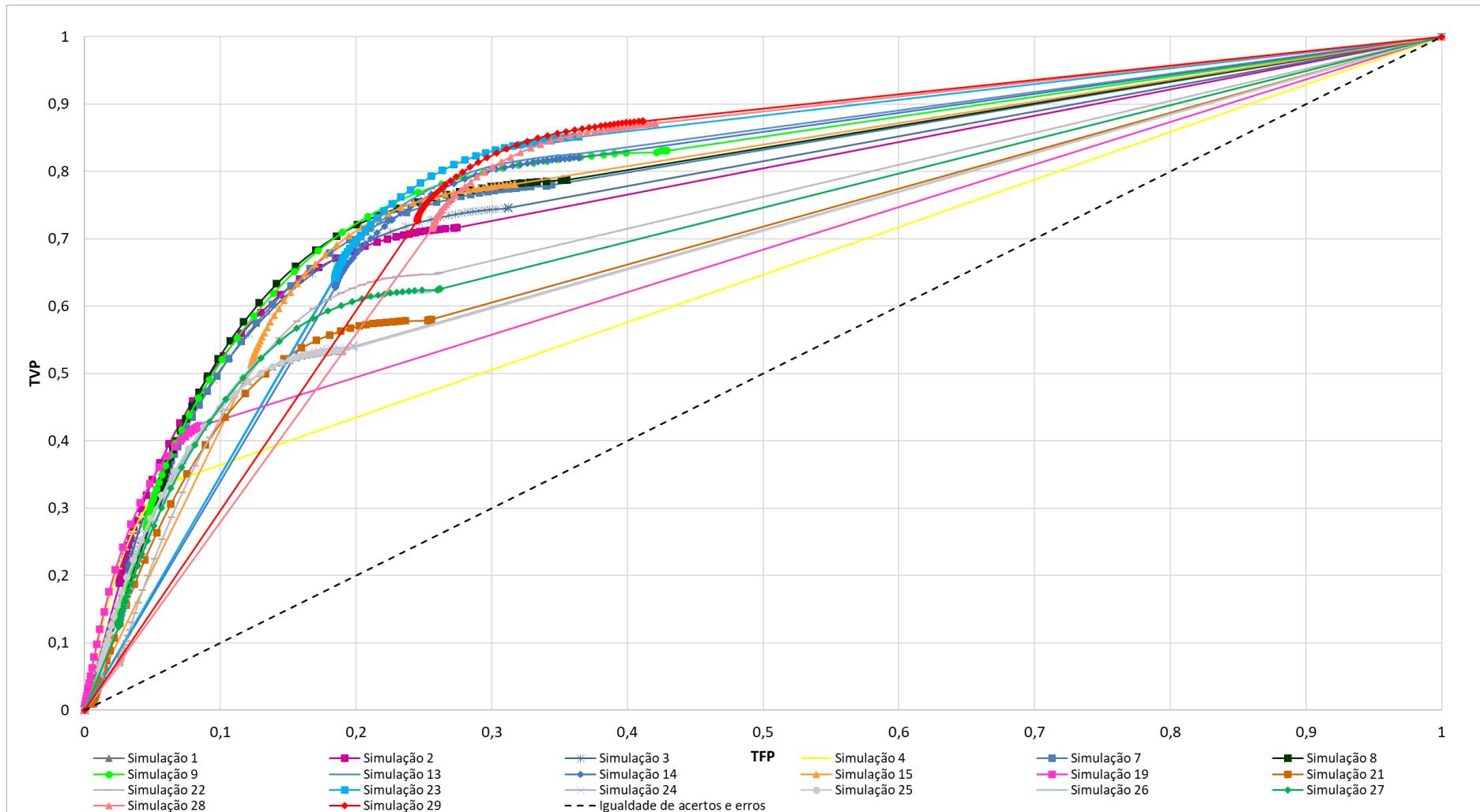


Figura 26 - Curvas ROC com a variação dos parâmetros de entrada.

Ferramenta para estimativa de estabilidade de encostas utilizando QGIS:

desenvolvimento e análise de desempenho

Há variação no formato das curvas, com a alteração dos valores de entrada, o que influencia no valor da área sob elas. As *AUC* variaram de 0,64 a 0,80, como mostra o Quadro 9.

Quadro 9 - *AUC* para simulações com variação do conjunto de parâmetros de entrada.

Simulação	<i>AUC</i>
1	0,69
2	0,77
3	0,77
4	0,64
7	0,78
8	0,79
9	0,80
13	0,78
14	0,77
15	0,78
19	0,67
21	0,70
22	0,72
23	0,78
24	0,69
25	0,69
26	0,72
27	0,72
28	0,77
29	0,78

As melhores simulações foram as que consideraram os dados de monitoramento em campo, ressaltando a importância do mesmo. Segundo o método de análise adotado, o melhor resultado foi o da simulação 9, com valor de 0,80. Nesta simulação foram utilizados valores de coletas de campo, distribuídos pelas UG, em todos os parâmetros para os quais havia dados (c_s , z e ϕ).

Já o pior cenário foi o da simulação 4, em que foram utilizados dados da literatura, em sua maioria, com apenas a profundidade de monitoramento em campo. O valor de *AUC* calculado para a simulação 4 foi de 0,64. A Figura 27 apresenta a curva *ROC* do melhor resultado em comparação com o pior. É possível notar o achatamento da curva na simulação 4, o que causa a diminuição da *AUC*.

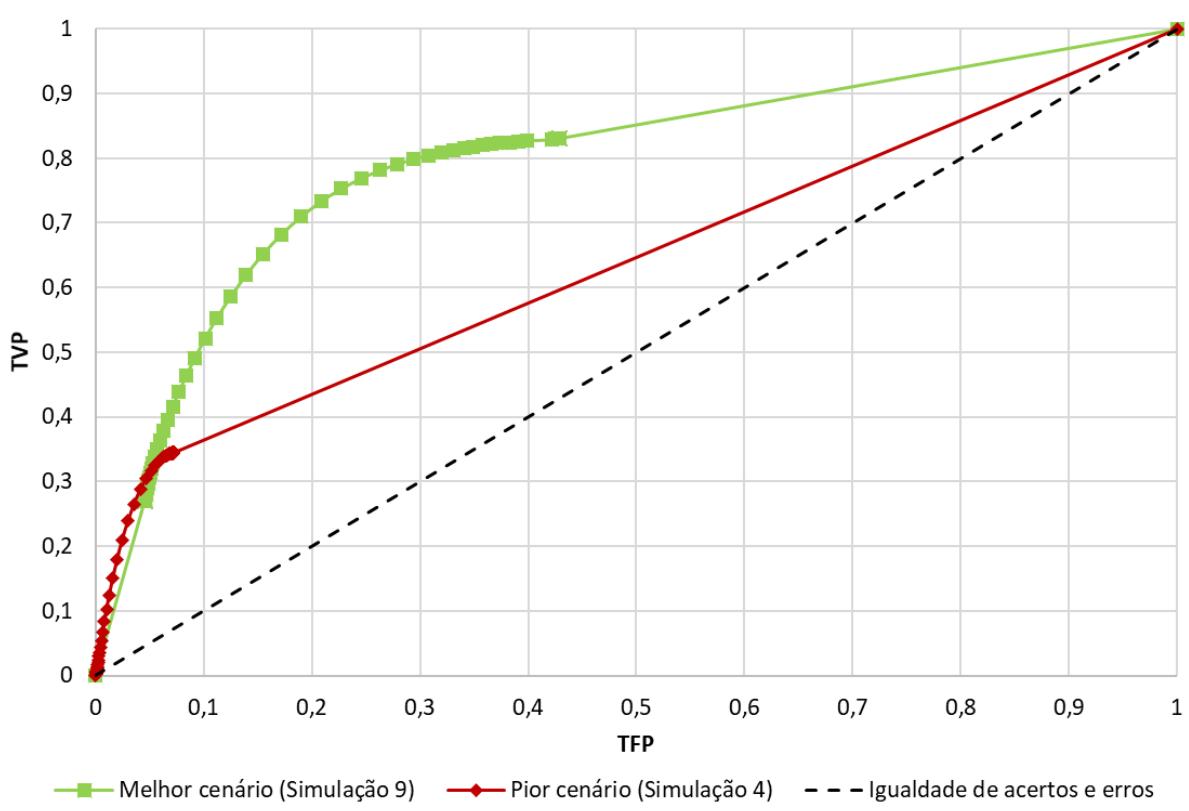


Figura 27 - Curvas ROC com a variação dos parâmetros, melhor e pior caso.

Além da análise das *AUC*, foram avaliadas as relações de *IA/IE* para cada limiar de cada simulação. Quanto maior o limiar a tendência observada é o aumento do índice de acertos, mas também do índice de erros, diminuindo a relação entre *IA/IE*. Os resultados de *IA/IE* obtidos para a menor distância euclidiana e o limiar relacionado para as simulações são apresentados no Quadro 10. Os mapas gerados a partir da seleção do melhor limiar podem ser visualizados no Apêndice C.

Quadro 10 - IA/IE e escolha do limiar para simulações com variação dos parâmetros.

Simulação	Distância euclidiana	IA/IE	Limiar log (q/T)
1	0,50	3,18	-1,1
2	0,37	3,33	-1,7
3	0,37	3,15	-1,8
4	0,66	4,78	-0,2
7	0,35	3,25	-2,0
8	0,34	3,40	-2,0
9	0,34	3,31	-2,1
13	0,34	3,09	-2,6
14	0,35	3,00	-2,5

Simulação	Distância euclidiana	<i>IA/IE</i>	Limiar log (q/T)
15	0,34	3,30	-2,2
19	0,58	4,92	-0,1
21	0,47	2,82	-1,3
22	0,42	3,02	-1,4
23	0,33	3,10	-2,5
24	0,50	3,11	-1,1
25	0,50	3,18	-1,1
26	0,44	3,03	-1,5
27	0,44	2,99	-1,5
28	0,36	2,74	-3,0
29	0,34	2,87	-3,0

Para a relação de *IA/IE* a simulação 4 obteve um melhor resultado, 4,78 enquanto a simulação 9 resultou em 3,31. Porém o índice de acertos da simulação 4 é de 34%, enquanto que o da simulação 9 é de 75%.

Para a simulação 9, o limiar de log (q/T), que melhor representou o evento de 2017, foi o de -2,1. Com *IA/IE* igual a 3,31, tendo 75% de acertos e 23% de erros. O mapa gerado para esta simulação e reclassificado com o limiar adequado é apresentado na Figura 28, com detalhe na Figura 29. As análises realizadas, apontam este, como o mapa de estabilidade mais representativo para o evento extremo de 2017, ocorrido na bacia hidrográfica do Rio Mascarada, dentre os cenários modelados.

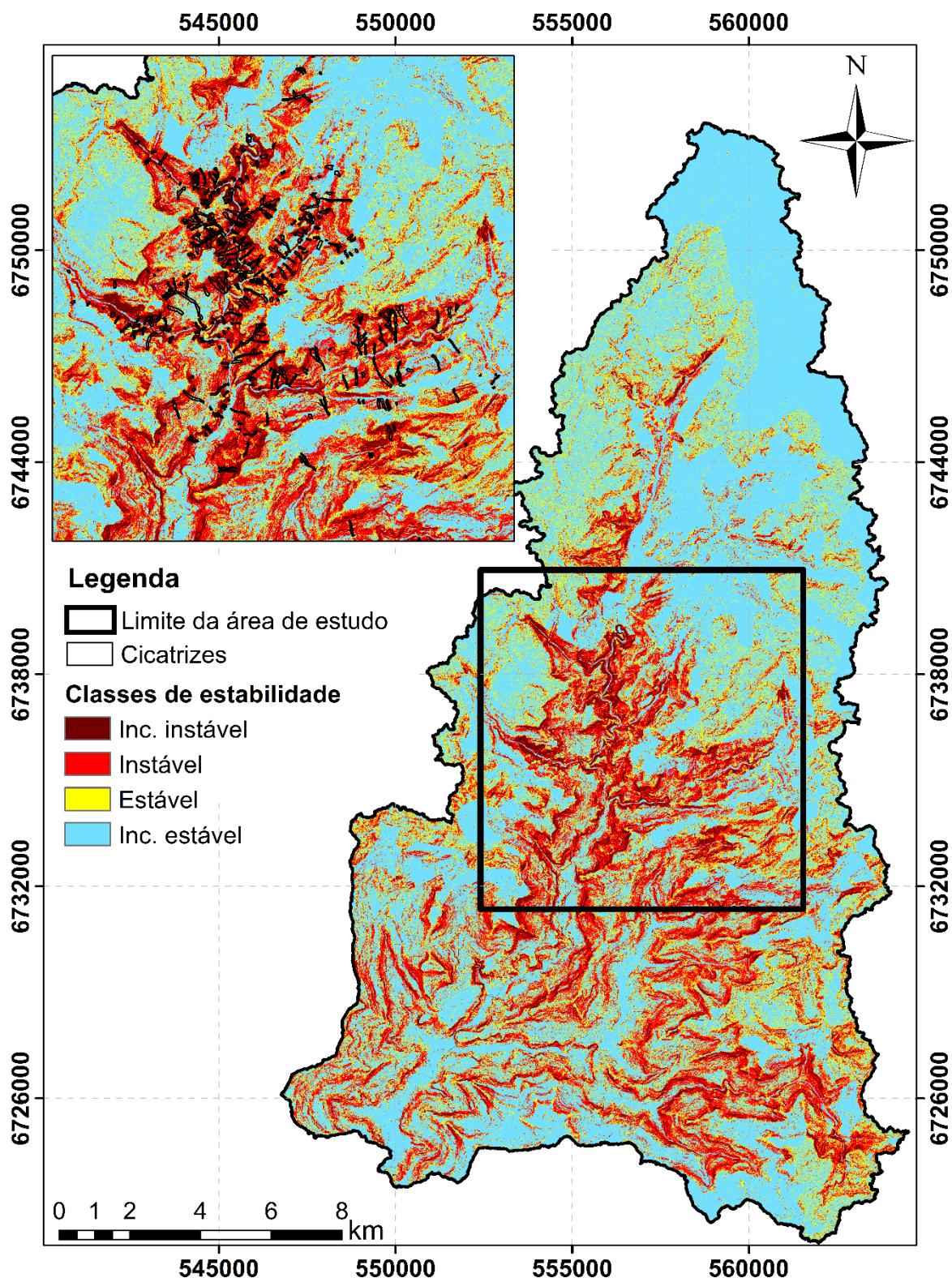


Figura 28 - Mapa de estabilidade da Bacia Hidrográfica do Rio Mascarada (Simulação 9).

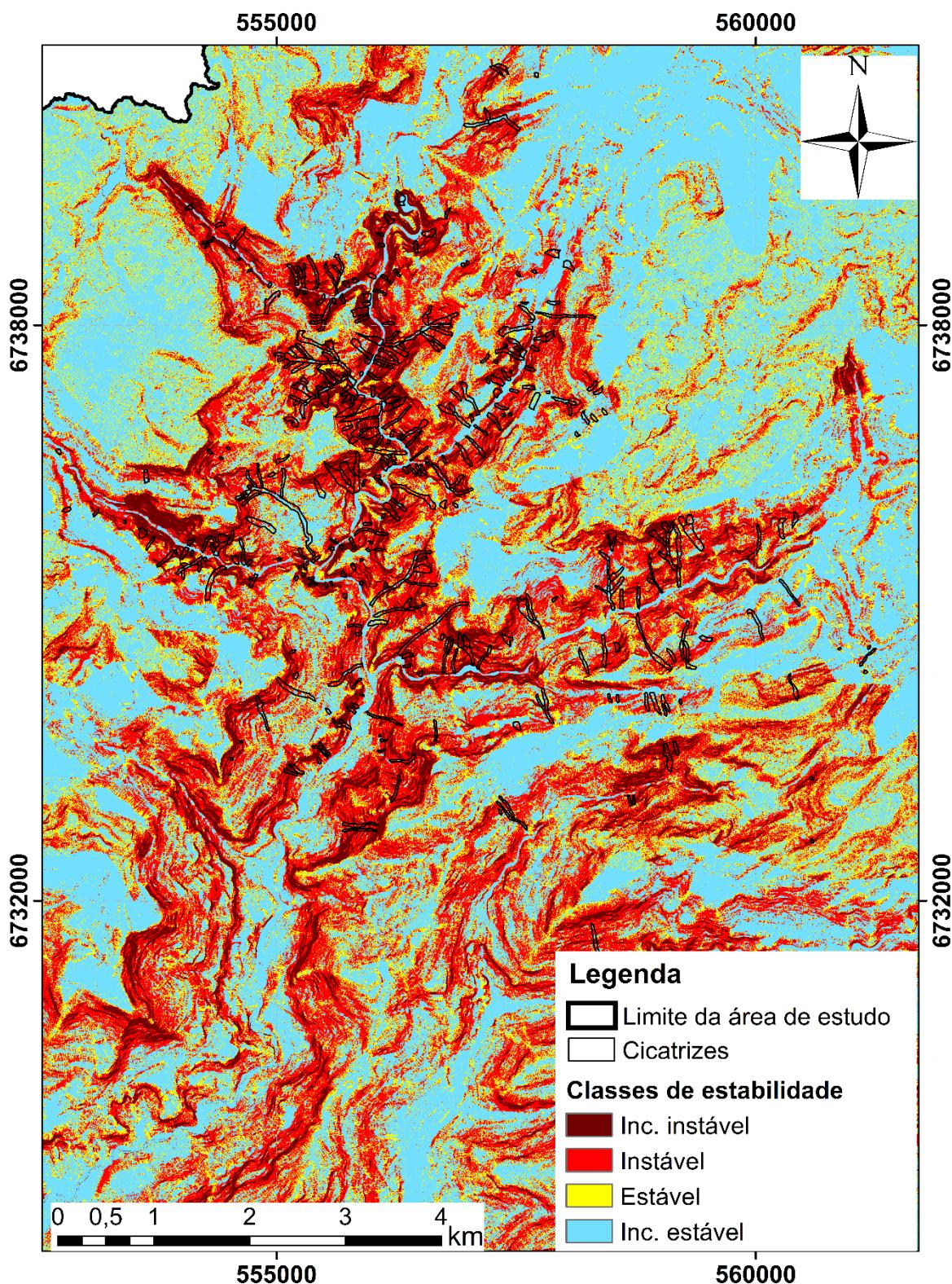


Figura 29 - Detalhe das cicatrizes no mapa de estabilidade da Bacia Hidrográfica do Rio Mascarada (Simulação 9).

O maior valor para a relação de IA/IE foi gerado na simulação 19, com limiar de -0,1. O conjunto de valores usados nessa simulação gerou apenas píxeis nas classes instável,

estável e incondicionalmente estável. Porém, mesmo com a maior relação *IA/IE*, a simulação em questão gerou o segundo pior resultado para a *AUC* (0,67), não sendo uma boa representação para o evento.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os movimentos de massa, em especial os escorregamentos translacionais, devido sua incidência no Brasil, são processos desencadeadores de desastres e, portanto, é de suma importância que sejam estudados. A modelagem de estabilidade de encostas é uma ferramenta muito útil na redução da magnitude e da frequência de ocorrência de desastres relacionados a movimentos de massa. A utilização de ferramentas computacionais, aliadas aos Sistemas de Informação Geográfica, vêm contribuindo na predição destes fenômenos. Portanto, é essencial que ferramentas difundidas no meio científico também estejam acessíveis para as partes interessadas da sociedade.

Neste contexto, este trabalho teve como objetivo a implementação do SHALSTAB no SIG QGIS, com modificações para considerar efeitos da vegetação. A ferramenta, SHALSANN, se demonstrou eficaz, possibilitando a simulação com arquivos de grande porte, de forma rápida e representando de forma satisfatória o fenômeno analisado. Como todo modelo, contudo, deve ser calibrado para gerar resultados mais confiáveis.

A disponibilização do modelo em *software* livre faz com que a ferramenta seja mais acessível e, sendo editável, permite a implementação de novas metodologias. Essa é a versão mais recente de uma ferramenta em constante atualização. A versão anterior, criada para o QGIS 2.18.28 utilizando o *raster calculator* do SAGA, já foi utilizada em diferentes bacias pelo território nacional (RS, SC, PE) e demonstrou eficácia na representação dos escorregamentos. A versão atual do código, criado em Python puro, apresenta resultados ainda mais satisfatórios quanto a rapidez e qualidade dos resultados. O Apêndice D contém um manual de utilização para o usuário. A limitação do tamanho dos arquivos de entrada é dada pela capacidade da máquina em que está sendo utilizado o modelo.

As simulações realizadas demonstraram que os valores coletados *in situ* são a melhor alternativa para a representação da área de estudo, apresentando *IA* de 75%, *IE* de 23% e *AUC* de 0,80. Para uma melhor calibração do modelo, contudo, deveriam ter sido consideradas somente as cicatrizes de iniciação do movimento, sem as áreas de transporte e deposição. A qualidade do mapeamento de cicatrizes empregado, neste caso, afeta diretamente a estimativa da taxa de acerto do modelo.

Estudos futuros podem avaliar a criação de ferramentas de otimização para o modelo, com a definição automática do melhor limiar e dos valores para os parâmetros de entrada com a utilização da análise da *AUC*. Essa prática, porém, não substitui a coleta de dados em campo, necessária à correta caracterização da área e do fenômeno de estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHRENDT, A. **Movimentos de massa gravitacionais** – proposta de um sistema de previsão: aplicação na área urbana de Campos do Jordão – SP. 360p.Tese (Doutorado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.
- ANDRIOLA, P.; CHIRICO, G.B.; DE FALCO, M.; DI CRESCENZO, G.; SANTO, A. **A comparison between physically-based models and a semiquantitative methodology for assessing susceptibility to flowslides triggering in pyroclastic deposits of southern Italy.** Geografia Física e Dinâmica Quaternária, v. 32, n. 2, p. 213-226, 2009.
- AUGUSTO FILHO, O. **Caracterização Geológico-Geotécnica voltada a Estabilização de Encostas:** Uma Proposta Metodológica, Conf. Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, 1^a COBRAE, Rio de Janeiro, ABMS/ABGE, V. 2, pp. 721-733, 1992.
- BASTOS, C. A. B.; DIAS, R. D. **Unidades Geotécnicas de Solos de Porto Alegre.** Rev. IG. São Paulo, Volume Especial, pp. 85 – 89, 1995.
- BATHURST, J. C.; MORETTI, G.; EL-HAMES, A.; MOAVEN-HASHEMI, A.; BURTON, A. **Scenario modelling of basin-scale, shallow landslide sediment yield, Valsassina, Italian Southern Alps.** Nat. Hazards Earth Syst. Sci., v. 5, n. 2, p. 189-202, 2005.
- BAUM, R. L.; SAVAGE, W. Z.; GODT, J. W.: TRIGRS: **A FORTRAN program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis,** USGS, Colorado, Open-file Report 02-424, 35 pp., 2002.
- BIGARELLA, J. J.; PASSOS, E. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais.** Florianópolis: Ed. Da UFSC: v. 3, p.877-1436, 2003.
- BLOOM, A. L. **Superfície da terra.** São Paulo: Edgard Blücher, 184 p., 1970.
- BLUME, K. K.; MACEDO, J. C.; MENEGUZZI, A.; SILVA, L. B. D.; QUEVEDO, D. M.D. & RODRIGUES, M. A. S. **Water quality assessment of the Sinos River, Southern Brazil.** Brazilian Journal of Biology, v. 70(4), p. 1185-1193, 2010.
- BRADLEY, A. P. **The use of the area under the ROC curve in the evaluation of machine learning algorithms.** Pattern Recognition, v. 30, n. 7, p. 1145–1159, 1997.

- BRASIL, Ministério da Agricultura. **Levantamento de Reconhecimento de Solos do Estado do Rio Grande do Sul.** Escala 1:750.000. Recife: MA/DNPEA, 1973.
- BURTON, A.; BATHURST, J. C. **Physically based modelling of shallow landslide sediment yield at a catchment scale.** Environmental Geology, v.35, p.89-99, 1998.
- CARDOZO, G. L.; ZANANDREA, F.; MICHEL, G. P.; KOBIYAMA, M. **Inventário de movimentos de massa na bacia hidrográfica do rio Mascarada/RS.** Ciência e Natura, Santa Maria, v. 43, e31, p. 1-26, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/2179460X43594>. Acesso em: 16, out, 2021.
- CASTRO, A. L. C. **Glossário de defesa civil:** estudo de riscos e medicina de desastres. Brasília: MPO/ Departamento de Defesa Civil. 283 p., 1998.
- CELESTE, A.; CHAVES, V. S. **Avaliação de algoritmos de otimização e funções objetivo para calibração automática do modelo chuva vazão Tank Model.** Ciência e Natura, v. 36, n. 3, 3 out. 2014.
- CENSI, G. **Tank model modificado para escoamento e produção de sedimentos.** Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2019.
- CEPED UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina - Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres). **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais:** 1991 a 2012 / Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. 2. ed. rev. ampl. – Florianópolis: CEPED UFSC, 126 p., 2013.
- COPPOLA, D. P. **Introduction to international management.** 3. ed. Burlington, MA, US: Elsevier. 733p., 2015.
- CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. **Landslides Types and Processes,** Landslides: Investigation and Mitigation, Special Report 247, Transportation Research Board, Washington, USA, p. 36-75, 1996.
- D'AMATO AVANZI, G.; FALASCHI, F.; GIANNECCHINI, R.; PUCCINELLI, A. **Soil slip susceptibility assessment using mechanical–hydrological approach and GIS techniques:** an application in the Apuan Alps (Italy). Natural Hazards, v. 50, n. 3, p. 591-603, 2009.

- DANTAS, M. E.; SHINZATO, E.; BRANDÃO, R. de L.; FREITAS, L. C. B.; TEIXEIRA, W. G. **Origem das Paisagens.** In: VIERO, Ana Cláudia; SILVA, Diogo R. A. (orgs.) Geodiversidade do estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: CPRM, 2010.
- DIAS, F. P.; HERRMANN, M. L. P. **Susceptibilidade a deslizamentos:** Estudo de caso no bairro Saco Grande, Florianópolis – SC, Caminhos da Geografia (6), p. 63-64, 2002.
- DIAS, R. D. 1995. **Proposta de metodologia de definição de carta geotécnica básica em regiões tropicais e subtropicais.** Revista do Instituto Geológico, Volume Especial, 51-55.
- DIETRICH, W. E.; BELLUGI, D.; REAL DE ASUA, R. **Validation of the shallow landslide model, SHALSTAB, for forest management.** Water science and Application, 2, 195-227, 2001.
- DIETRICH, W. E.; MONTGOMERY, D. R. **SHALSTAB:** a digital terrain model for mapping shallow landslide potential. NCASI (National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement), Technical Report, 29 p., 1998.
- DORNELLES FILHO, A. A. **A simulação de variáveis aleatórias e os métodos Monte Carlo e Quase-Monte Carlo na quadratura multidimensional.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 5 ed., rev. e ampl., Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.
- EMBRAPA. **Súmula da 10ª Reunião Técnica de Levantamento de Solos.** Rio de Janeiro, RJ: Embrapa, 1979.
- FAWCETT, T. **An introduction to ROC analysis.** Pattern Recognition Letters, v. 27, n. 8, p. 861–874, 2006.
- FEEL, R. **Landslide risk assessment and acceptable risk.** Canadian Geotechnical journal, v. 31, p. 261 – 272, 1994.
- FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. **Movimentos de massa:** uma abordagem geológico-geomorfológica. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Eds.). Geomorfologia e meio ambiente. Rio de Janeiro: Bertrand, 1996. p. 123-194.

FREIRE, E. S. M. **Movimentos coletivos de solos e rochas e sua moderna sistemática.** Revista Construção, vol. 8, p. 10-18. Rio de Janeiro, 1965.

FROUDE, M. J.; PETLEY, D. N. **Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016,** Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 18, 2161–2181, <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2161-2018>, 2018.

GDAL/OGR. **GDAL Documentation.** Frank Warmerdam, Even Rouault, and others. 2021. Disponível em: <<https://gdal.org/>>. Acesso em: 17/09/2020.

GODOY, J. V. Z.; BIEHL, A.; MELO, C. M.; MICHEL, G. P. **Implementação do modelo SHALSTAB em ferramentas para ArcGis e QGIS.** Encontro Nacional de Desastres (1., jul. 2018, Porto Alegre). Anais. Porto Alegre : ABRHidro, [2018].

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação.** São Paulo: 2a ed. Edgard Blücher, 1984. 194p.

GUIMARÃES, R.F.; RAMOS, V.M.; REDIVO, A.; GOMES, R.; FERNANDES, N.; DE CARVALHO, O.A. **Application of the SHALSTAB model for mapping susceptible landslide areas in mine zone** (Quadrilátero Ferriífero in southeast Brazil). Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS '03. Proceedings. 2003 IEEE International, 2003, 21-25 July 2003. p.2444-2446 vol.4.

GUZZETTI, F.; REICHENBACH, P.; ARDIZZONE, F.; CARDINALI, M.; GALLI, M. **Estimating the quality of landslide susceptibility models,** Geomorphology, v. 81, n. 1–2, p. 166-184, 2006.

HARRIS, C.R., MILLMAN, K.J., VAN DER WALT, S.J. *et al.* **Array programming with NumPy.** Nature 585, 357–362 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>.

HUTCHINSON, J.N. **General Report:** Morphological and Geotechnical Parameters of Landslides in Relation to Geology and Hydrogeology. Proceedings of 5th International Symposium on Landslides, Lausanne, 10-15 july, 1988, pp. 3-35.

IBGE, 2020. **Estimativa da população.** Disponível: <<https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/distribuicao-e-densidade-demografica>>. Acesso: 03/10/2020.

KAMPF, N. & STRECK, V. S. Solos. In: VIERO, A. C. & SILVA, D. R. A. **Geodiversidade do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre: CPRM, 2010.

KORUP, O.; McSAVENEY, M.J.; DAVIES, T.R.H. **Sediment generation and delivery from large historic landslides in the Southern Alps, New Zealand.** Geomorphology, Volume 61, Issues 1–2, pp.189 – 207, 2004.

KRENN, J.; ZANGERL, C.; MERGILI, M. **Application and optimization of input parameter spaces in mass flow modelling:** a case study with r. randomwalk and r. ranger. In: EGU General Assembly Conference Abstracts. 2017. p. 6088.

LEAL, L. A. S. **Uma Fundamentação Teórica para a Complexidade Estrutural de Problemas de Otimização.** Porto Alegre: PPGC - UFRGS, 2002 (Tese de Doutorado).

LEAL, R. E.; MEDEIROS, L. T. B.; QUEIROZ, J. D. S.; BRITO, G. L.; COIADO, L. L. **Utilização das extensões TauDEM e ArcHydro: um estudo comparativo aplicado à delimitação automática de bacias hidrográficas no Estado do Pará.** Revista SEAF 1, 204-218, 2017.

LISTO, F.L.R.; RAMOS, H.; VIEIRA, B.C. **Uso dos modelos SHALSTAB e TRIGRS na previsão de escorregamentos translacionais rasos.** XI Simpósio Nacional de Geomorfologia. 12 p., 2016.

LUNA, S., V., de. **Planejamento de pesquisa:** uma introdução. São Paulo: EDUC, 2^a Ed., 2011. 116 p.

MANTOVANI, F.; SOETERS, R.; VAN WESTEN, C.J. **Remote sensing techniques for landslide studies and hazard zonation in Europe.** Geomorphology, v. 15, p.213-225, 1996.

MATZENAUER, R; RADIN, B; ALMEIDA, I. (Ed.). **Atlas Climático:** Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura Pecuária e Agronegócio; Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária (FEPAGRO), 2011.

MEISINA, C.; SCARABELLI, S. **A comparative analysis of terrain stability models for predicting shallow landslides in colluvial soils.** Geomorphology, v. 87, n. 3, p. 207-223, 2007.

MENEZES, E. A. W. **Calibração de modelo numérico para simulação do comportamento mecânico de cabos poliméricos reforçados por fibra de carbono.** Dissertação (Mestrado em PPGE/UFRGS Programa de Pós-Graduação em Eng Minas, Metalúrgica e Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2015.

MICHEL, G. P. **Estimativa da profundidade do solo e seu efeito na modelagem de escorregamentos.** 2015. 164 f. Tese (Doutorado)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2015.

MICHEL, G. P.; KOBIYAMA, 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.

MICHEL, G. P., KOBIYAMA, M., GOERL, R. F. **Análise comparativa entre os modelos SHALSTAB e SINMAP na identificação de áreas suscetíveis a escorregamentos translacionais.** X Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, 21 p., 2012.

MICHEL, G. P.; KOBIYAMA, M.; GOERL, R. F.; ZANANDREA, F.; PAUL, L. R.; SCHWARZ, H.; CARDOZO, G. L. (2021). **Efeitos da vegetação na modelagem de estabilidade de encostas na bacia hidrográfica do rio Cunha, Santa Catarina.** Revista Brasileira de Geomorfologia. 2021, v. 22, n. 4; (Out-Dez) DOI: 10.20502/rbg.v22i4.2008

MICHEL, G. P. **Modelagem de Estabilidade de Encostas Com Consideração do Efeito da Vegetação.** Florianópolis, SC: Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

MICHELON, C. J. **Physical quality of irrigated soil of Rio Grande do Sul state and central region of Brazil.** 114 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. **A physically-based model for topographic control on shallow landsliding.** Water Resources Research, v. 30, n. 4, pp. 1153-1171, 1994.

MONTGOMERY, D. R. **Road surface drainage, channel initiation, and slope stability.** Water Resources Research, 30: 1925-1932. 1994.

MOSTYN, G.R.; SMALL, J.C. **Methods of stability analysis.** In: WALKER, B.; FEEL, R. ed. Soil slope instability and stabilisation. Cap. 3, p.71-113. 1987.

NUMPY. **NumPy v1.21 Manual.** 22/Jun 2021. Disponível em: <<https://numpy.org/doc/stable/index.html#numpy-docs-mainpage>>. Acesso em: 17/09/2021.

O'LOUGHLIN, E. M. **Prediction of Surface Saturation Zones in Natural Catchments by Topographic Analysis.** Water Resources Research, v. 22, n. 5, p. 794-804, 1986.

- OLIVA, R. **Model calibration as a testing strategy for system dynamics models.** European Journal of Operational Research, v. 151, n. 3, p. 552–568, dez. 2003.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Working party on world landslide inventory.** Bulleting of the IAEG, v. 41, p. 5-12, 1993.
- PACK, R. T.; TARBOTON, D. G.; GOODWIN, C. N. **Terrain Stability Mapping with SINMAP, technical description and users guide for version 1.00.** Report Number 4114-0, Terratech Consulting Ltd., Salmon Arm, B.C. Canada (www.tclbc.com), 1998.
- PAUL, L. R.; ABATTI, B. H.; MICHEL, G. P. **Análise de desempenho dos modelos SHALSTAB, SINMAP e TRIGRS para a avaliação da suscetibilidade a escorregamentos translacionais nas bacias Taboão e Matador, Rio do Sul (SC).** In: XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2019, Foz do Iguaçu. Anais, 2019.
- PAUL, L. R. **Proposição de modelo para simulação de fluxos de detritos em escala de bacia.** / Leonardo Paul. -- 2020. 204 f. Porto Alegre, RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2020.
- PEEL, M. C.; FINLAYSON, B L.; MCMAHON, T. A. **Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification.** Hydrology and earth system sciences discussions, v. 4, n. 2, p. 439-473, 2007.
- PETLEY, D. **Global patterns of loss of life from landslides.** Geology, 40 (10) (2012), pp.927-930,10.1130/G33217.1, 2012.
- REGINATTO, G. M. P.; MACCARINI, M.; KOBIYAMA, M.; HIGASHI, R. A. R.; GRANDO, A.; CORSEUIL, C. W.; CARAMEZ, M. L. **SHALSTAB application to identify the susceptible areas of shallow landslides in Cunha River watershed, Rio dos Cedros city, SC, Brazil.** Proceedings of the 4th GEOBIA, Rio de Janeiro - Brazil. p.108-113, 2012.
- SAFAEI, M.; OMAR, H.; HUAT, B.K.; YOUSOF, Z.B.M.; GHIASI, V. **Deterministic Rainfall Induced Landslide Approaches, Advantage and Limitation.** Electronic Journal of Geotechnical Engineering, v. 16, p. 1619-1650, 2011.
- SAKAMOTO, M.Y.; GUESSER, L.H.; DE OLIVEIRA, M.C.G.; CONTESSI, R.J.; DE ABREU, R.P.; HIGASHI6, R.A.R. **Uso do método Borehole Shear Test no mapeamento**

geotécnico de áreas de risco. 15º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental. 10 p. 2015.

SAYÃO, L. F. **Modelos teóricos em ciência da informação** - abstração e método científico. Ciência da Informação, v. 30, n. 1, p. 82–91, abr. 2001.

SCHWARZ, H. & MICHEL, G. P. **Avaliação de estabilidade de encostas com uso do modelo TRIGRS no município de Ibirama – SC.** XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Florianópolis – SC, 2017.

SCHWARZ, H. **Identificação, mapeamento e caracterização de cicatrizes de escorregamentos.** Porto Alegre, RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019.

SECRETARIA DO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. **Diagnóstico Preliminar:** Descritivo dos eventos ocorridos no dia 5 de janeiro de 2017 entre as regiões dos municípios de São Francisco de Paula e Rolante/RS. Porto Alegre, RS: SEMA, 2017.

SELBY, M. **Hillslope Materials and Processes.** Oxford University Press, Oxford, 1993. 289p.

SEPÚLVEDA, S. A.; PETLEY, D. N. **Regional trends and controlling factors of fatal landslides in Latin America and the Caribbean,** Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 15, 1821–1833, <https://doi.org/10.5194/nhess-15-1821-2015>, 2015.

SHARPE, C. F. S. **Landslides and Related Phenomena:** A Study of Mass Movements of Soil and Rock. Columbia Univ. Press, New York, 1938, 137p.

SIMÕES, S.J.C.; GOMES, L.; MENDES, R.M. MENDES, T.S.G., **SIG e modelos de escorregamentos:** avaliando métodos para reduzir as incertezas de dados de solo e precipitação. Revista Brasileira de Cartografia (2016), Nº 68/9, Edição Especial Movimentos de Massa e Processos Erosivos: 1737-1746. 2016.

SKEMPTON, A.W., HUTCHINSON, J.N. **Stability of Natural Slopes and Embankment Foundations.** 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico, State of the Art Volume, pp.291-340. 1969.

SOETERS, R.; VAN WESTEN, C.J. **Slope stability: recognition, analysis and zonation.** In: Turner AK, Shuster RL (eds) “Landslides: investigation and mitigation”. Transportation Research Board – National Research Council, Special Report 247, pp 129–177. 1996.

- SORBINO, G.; SICA, C.; CASCINI, L. **Susceptibility analysis of shallow landslides source areas using physically based models.** Natural Hazards, v. 53, n. 2, p. 313-332, 2010.
- TARBOTON, D. G., (1997), **A New Method for the Determination of Flow Directions and Contributing Areas in Grid Digital Elevation Models,** Water Resources Research, 33(2): 309-319. 1997.
- TARBOTON, D. G., (2003), **Terrain Analysis Using Digital Elevation Models in Hydrology,** 23rd ESRI International Users Conference, San Diego, California, July 7-11. 2003.
- TOMINAGA, L. K. **Escorregamentos.** In: Desastres naturais: conhecer para prevenir. São Paulo: Instituto Geológico, p. 25-38, 2009.
- UNISDR - International Strategy for Disaster Reduction. **Terminology on Disaster Risk Reduction.** 2009. Disponível em <<https://www.undrr.org/>>. Acesso em: setembro de 2020.
- USGS - U.S. Geological Survey. **Landslide Types and Processes.** Factsheet 2004- 3072, 2004, 4p.
- VAN WESTEN, C.J.; CASTELLANOS, E.; KURIAKOSE, S.L. **Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment:** an overview. Engineering Geology, 102, pp. 112-131. 2008.
- VAN WESTEN C.J.; VAN ASCH T.W.J.; SOETERS R. **Landslide hazard and risk zonation; why is it still so difficult?** Bulletin of Engineering geology and the Environment, 65 (2) (2005), pp. 167-184. 2005.
- VARNES, D.J., **Slope Movement Types and Processs.** Chapter 2 in Landslides: Analysis and Control, Schuster & Krizek (eds.). Special Report 176:11-33. Whashington D.C.: Highway Research Board, 1978.
- VEJA, Shana Reis. **Chuvas no Rio de Janeiro.** 2011. Disponível em: <https://veja.abril.com.br/galeria-fotos/chuvas-no-rio-de-janeiro>. Acesso em: 18/09/2020.
- VIEIRA, B. C.; FERNANDES, N.F.; AUGUSTO FILHO, O. **Shallow landslide prediction in the Serra de Cubatão, São Paulo (SP).** EGU General Assembly Conference Abstracts. EGU General Assembly 2009, 19-24 April, 2009 in Vienna, Austria. v. 11, 2009.

WP, WLI. International Geotechnical societies UNESCO Working Party on World Landslide Inventory. **Multilingual landslide glossary**. Richmond: BiTech Publishers Ltd, 1993. 32 p.

APÊNDICE A
ALGORITMO UTILIZADO

Programado em Python 3.7.0

```
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
"""

/*****
```

SHALSANN

A QGIS plugin

Ferramenta para identificação de áreas suscetíveis a escorregamentos translacionais, considerando o efeito da vegetação.

Generated by Plugin Builder: <http://g-sherman.github.io/Qgis-Plugin-Builder/>

begin	:	2021-10-13
git sha	:	\$Format:%H\$
copyright	:	(C) 2021 by Anne Biehl/ GPDEN
email	:	biehlanne@gmail.com

```
*****/
```

```
*****
```

* This program is free software; you can redistribute it and/or modify *

* it under the terms of the GNU General Public License as published by *

* the Free Software Foundation; either version 2 of the License, or *

* (at your option) any later version.

*

*

*

******/

"""

```
from qgis.PyQt.QtCore import QSettings, QTranslator, QCoreApplication
from qgis.PyQt.QtGui import QIcon
from qgis.PyQt.QtWidgets import QAction, QFileDialog
from qgis.core import QgsProject, Qgs, QgsRasterLayer
import gdal
import numpy as np
```

Initialize Qt resources from file resources.py

```
from .resources import *
# Import the code for the dialog
from .SHALSANN_dialog import SHALSANNDialog
import os.path
```

class SHALSANN:

def __init__(self, iface):

Save reference to the QGIS interface

self.iface = iface

```

# initialize plugin directory

self.plugin_dir = os.path.dirname(__file__)

# initialize locale

locale = QSettings().value('locale/userLocale')[0:2]

locale_path = os.path.join(
    self.plugin_dir,
    'i18n',
    'SHALSANN_{}.qm'.format(locale))

if os.path.exists(locale_path):
    self.translator = QTranslator()
    self.translator.load(locale_path)
    QCoreApplication.installTranslator(self.translator)

# Declare instance attributes

self.actions = []
self.menu = self.tr(u'&SHALSANN')

# Check if plugin was started the first time in current QGIS session

# Must be set in initGui() to survive plugin reloads

self.first_start = None

# noinspection PyMethodMayBeStatic

def tr(self, message):

```

```
# noinspection PyTypeChecker,PyArgumentList,PyCallByClass
return QCoreApplication.translate('SHALSANN', message)

def add_action(
    self,
    icon_path,
    text,
    callback,
    enabled_flag=True,
    add_to_menu=True,
    add_to_toolbar=True,
    status_tip=None,
    whats_this=None,
    parent=None):

    icon = QIcon(icon_path)
    action = QAction(icon, text, parent)
    action.triggered.connect(callback)
    action.setEnabled(enabled_flag)

    if status_tip is not None:
```

```

action.setStatusTip(status_tip)

if whats_this is not None:
    action.setWhatsThis(whats_this)

if add_to_toolbar:
    # Adds plugin icon to Plugins toolbar
    self iface.addToolBarIcon(action)

if add_to_menu:
    self iface.addPluginToRasterMenu(
        self.menu,
        action)

self.actions.append(action)

return action

def initGui(self):

    icon_path = ':/plugins/SHALSANN/icon.png'
    self.add_action(
        icon_path,
        text=self.tr(u'SHALSANN'),

```

```

callback=self.run,
parent=self iface mainWindow()

# will be set False in run()

self.first_start = True

def unload(self):
    for action in self.actions:
        self iface.removePluginRasterMenu(
            self.tr(u'&SHALSANN'),
            action)
        self iface.removeToolBarIcon(action)

def select_output_file(self):
    filename, _filter = QFileDialog.getSaveFileName(
        self.dlg, "Select output file","", "*.tif")
    self.dlg.lineEdit.setText(filename)

def run(self):
    # Create the dialog with elements (after translation) and keep reference
    # Only create GUI ONCE in callback, so that it will only load when the plugin is started

```

```

if self.first_start == True:

    self.first_start = False

    self.dlg = SHALSANNDialog()

    self.dlg.pushButton.clicked.connect(self.select_output_file)

    layers = QgsProject.instance().layerTreeRoot().children()

    self.dlg.comboBox.clear()

    self.dlg.comboBox.addItems([layer.name() for layer in layers])

    layers = QgsProject.instance().layerTreeRoot().children()

    self.dlg.comboBox_2.clear()

    self.dlg.comboBox_2.addItems([layer.name() for layer in layers])

    layers = QgsProject.instance().layerTreeRoot().children()

    self.dlg.comboBox_3.clear()

    self.dlg.comboBox_3.addItems([layer.name() for layer in layers])

    layers = QgsProject.instance().layerTreeRoot().children()

    self.dlg.comboBox_4.clear()

    self.dlg.comboBox_4.addItems([layer.name() for layer in layers])

    layers = QgsProject.instance().layerTreeRoot().children()

    self.dlg.comboBox_5.clear()

    self.dlg.comboBox_5.addItems([layer.name() for layer in layers])

    layers = QgsProject.instance().layerTreeRoot().children()

    self.dlg.comboBox_6.clear()

    self.dlg.comboBox_6.addItems([layer.name() for layer in layers])

    layers = QgsProject.instance().layerTreeRoot().children()

```

```

self.dlg.comboBox_7.clear()

self.dlg.comboBox_7.addItems([layer.name() for layer in layers])

layers = QgsProject.instance().layerTreeRoot().children()

self.dlg.comboBox_8.clear()

self.dlg.comboBox_8.addItems([layer.name() for layer in layers])

# show the dialog

self.dlg.show()

# Run the dialog event loop

result = self.dlg.exec_()

# See if OK was pressed

if result:

    #Dados de entrada

    f = self.dlg.comboBox.currentText()

    lyr_rst_f = QgsProject.instance().mapLayersByName(f)[0]

    f = lyr_rst_f.source()

    f = gdal.Open (lyr_rst_f.source())

    ab = self.dlg.comboBox_2.currentText()

    lyr_rst_ab = QgsProject.instance().mapLayersByName(ab)[0]

    ab = lyr_rst_ab.source()

    ab = gdal.Open (lyr_rst_ab.source())

    cr = self.dlg.comboBox_3.currentText()

    lyr_rst_cr = QgsProject.instance().mapLayersByName(cr)[0]

    cr = lyr_rst_cr.source()

```

```

cr = gdal.Open (lyr_rst_cr.source())

cs = self.dlg.comboBox_4.currentText()

lyr_rst_cs = QgsProject.instance().mapLayersByName(cs)[0]

cs = lyr_rst_cs.source()

cs = gdal.Open (lyr_rst_cs.source())

s = self.dlg.comboBox_5.currentText()

lyr_rst_s = QgsProject.instance().mapLayersByName(s)[0]

s = lyr_rst_s.source()

s = gdal.Open (lyr_rst_s.source())

rs = self.dlg.comboBox_6.currentText()

lyr_rst_rs = QgsProject.instance().mapLayersByName(rs)[0]

rs = lyr_rst_rs.source()

rs = gdal.Open (lyr_rst_rs.source())

z = self.dlg.comboBox_7.currentText()

lyr_rst_z = QgsProject.instance().mapLayersByName(z)[0]

z = lyr_rst_z.source()

z = gdal.Open (lyr_rst_z.source())

w = self.dlg.comboBox_8.currentText()

lyr_rst_w = QgsProject.instance().mapLayersByName(w)[0]

w = lyr_rst_w.source()

w = gdal.Open (lyr_rst_w.source())

```

#Leitura da banda correta dos arquivos

```
f = np.array(f.GetRasterBand(1).ReadAsArray(),dtype=np.float64)
```

```

ab = np.array(ab.GetRasterBand(1).ReadAsArray(),dtype=np.float64)

cr = np.array(cr.GetRasterBand(1).ReadAsArray(),dtype=np.float64)

cs = np.array(cs.GetRasterBand(1).ReadAsArray(),dtype=np.float64)

s = np.array(s.GetRasterBand(1).ReadAsArray(),dtype=np.float64)

rs = np.array(rs.GetRasterBand(1).ReadAsArray(),dtype=np.float64)

z = np.array(z.GetRasterBand(1).ReadAsArray(),dtype=np.float64)

w = np.array(w.GetRasterBand(1).ReadAsArray(),dtype=np.float64)

np.seterr(divide="ignore", invalid="ignore")

#Calculo

s = s*3.14159265/180

f = f*3.14159265/180

tans = np.tan(np.array(s))

tanf = np.tan(np.array(f))

coss = np.cos(np.array(s))

sens = np.sin(np.array(s))

ista = (1-1/(rs/1000+w/(1000*9.81*z*coss)))*tanf + (cr+cs)/(rs*9.81*z*coss*coss*(1+w/(rs*9.81*z*coss)))

iu = tanf+(cr+cs)/(rs*9.81*z*coss*coss*(1+(w/(rs*9.81*z*coss)))))

qt = sens/ab*((cr+cs)/(1000*9.81*z*coss*coss*tanf)+(1-tans/tanf)*(w/(1000*9.81*z*coss)+rs/1000))

log = np.log10(np.array(qt))

```

```
con = np.where(tans > iu, -10, log)

st = np.where(tans < ista, 10, con)

#Criacao do raster de saida

filename = self.dlg.lineEdit.text()

driver = gdal.GetDriverByName("GTiff")

out = driver.CreateCopy(filename, gdal.Open(lyr_rst_f.source()), strict=0)

out.GetRasterBand(1).WriteArray(st)

cs = None

out = None

lyr_saida = QgsRasterLayer(filename,"Estabilidade")

QgsProject.instance().addMapLayer(lyr_saida)
```

APÊNDICE B

CURVAS ROC

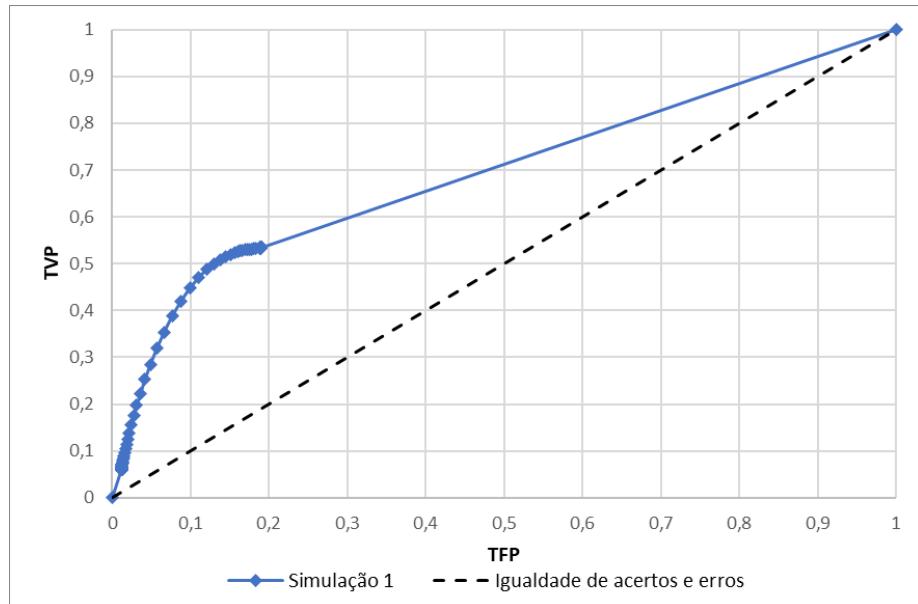


Figura 1 - Curva ROC simulação 1.

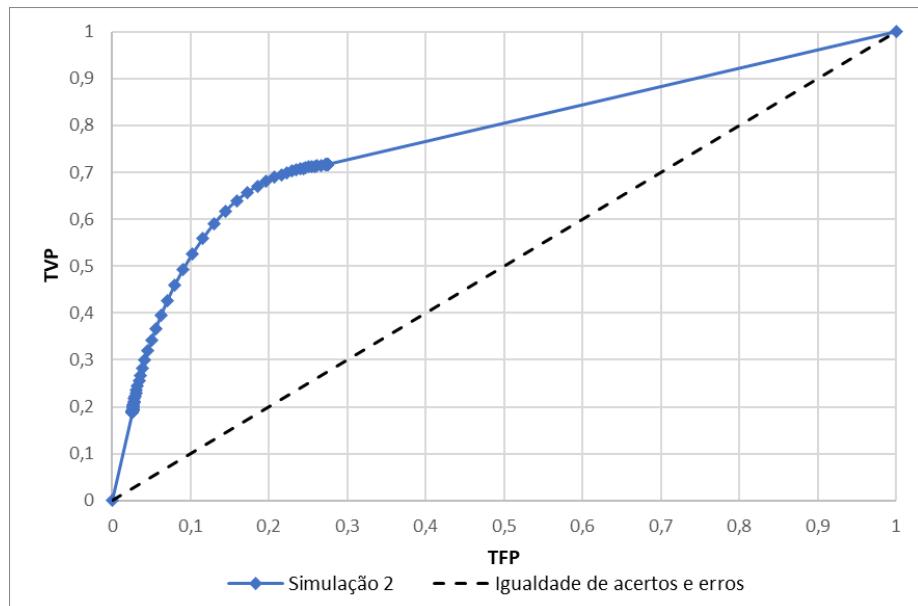


Figura 2 - Curva ROC simulação 2.

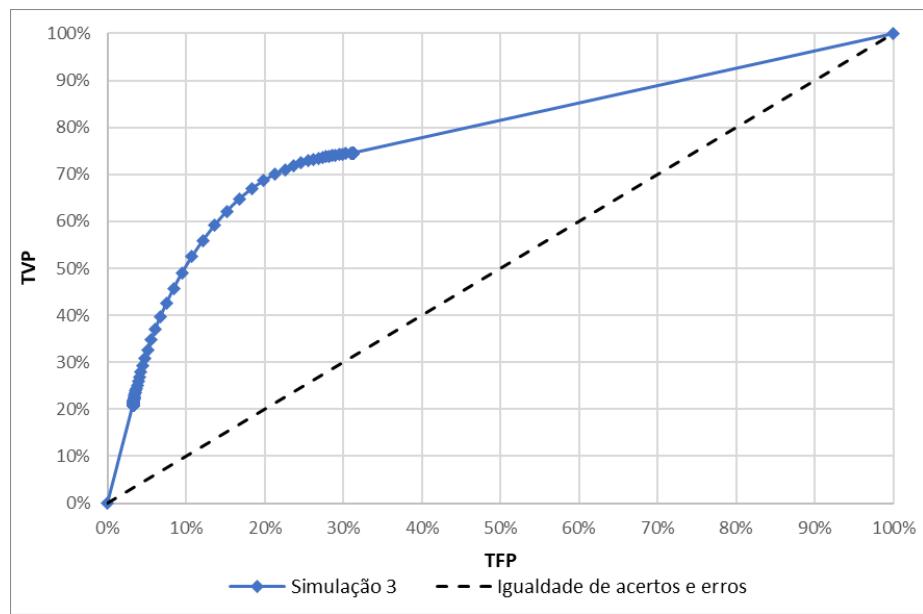


Figura 3 - Curva ROC simulação 3.

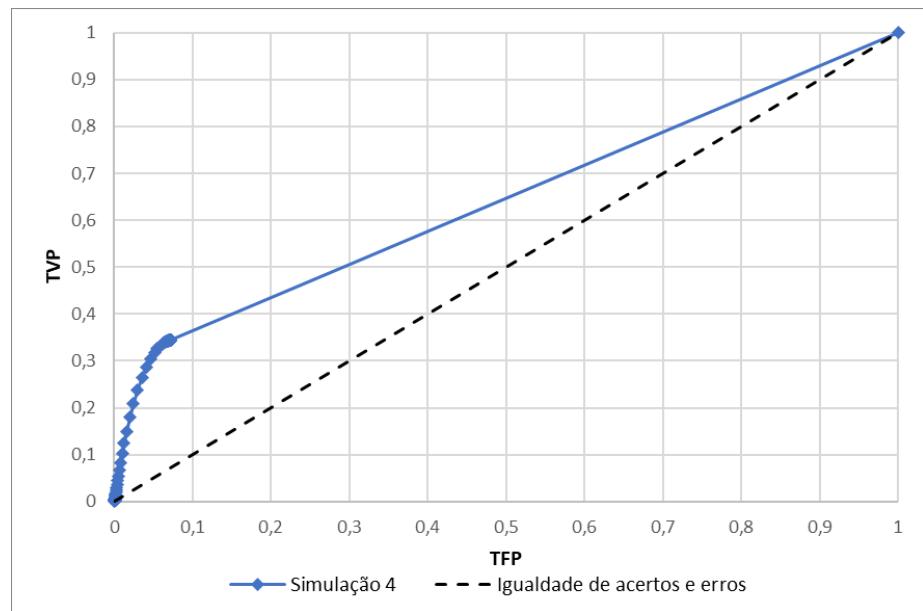


Figura 4 - Curva ROC simulação 4.

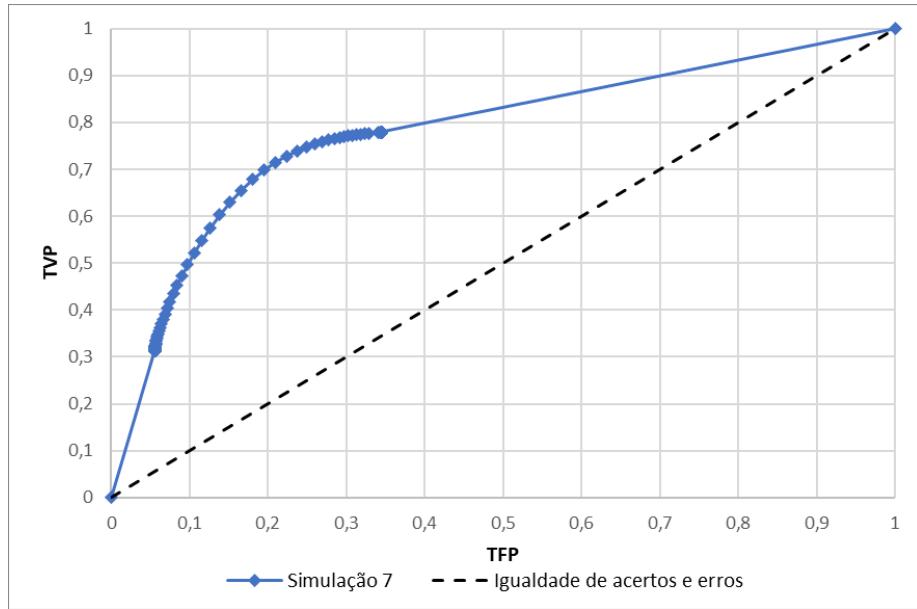


Figura 7 - Curva ROC simulação 7.

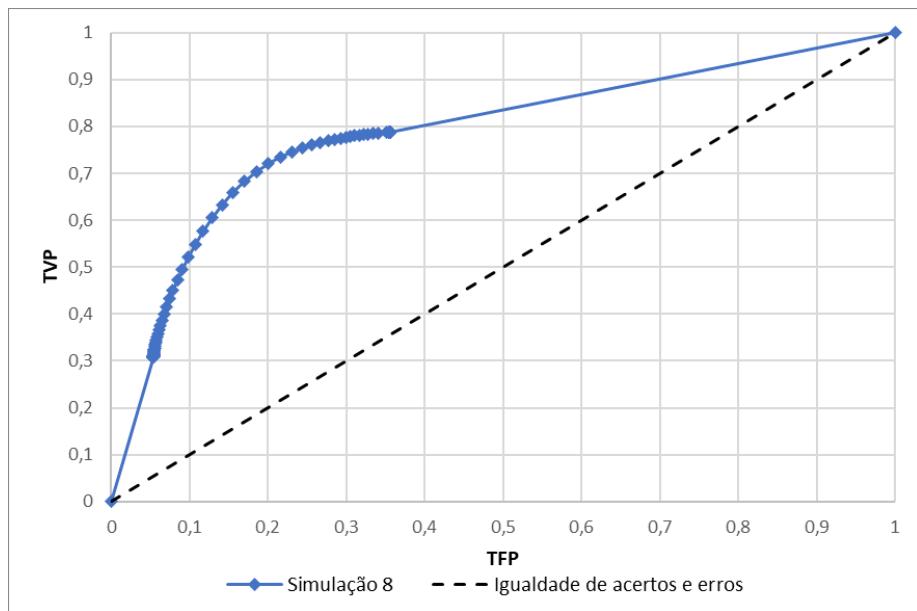


Figura 8 - Curva ROC simulação 8.

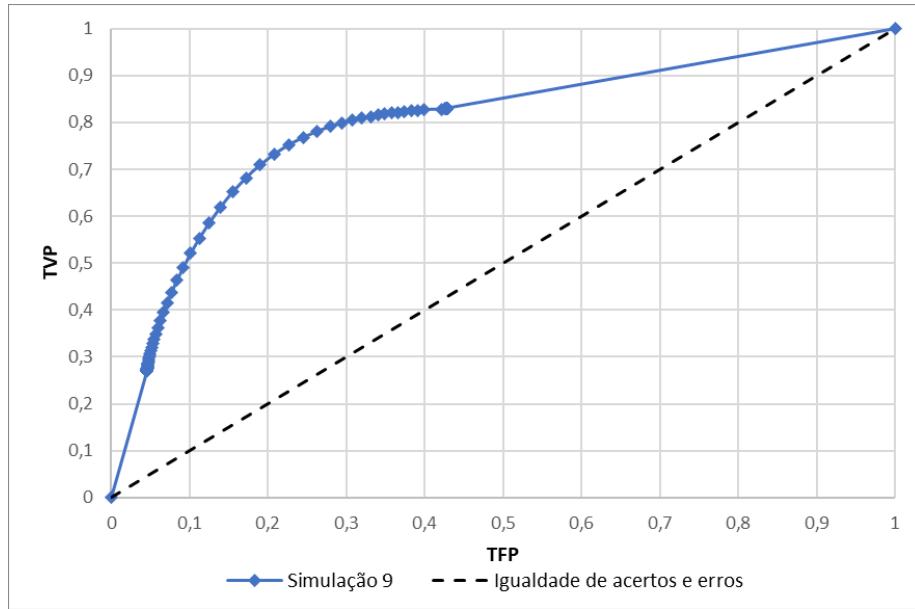


Figura 9 - Curva ROC simulação 9.

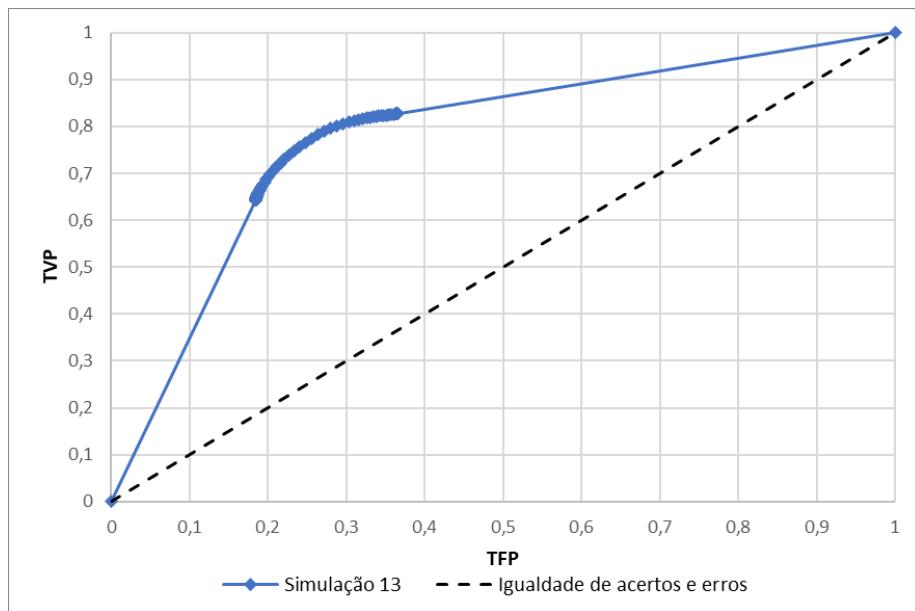


Figura 13 - Curva ROC simulação 13.

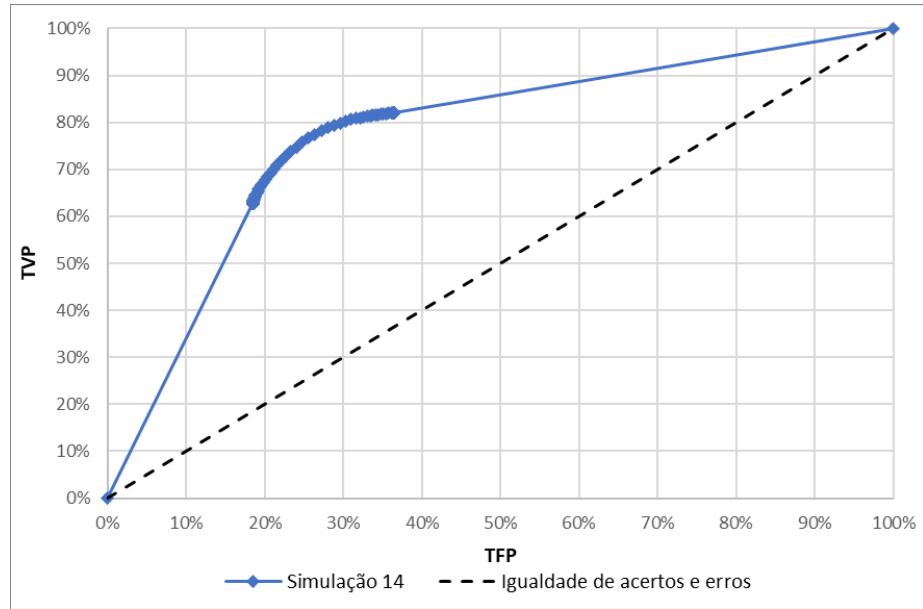


Figura 14 - Curva ROC simulação 14.

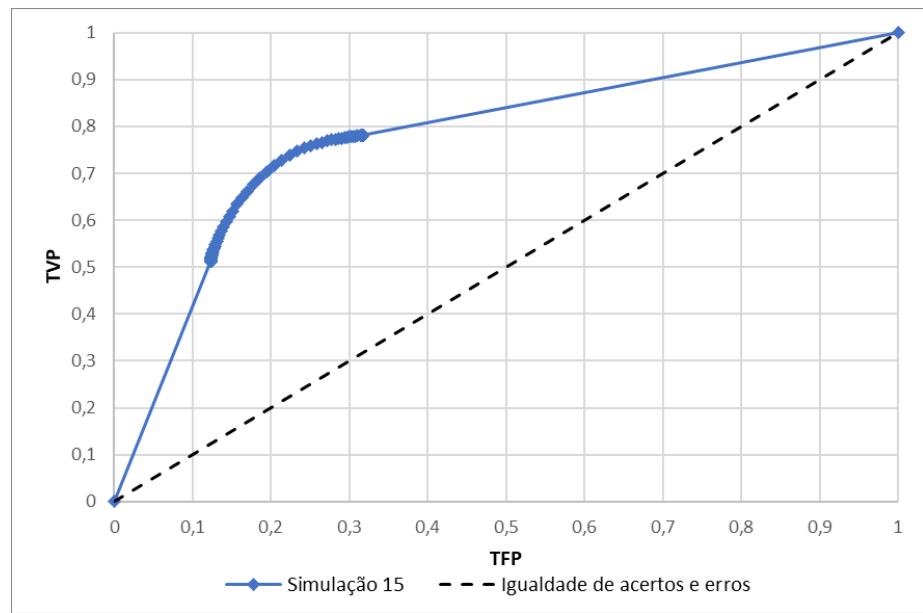


Figura 15 - Curva ROC simulação 15.

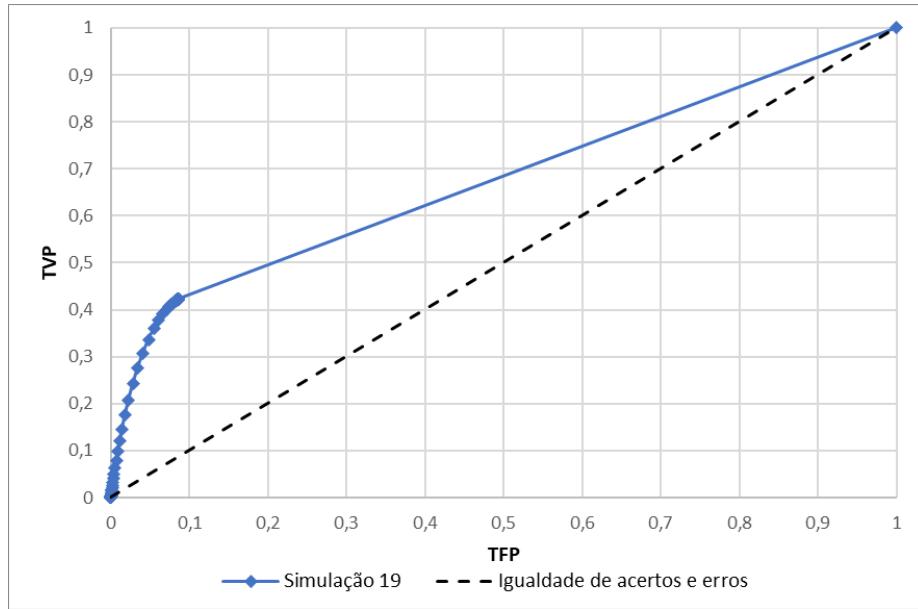


Figura 19 - Curva ROC simulação 19.

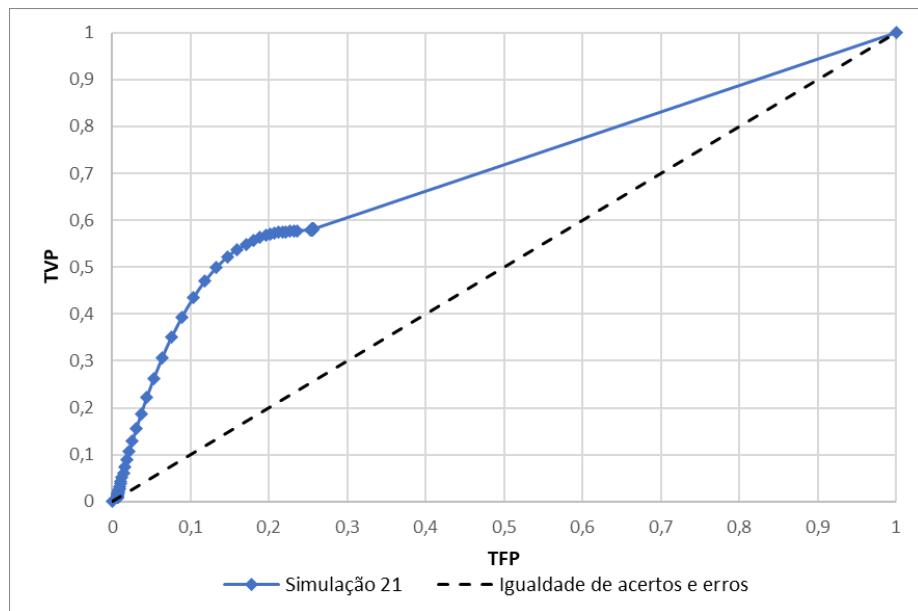


Figura 21 - Curva ROC simulação 21.

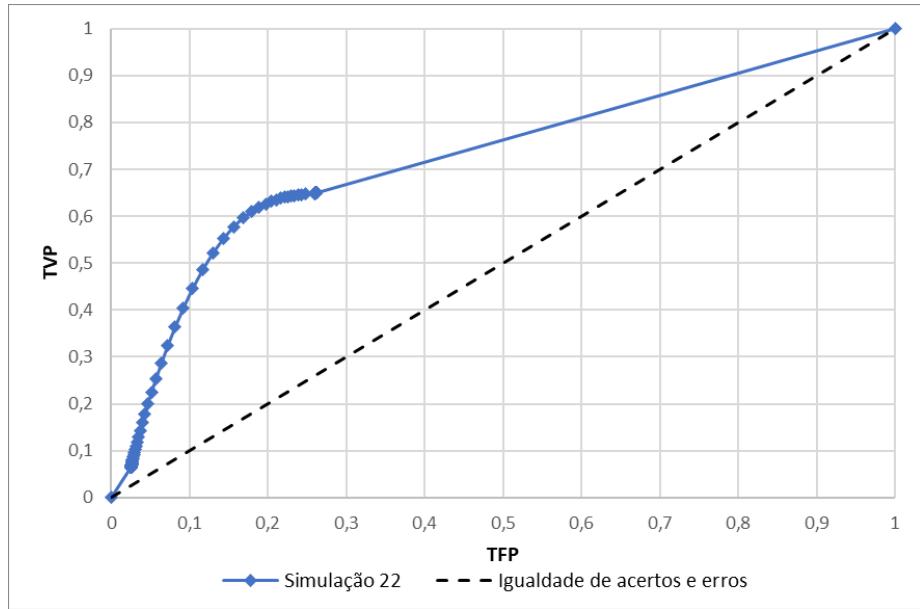


Figura 22 - Curva *ROC* simulação 22.

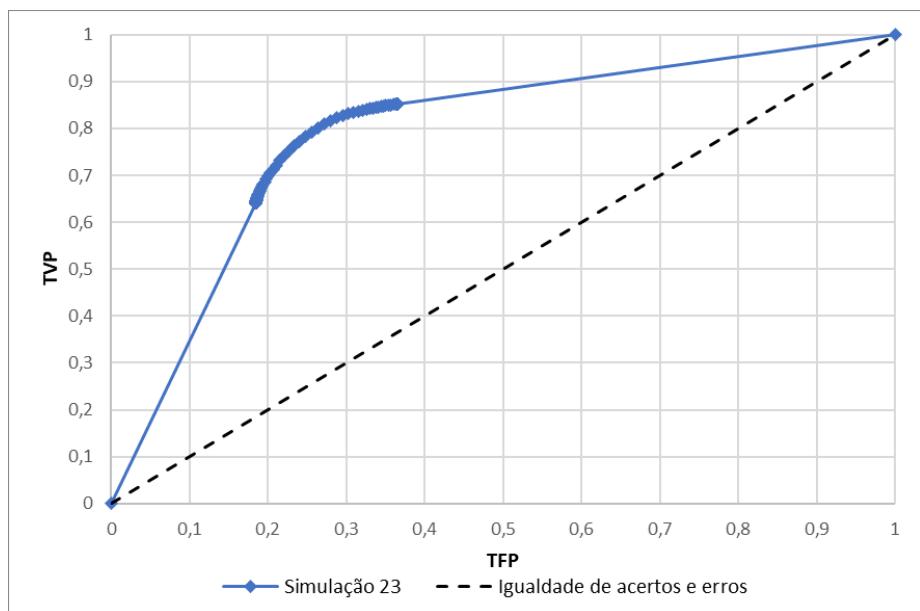


Figura 23 - Curva *ROC* simulação 23.

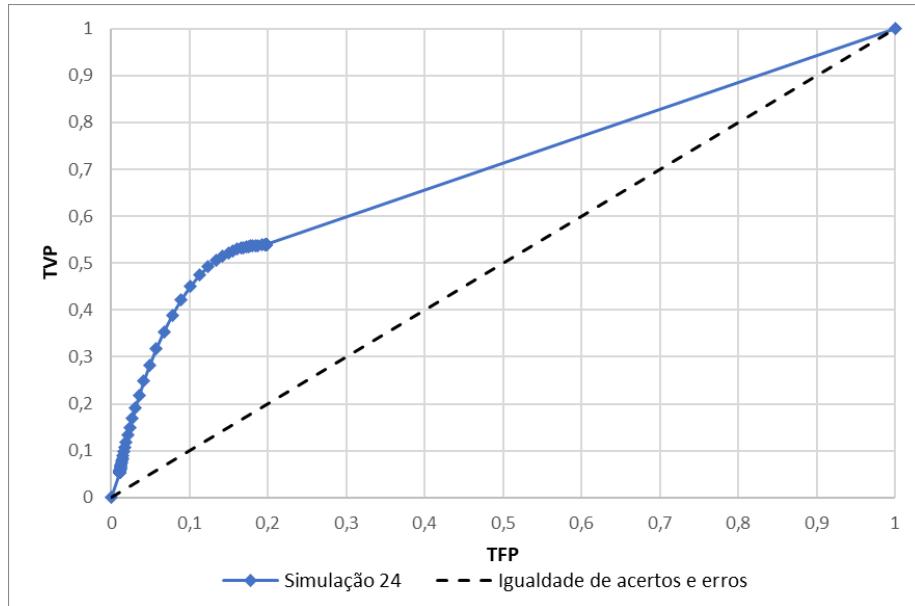


Figura 24 - Curva ROC simulação 24.

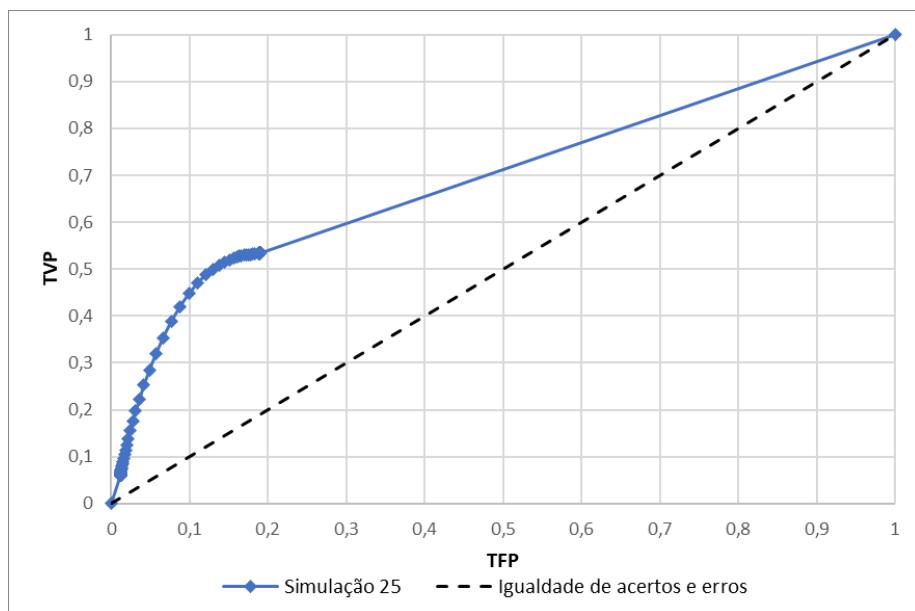


Figura 25 - Curva ROC simulação 25.

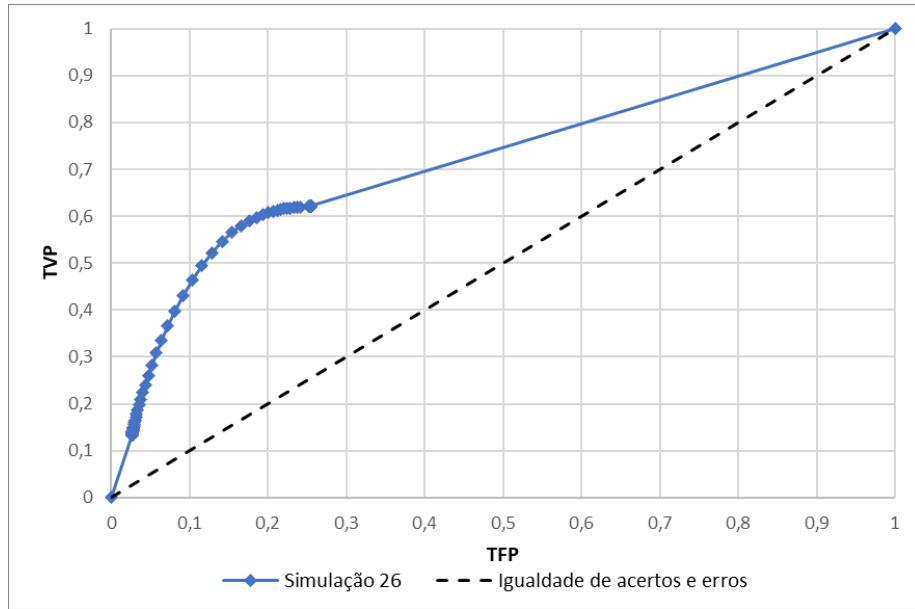


Figura 26 - Curva ROC simulação 26.

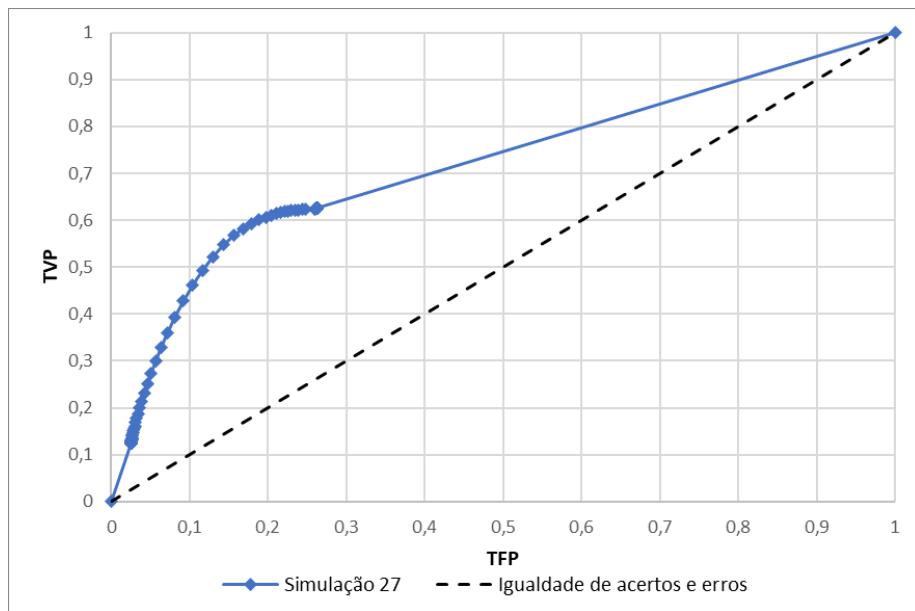


Figura 27 - Curva ROC simulação 27.

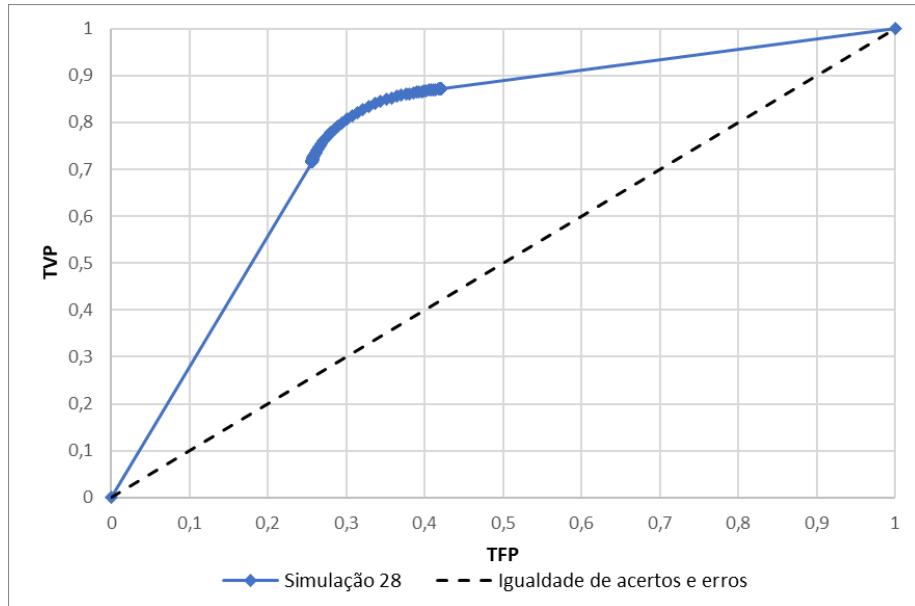


Figura 28 - Curva ROC simulação 28.

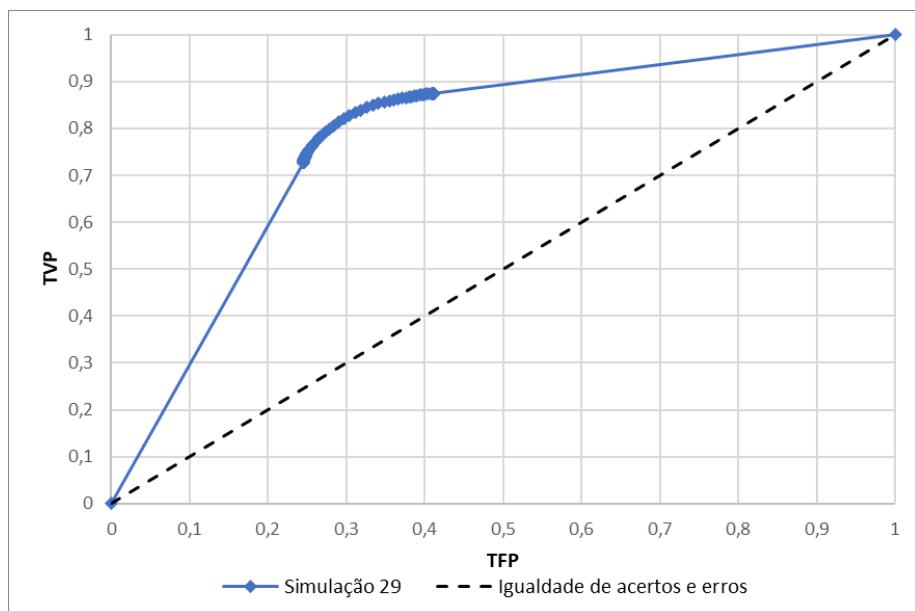


Figura 29 - Curva ROC simulação 29.

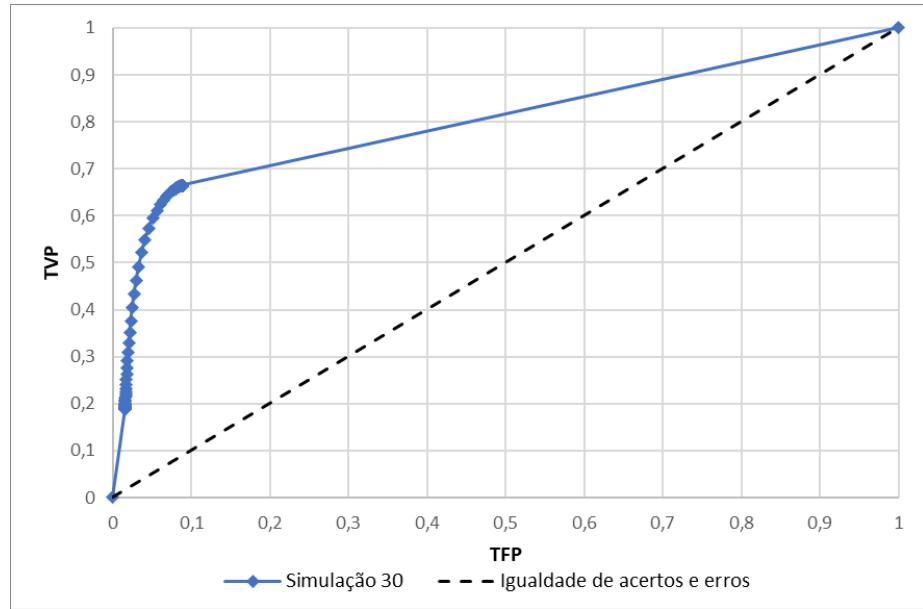


Figura 30 - Curva ROC simulação 30.

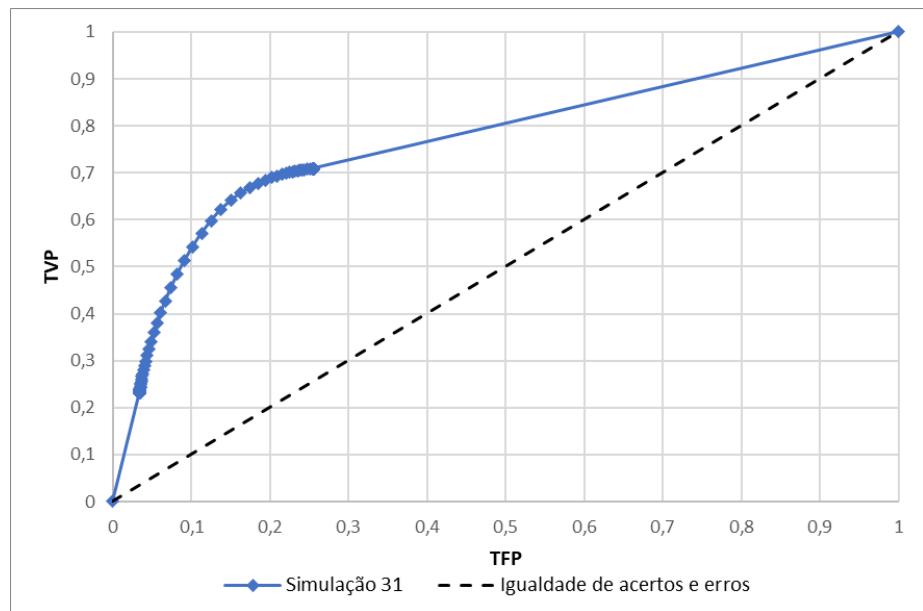


Figura 31 - Curva ROC simulação 31.

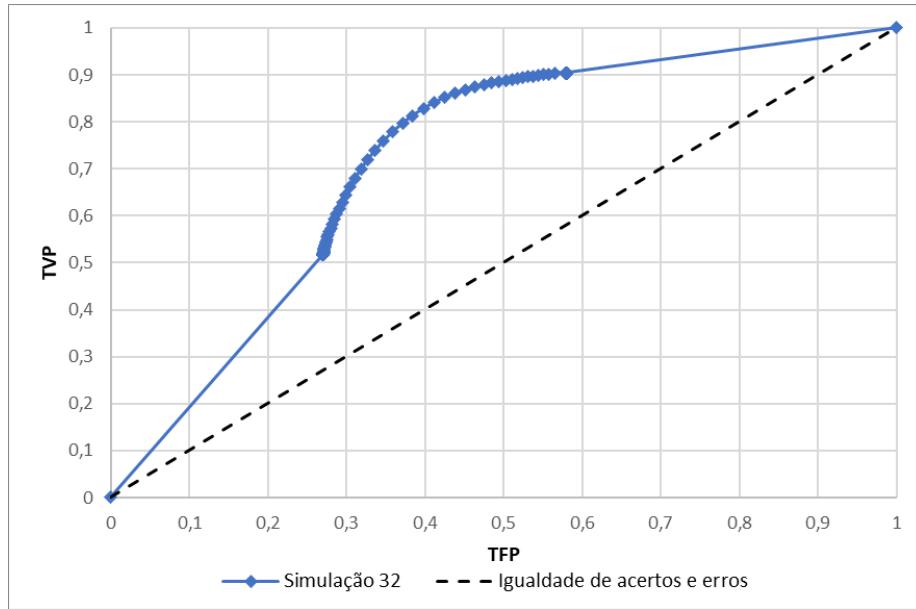


Figura 32 - Curva ROC simulação 32.

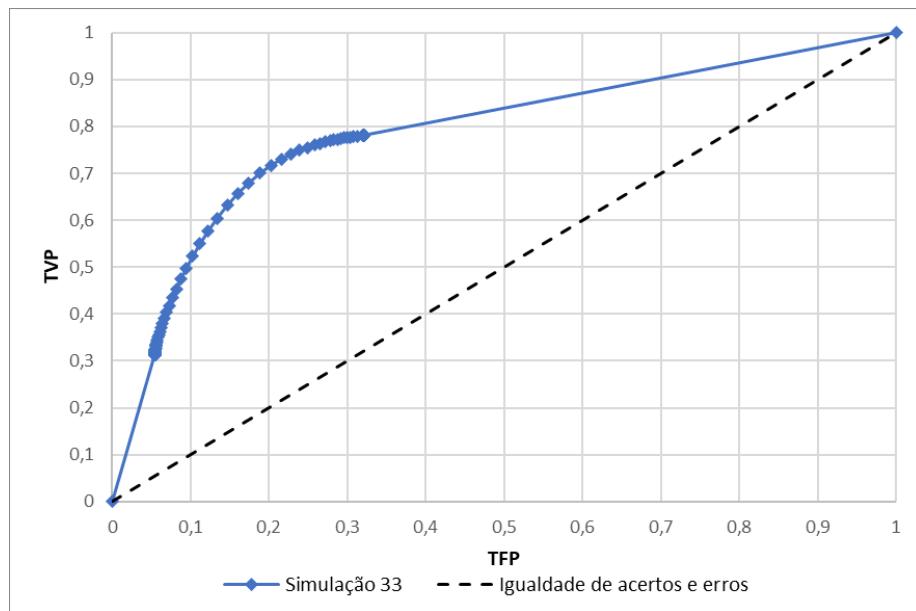


Figura 33 - Curva ROC simulação 33.

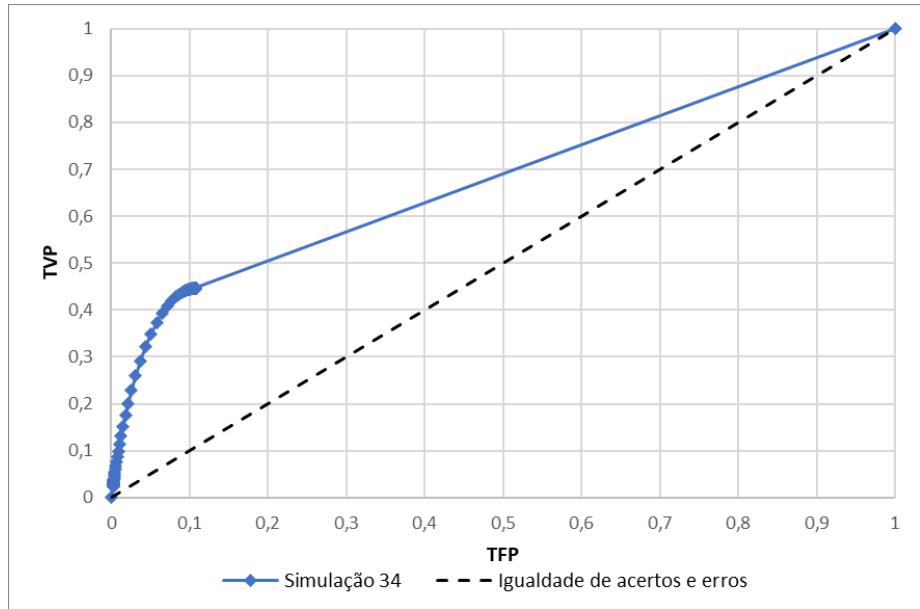


Figura 34 - Curva *ROC* simulação 34.

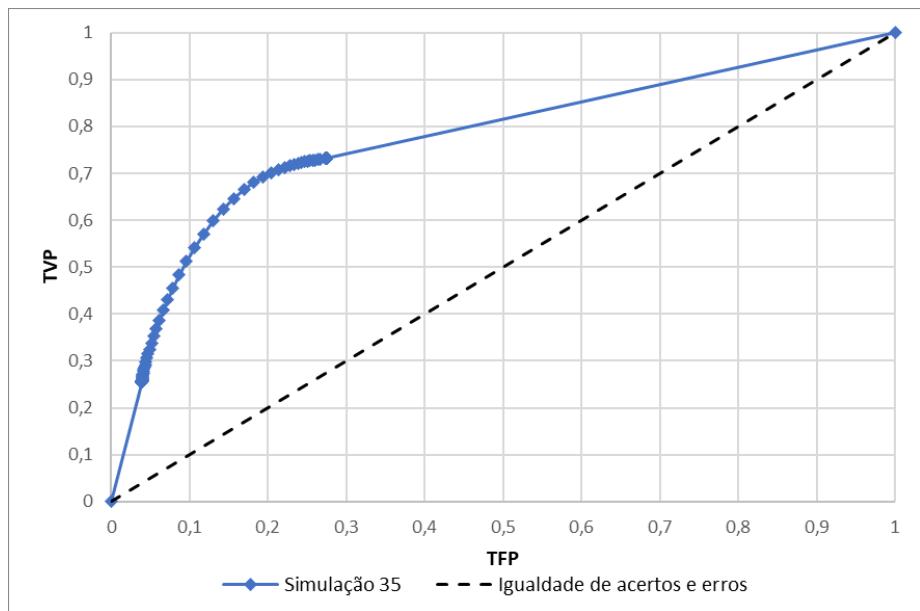


Figura 35 - Curva *ROC* simulação 35.

APÊNDICE C

MAPAS DE ESTABILIDADE

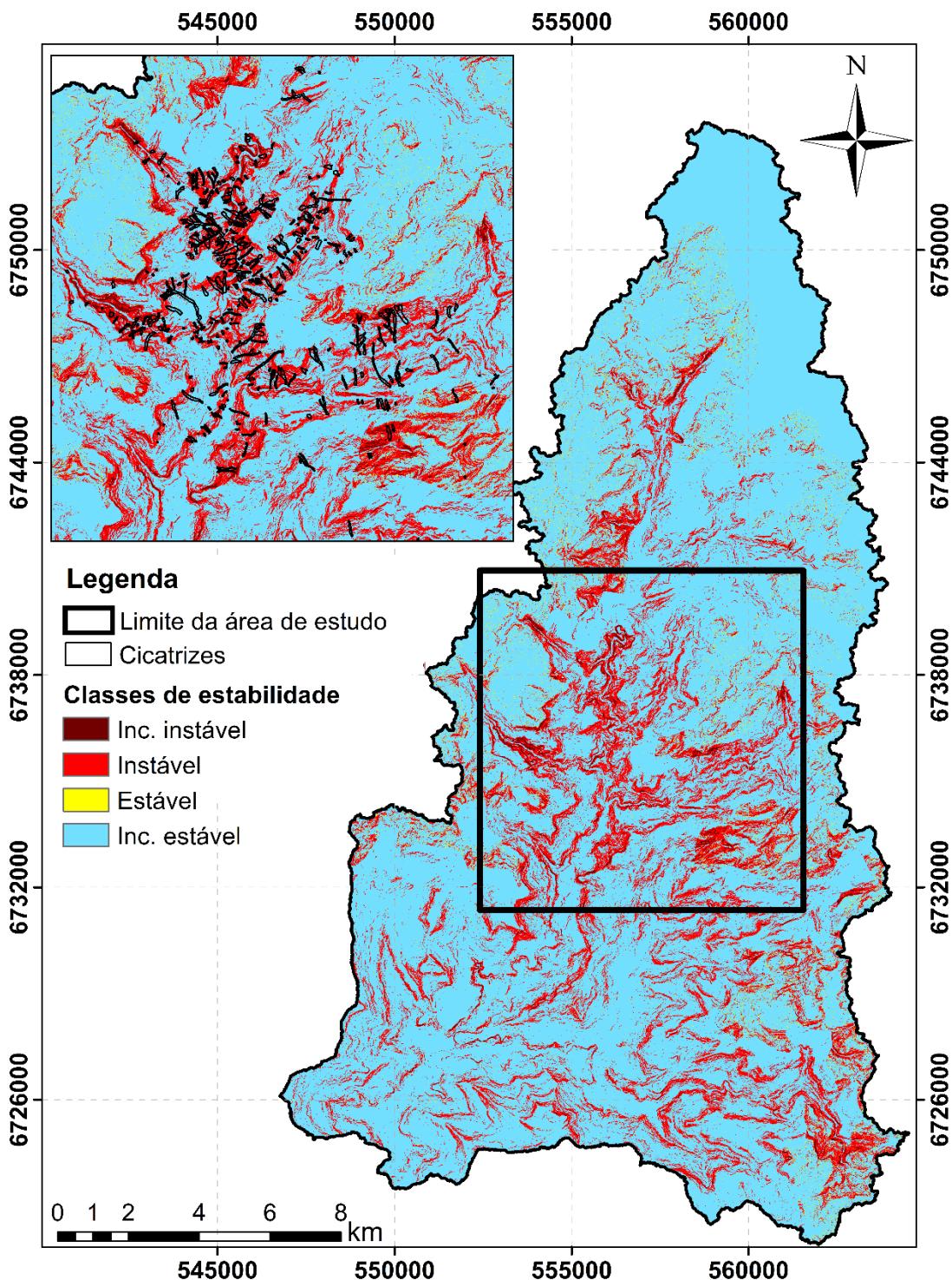


Figura 1 - Mapa de estabilidade simulação 1.

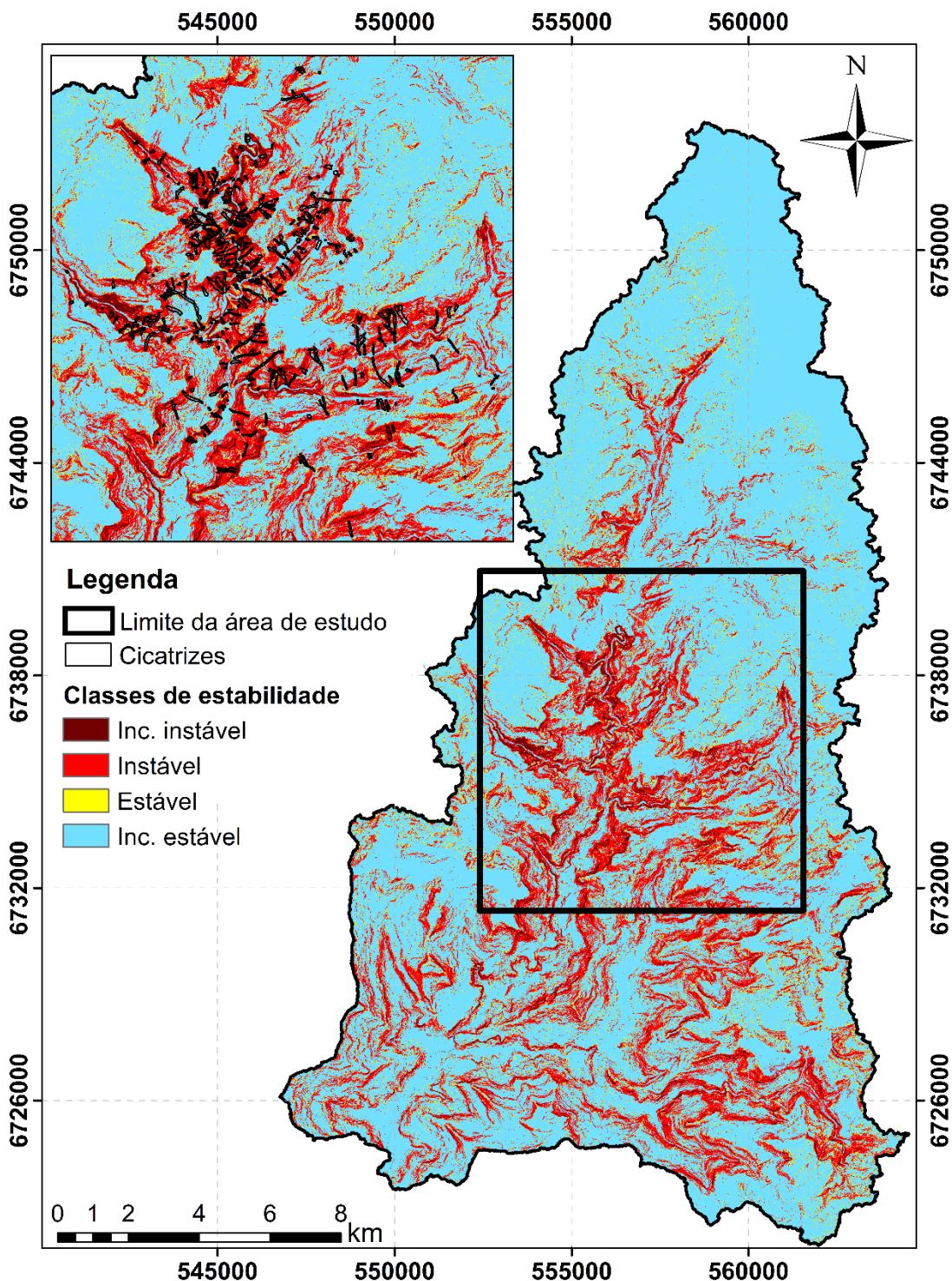


Figura 2 - Mapa de estabilidade simulação 2.

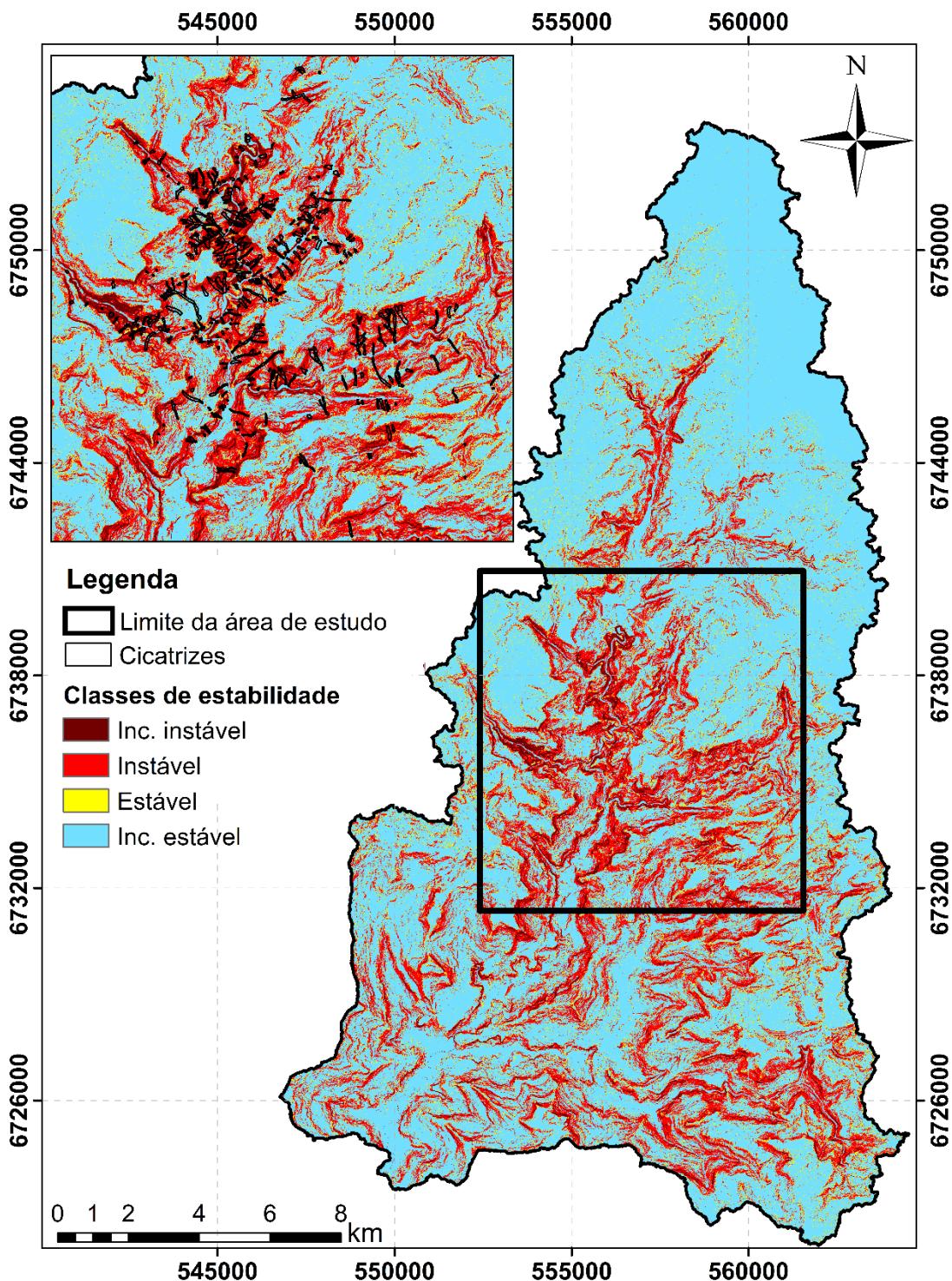


Figura 3 - Mapa de estabilidade simulação 3.

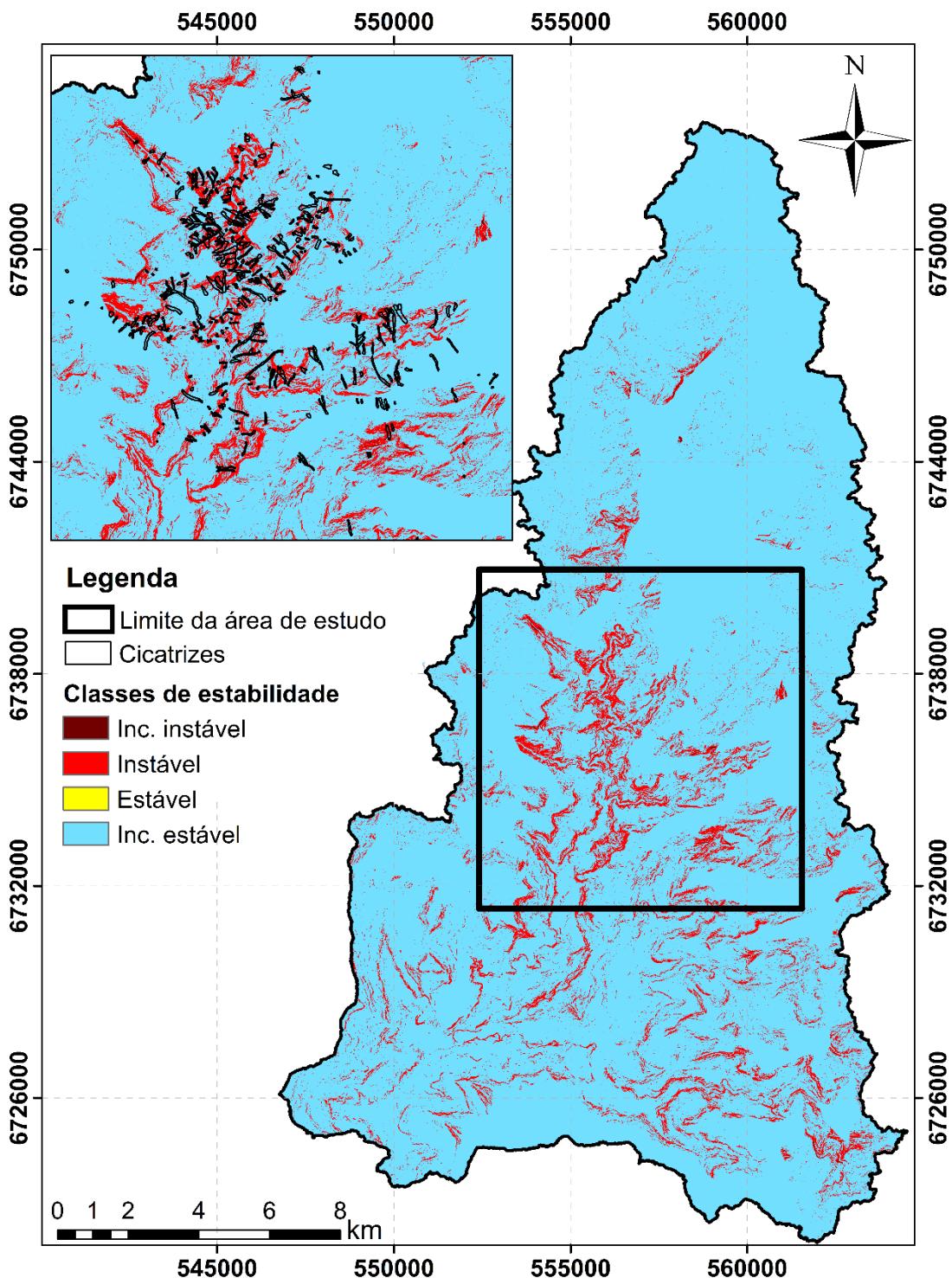


Figura 4 - Mapa de estabilidade simulação 4.

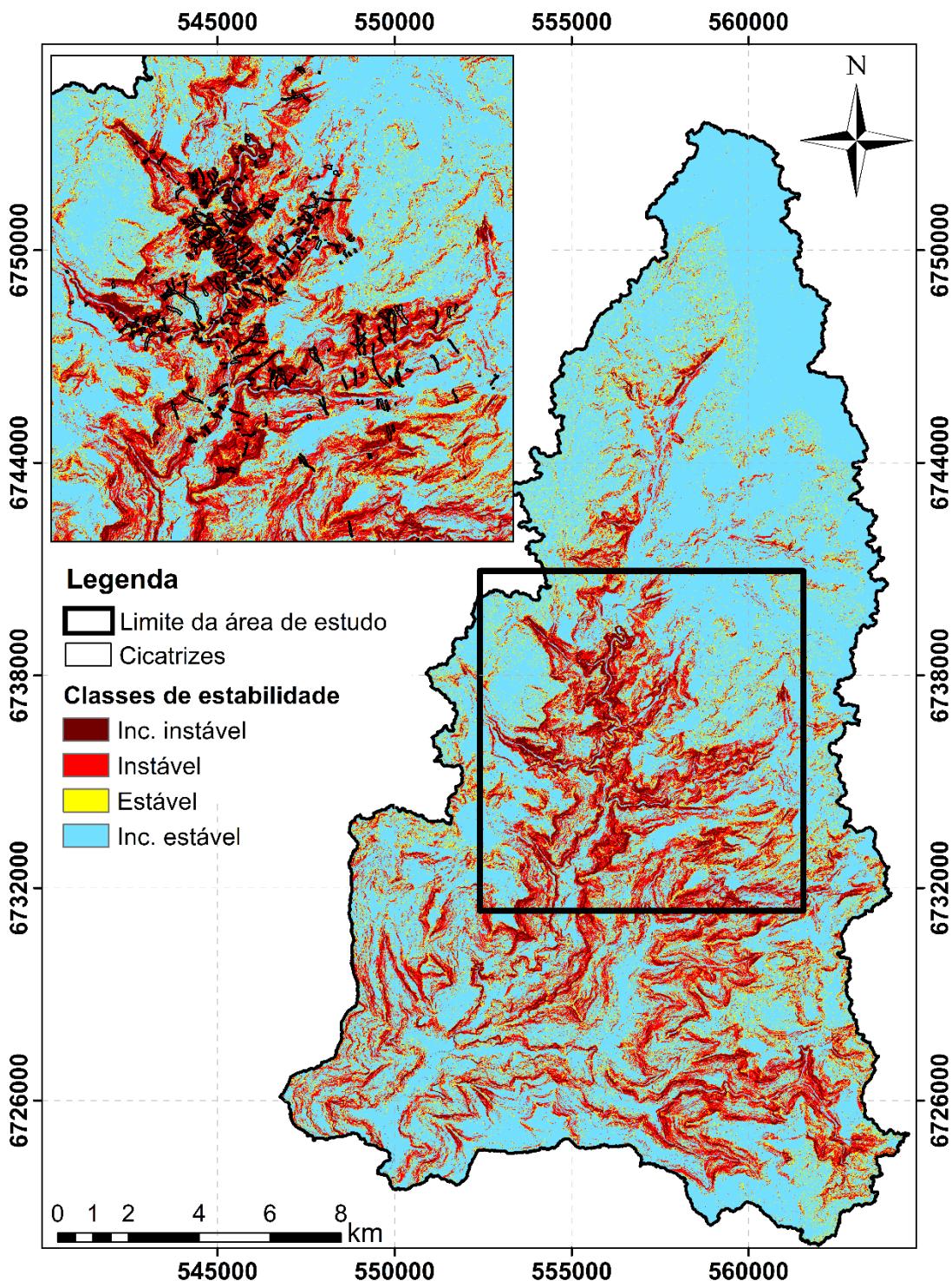


Figura 7 - Mapa de estabilidade simulação 7.

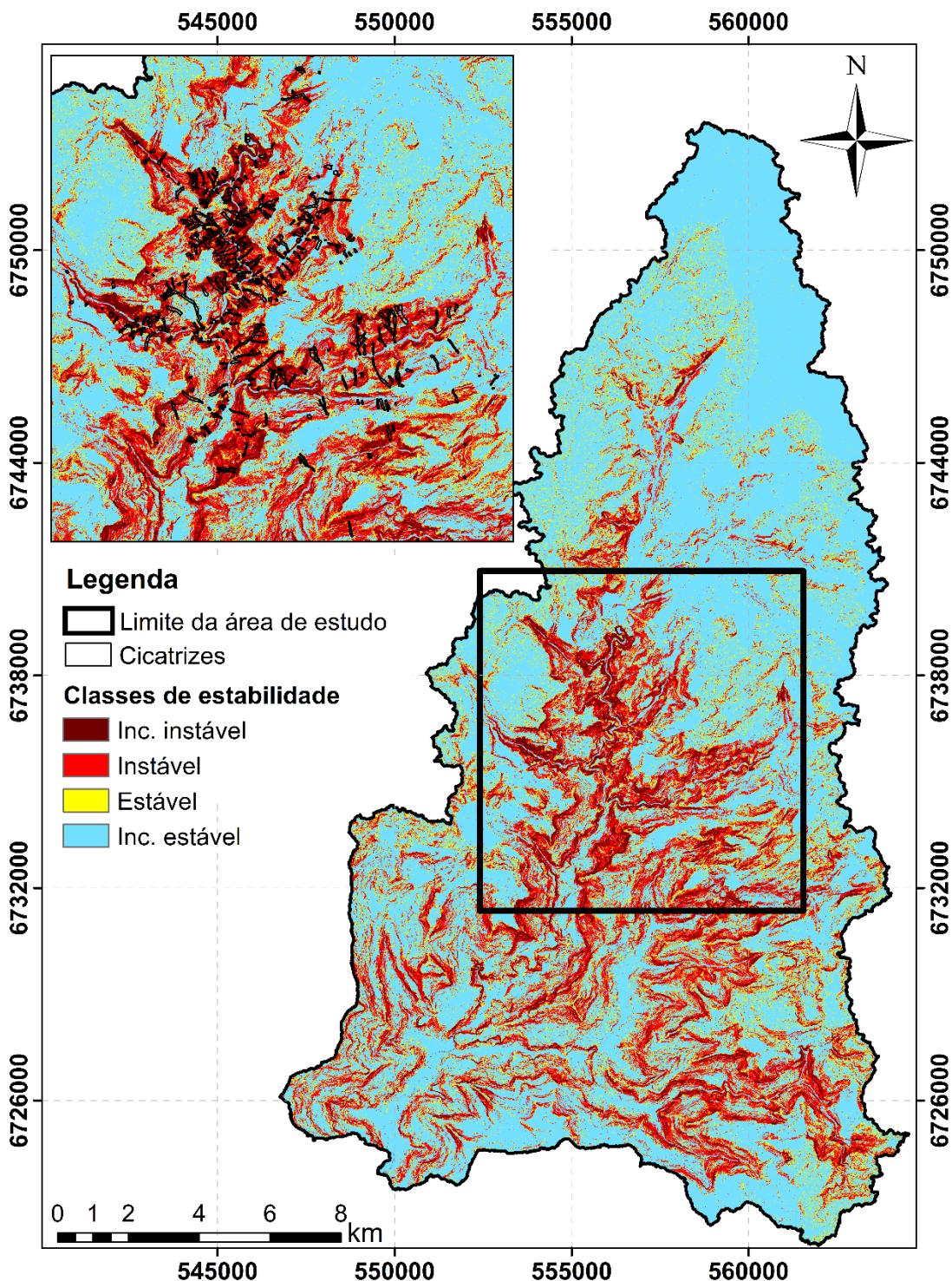


Figura 8 - Mapa de estabilidade simulação 8.

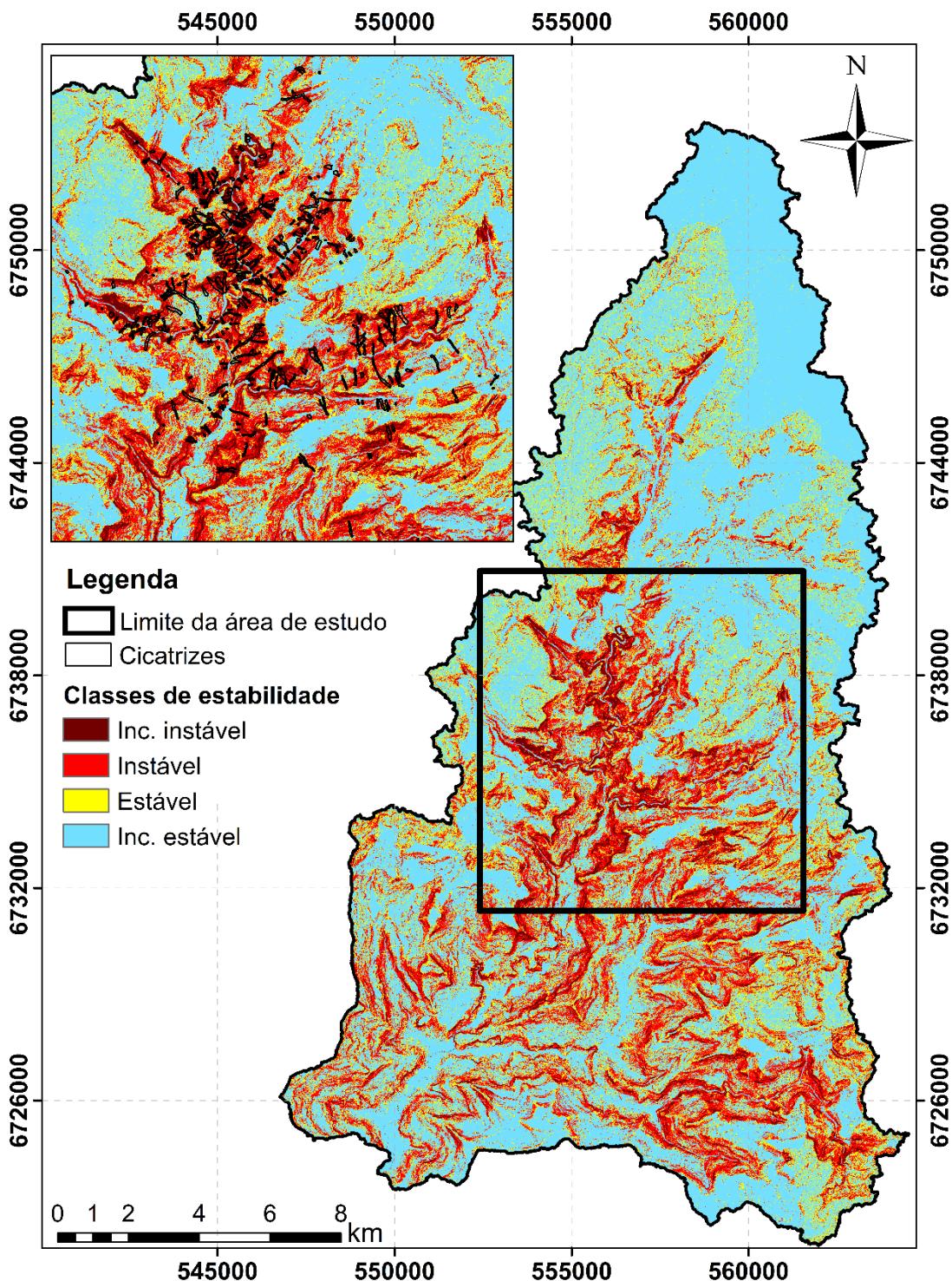


Figura 9 - Mapa de estabilidade simulação 9.

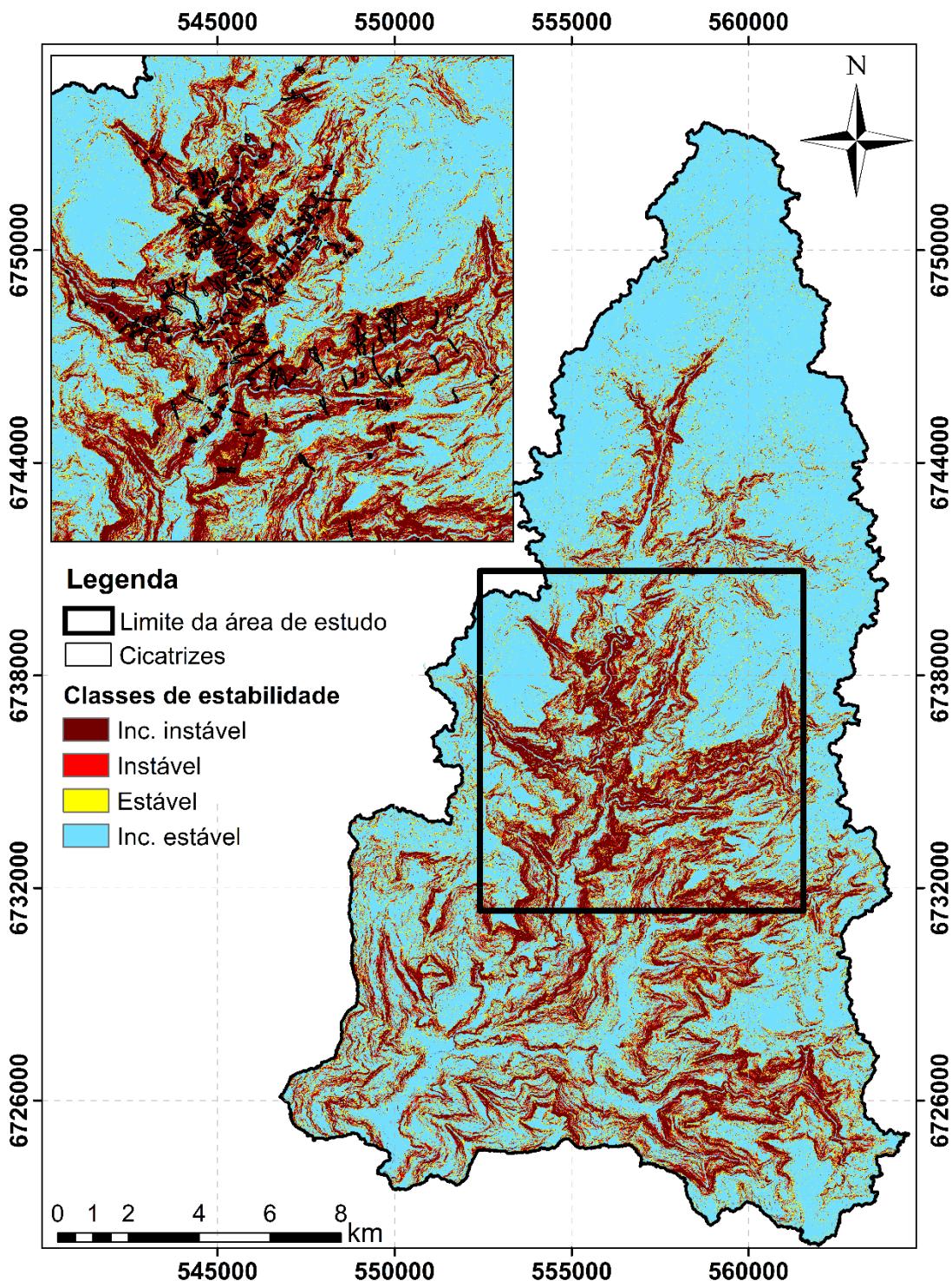


Figura 13 - Mapa de estabilidade simulação 13.

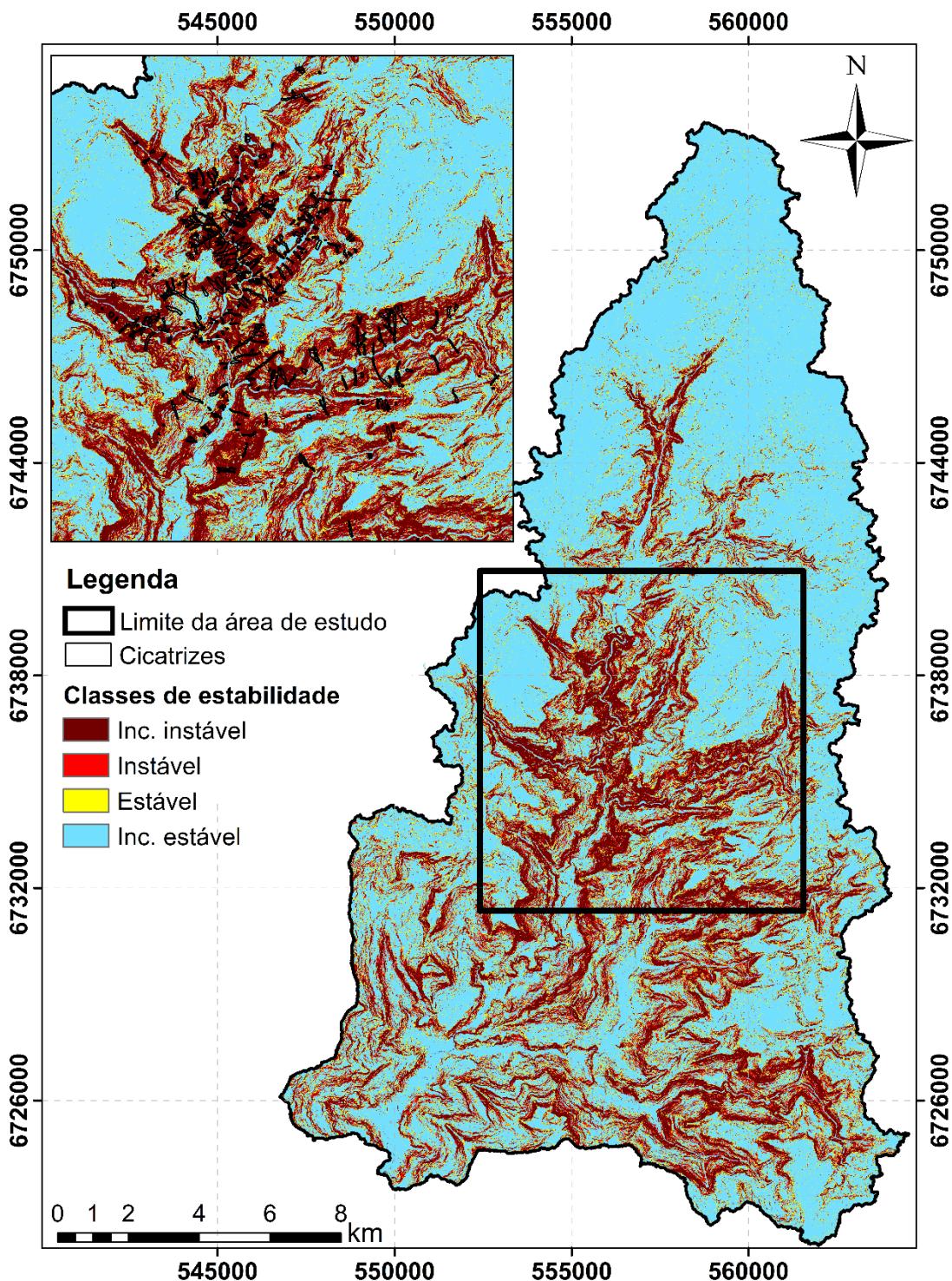


Figura 14 - Mapa de estabilidade simulação 14.

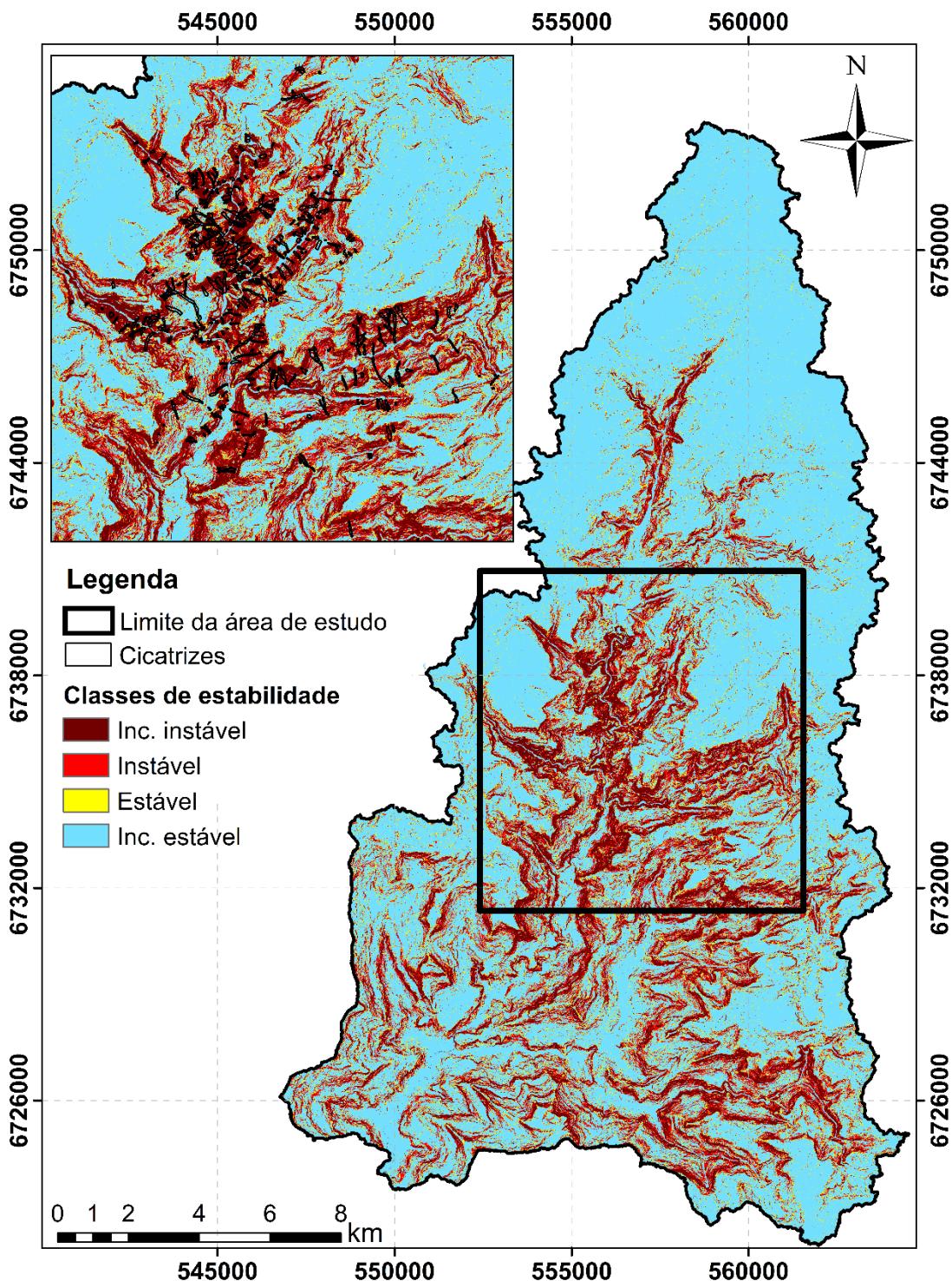


Figura 15 - Mapa de estabilidade simulação 15.

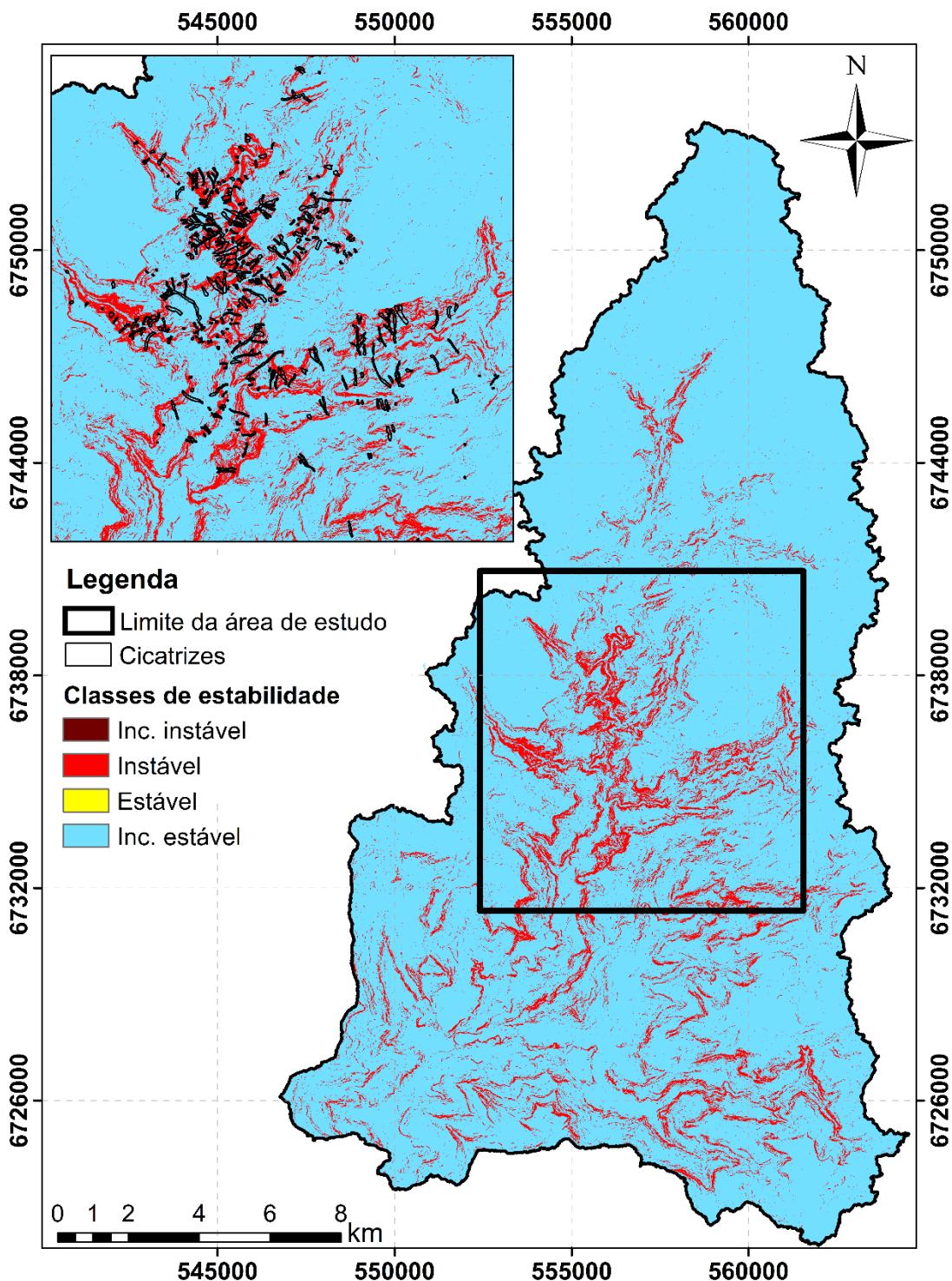


Figura 19 - Mapa de estabilidade simulação 19.

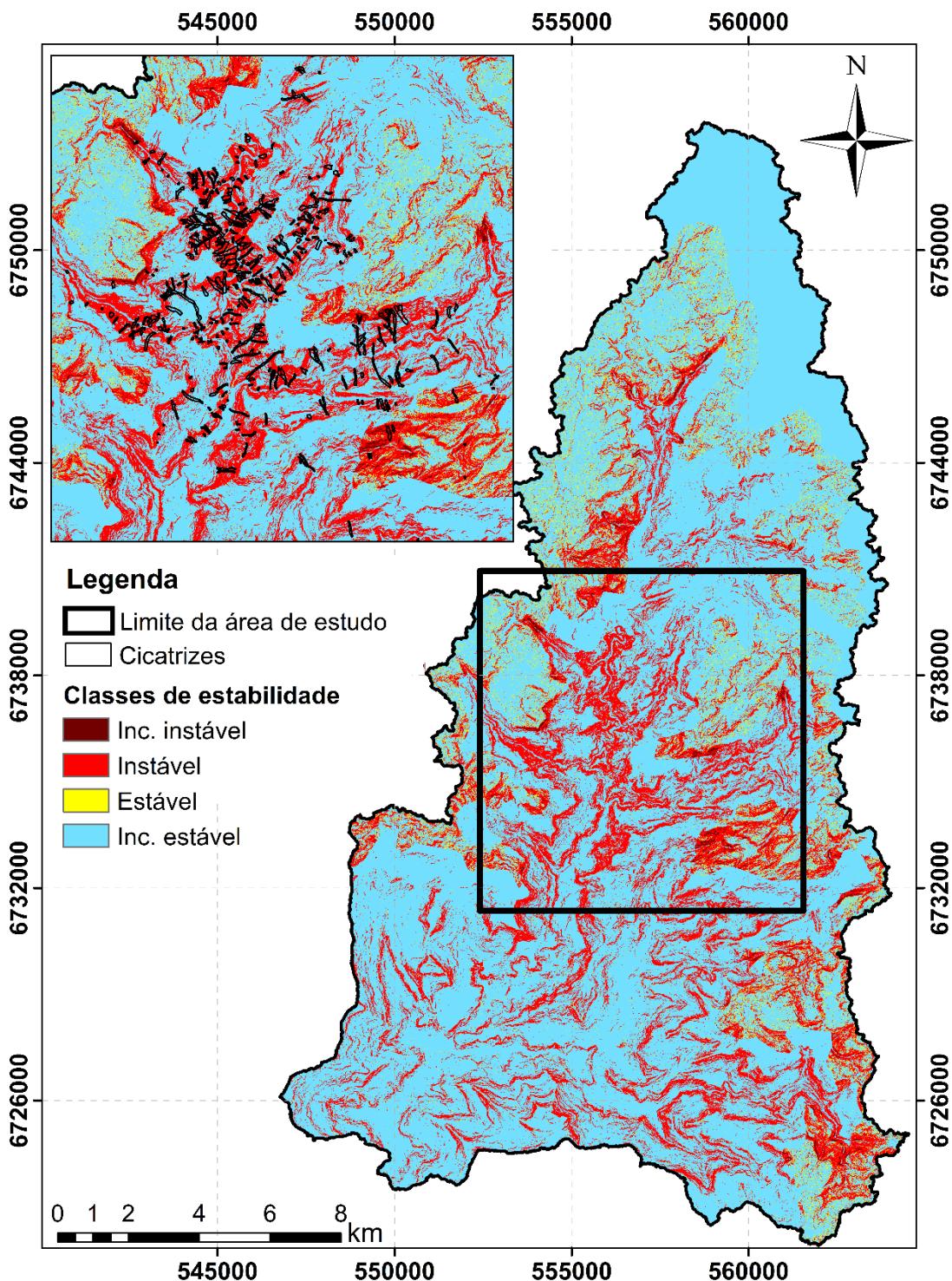


Figura 21 - Mapa de estabilidade simulação 21.

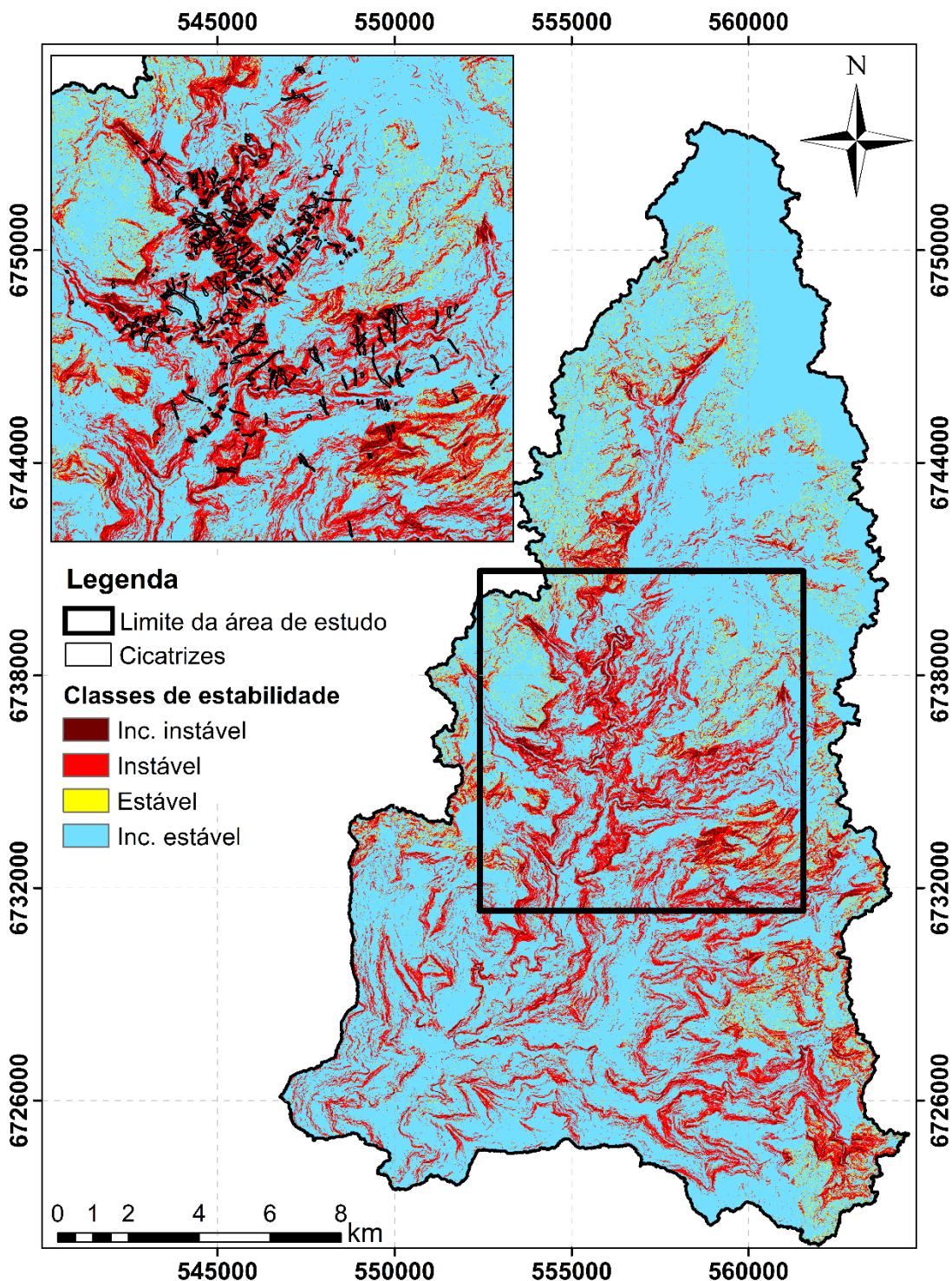


Figura 22 - Mapa de estabilidade simulação 22.

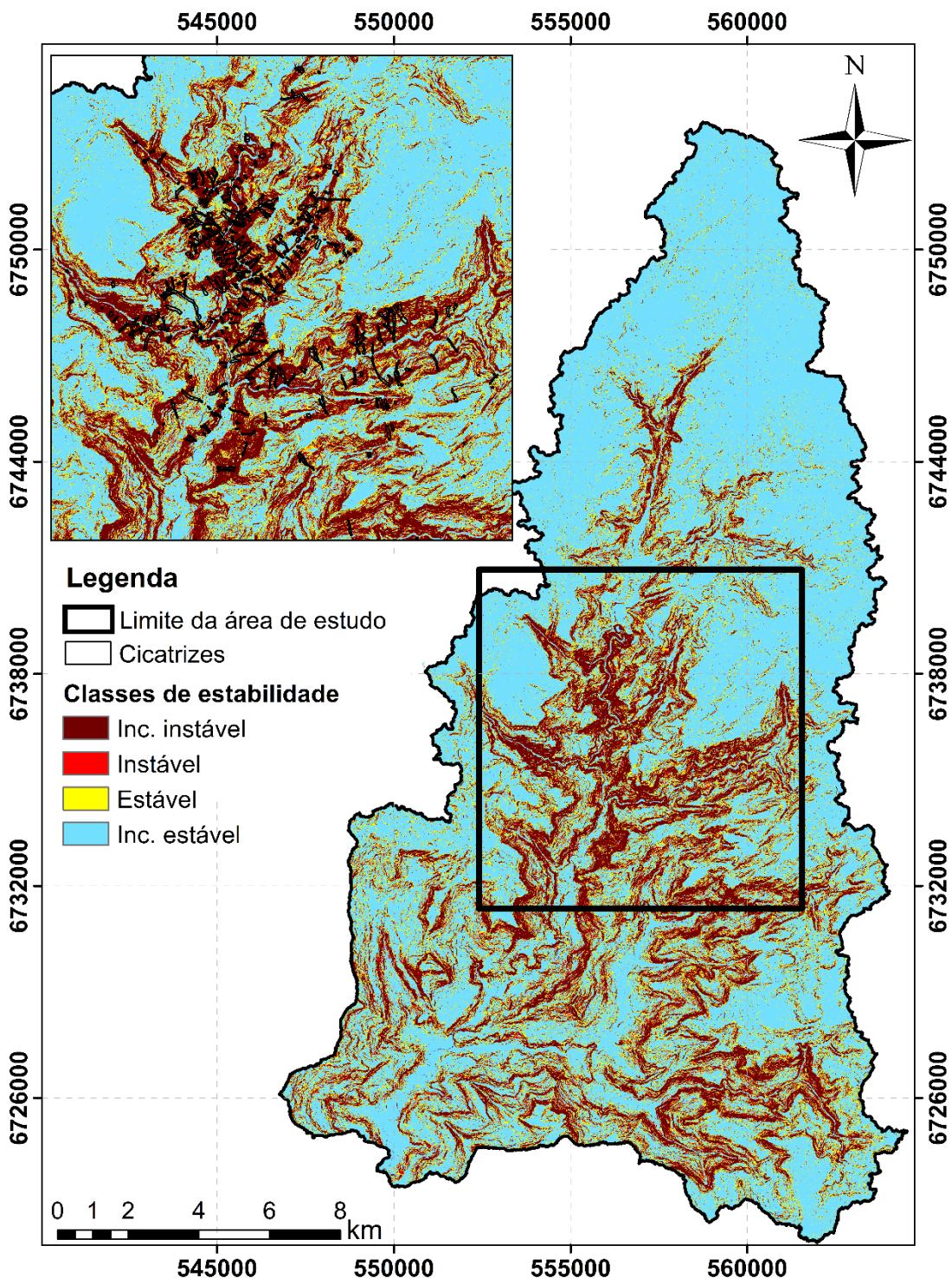


Figura 23 - Mapa de estabilidade simulação 23.

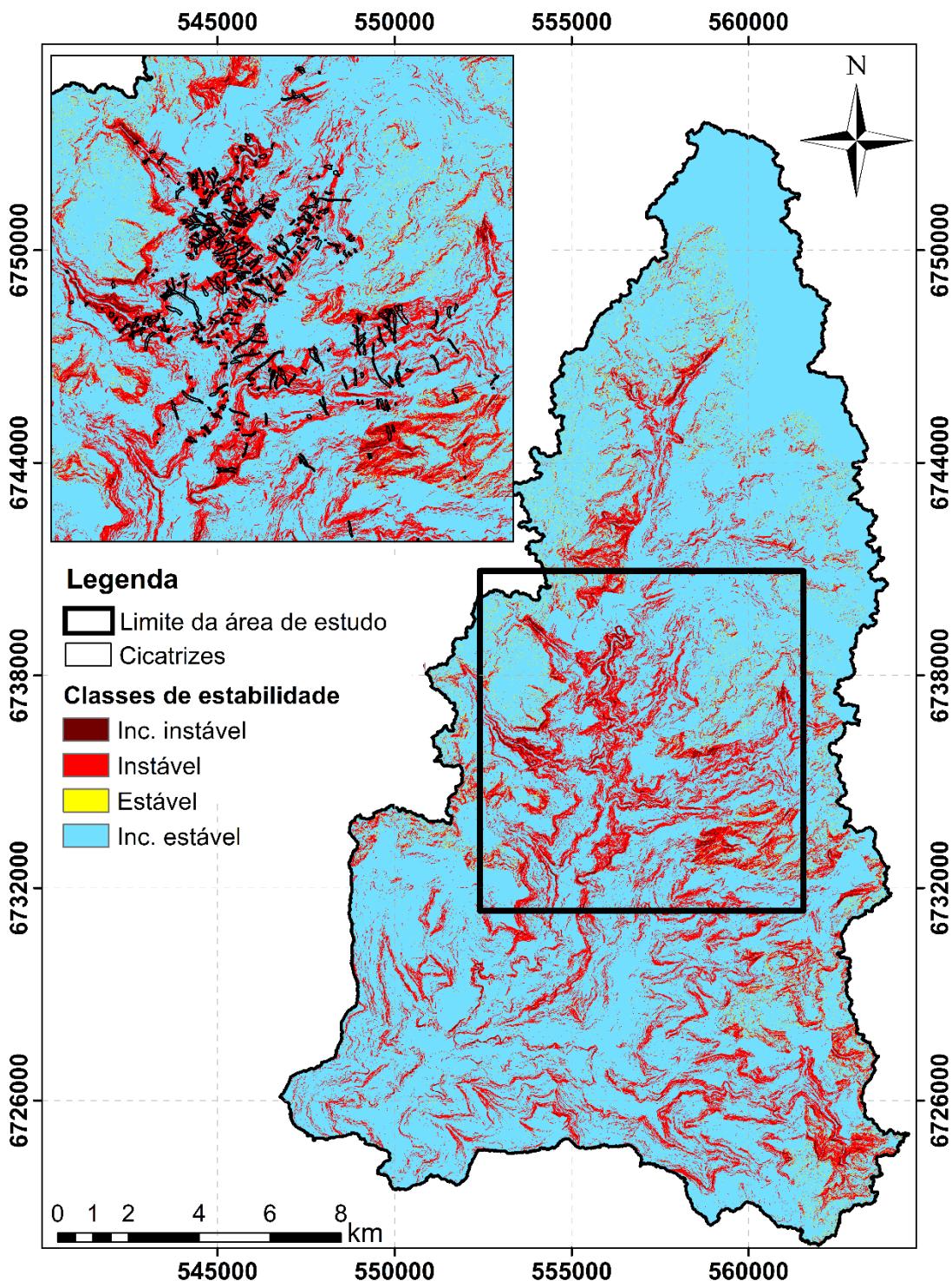


Figura 24 - Mapa de estabilidade simulação 24.

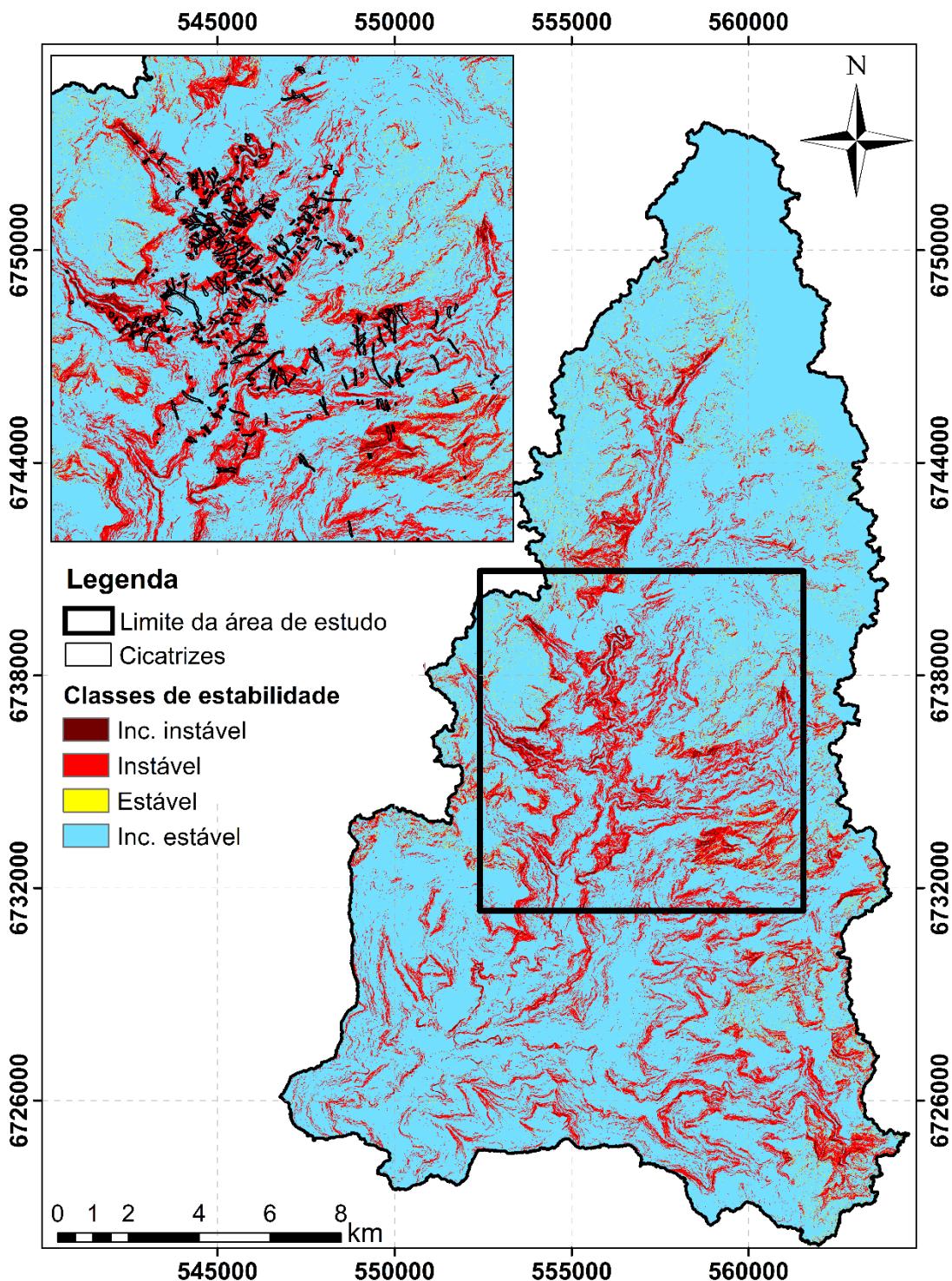


Figura 25 - Mapa de estabilidade simulação 25.

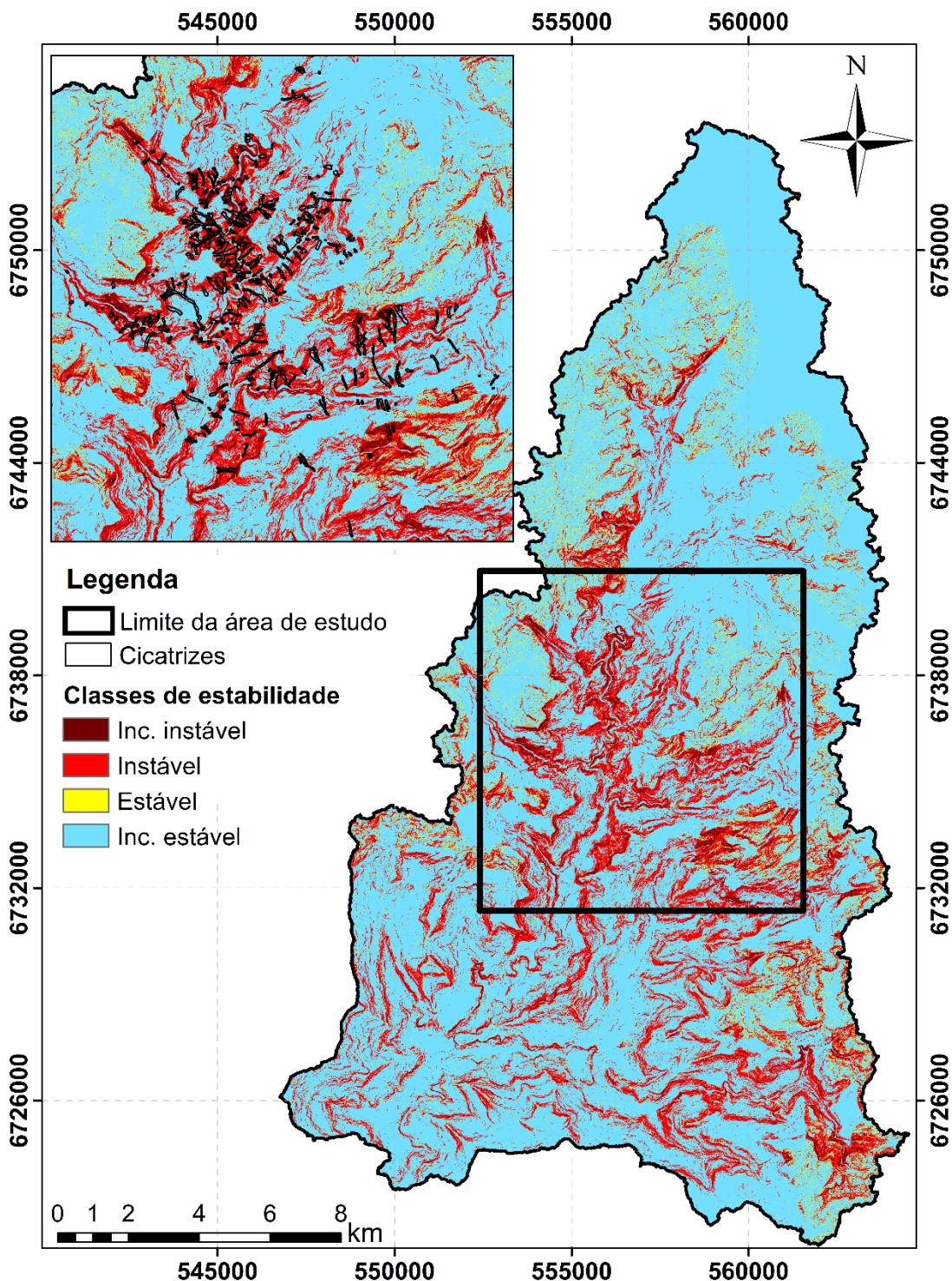


Figura 26 - Mapa de estabilidade simulação 26.

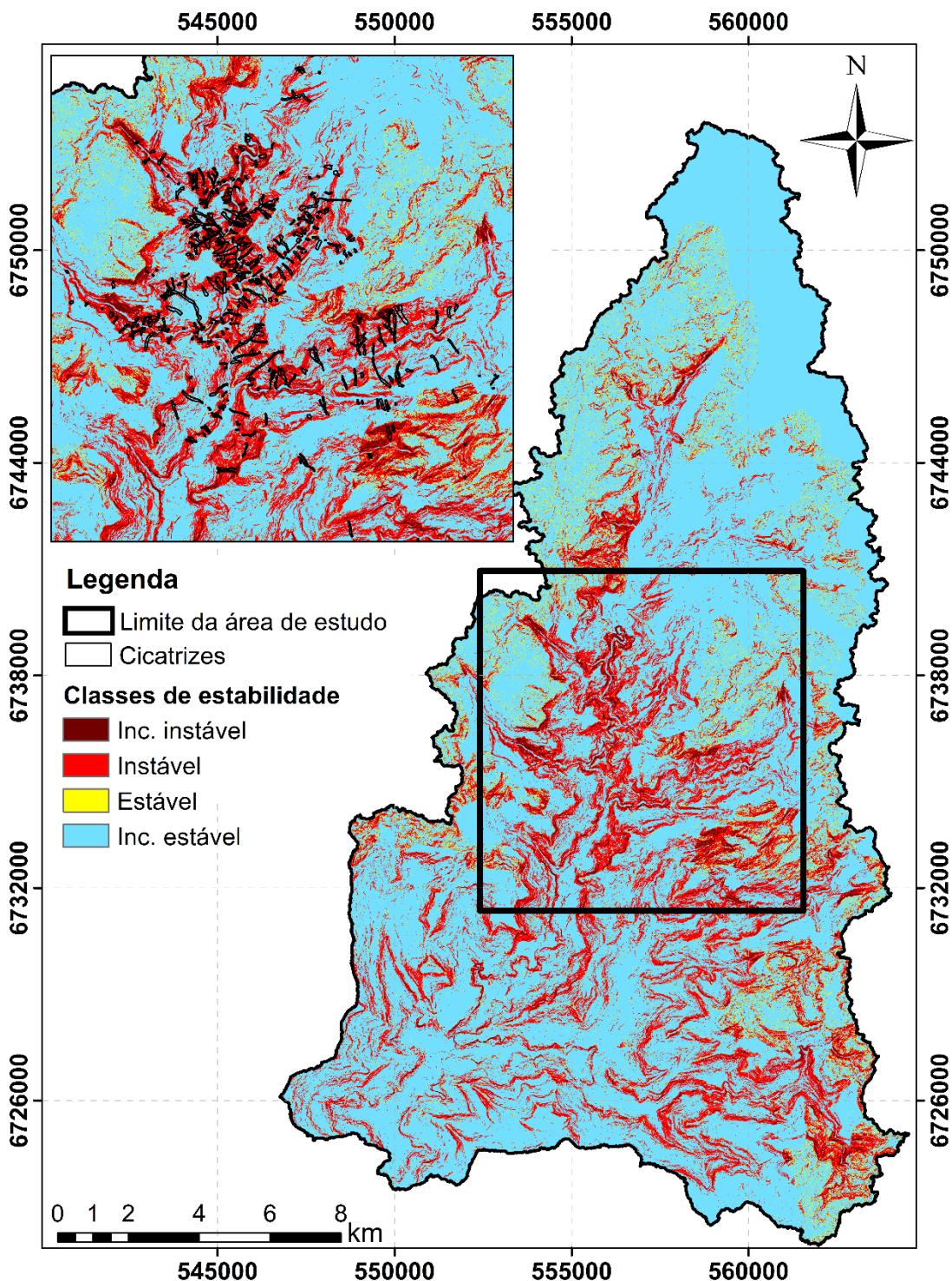


Figura 27 - Mapa de estabilidade simulação 27.

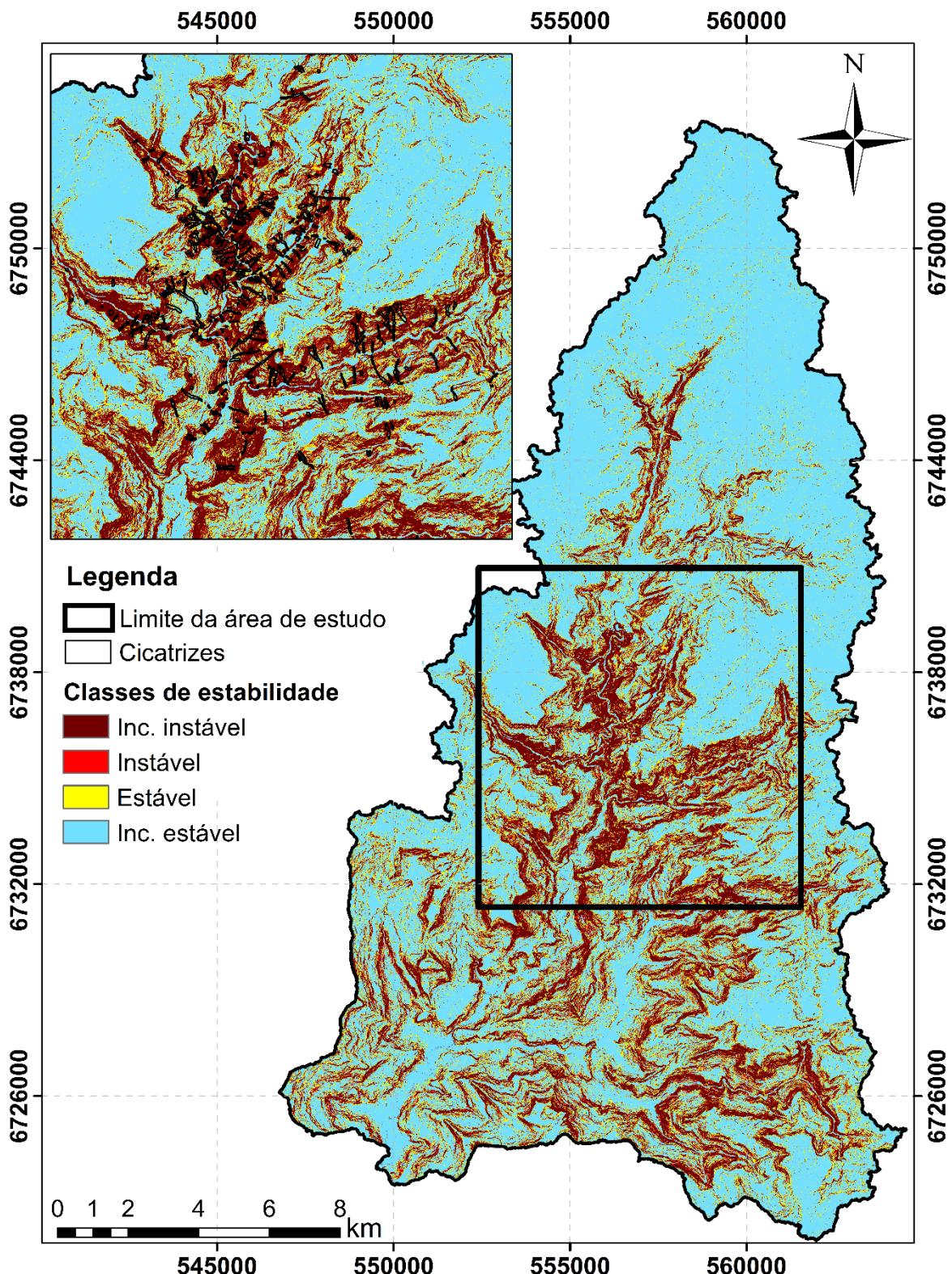


Figura 28 - Mapa de estabilidade simulação 28.

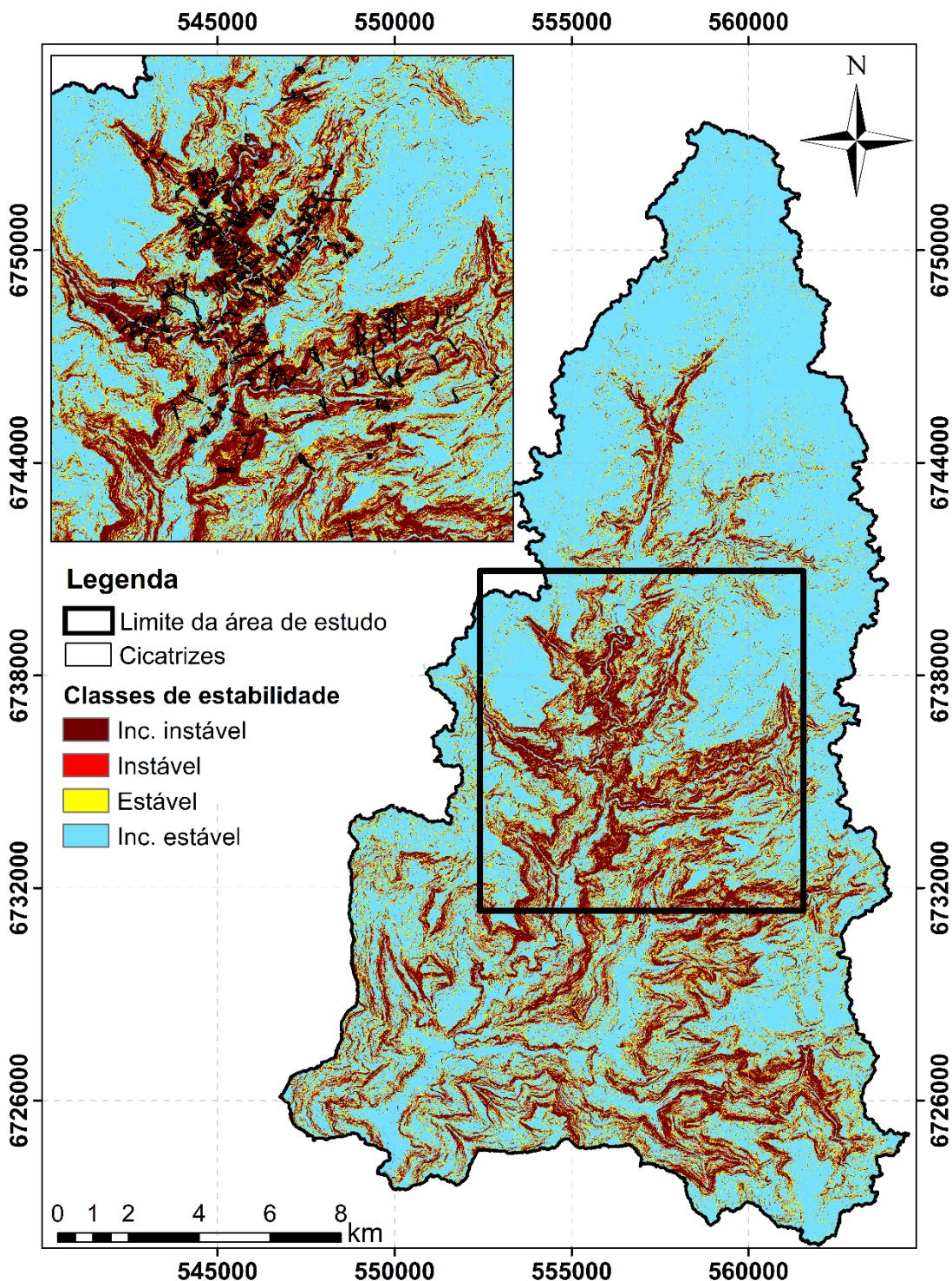


Figura 29 - Mapa de estabilidade simulação 29.

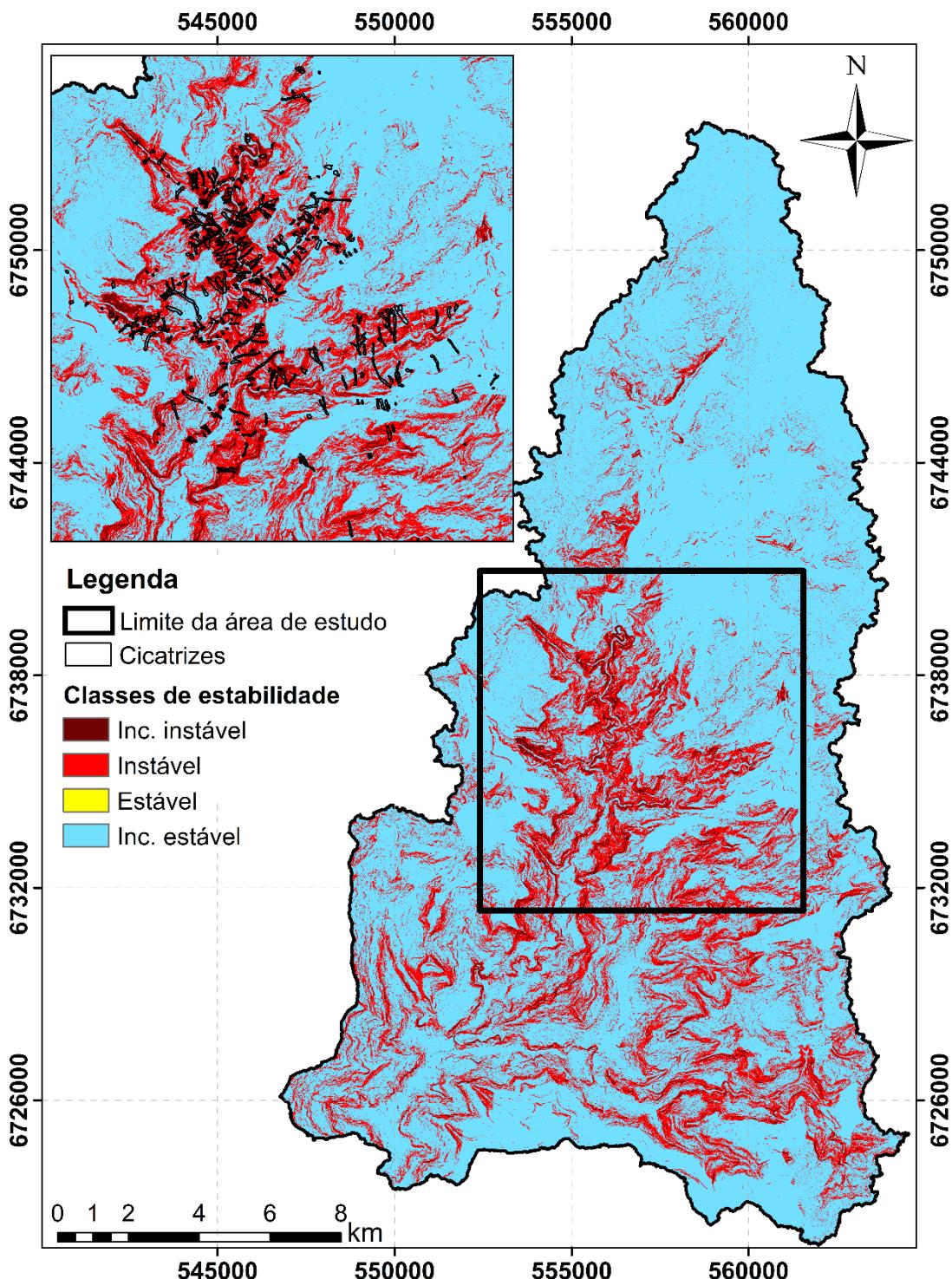


Figura 30 - Mapa de estabilidade simulação 30.

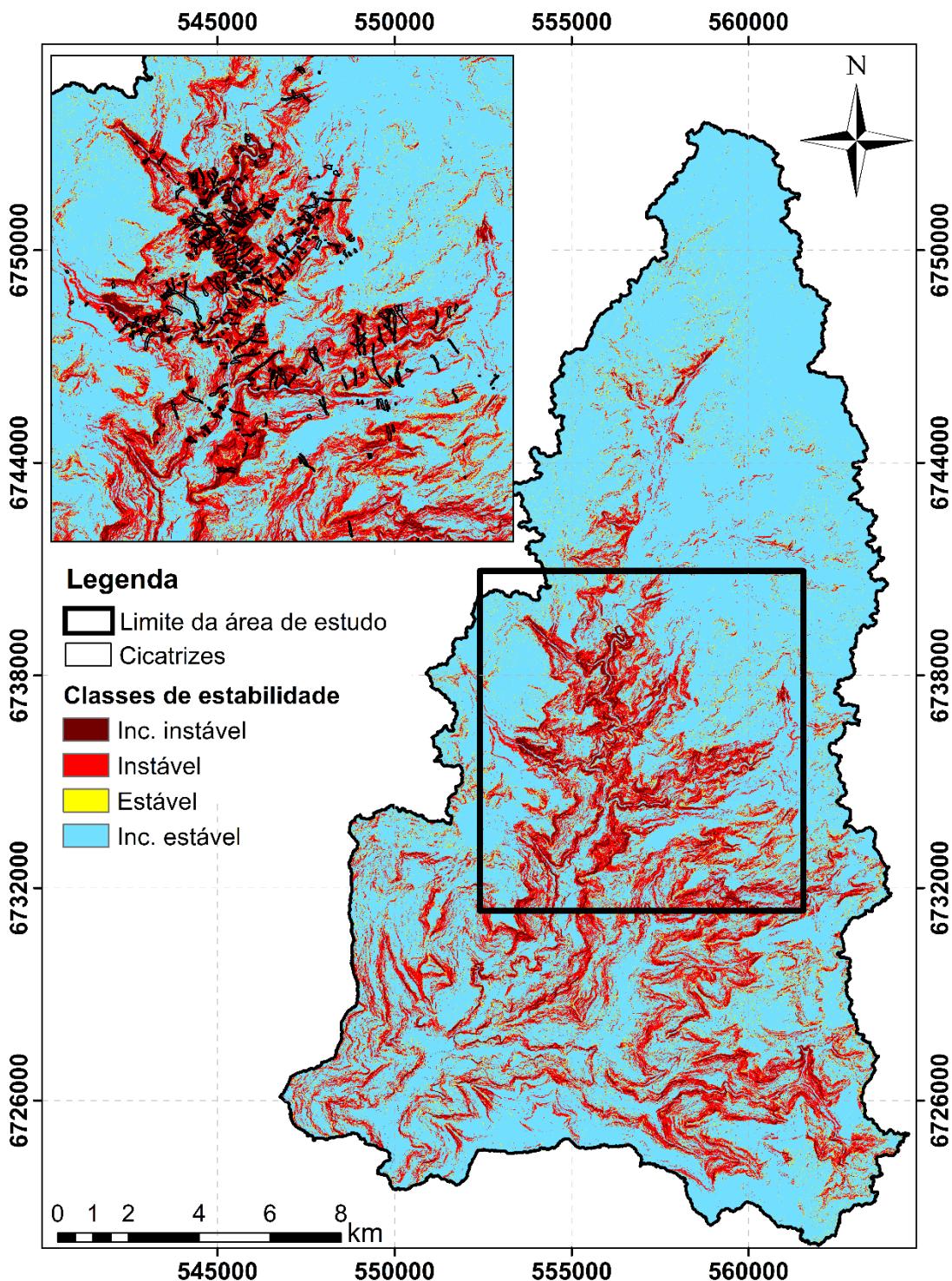


Figura 31 - Mapa de estabilidade simulação 31.

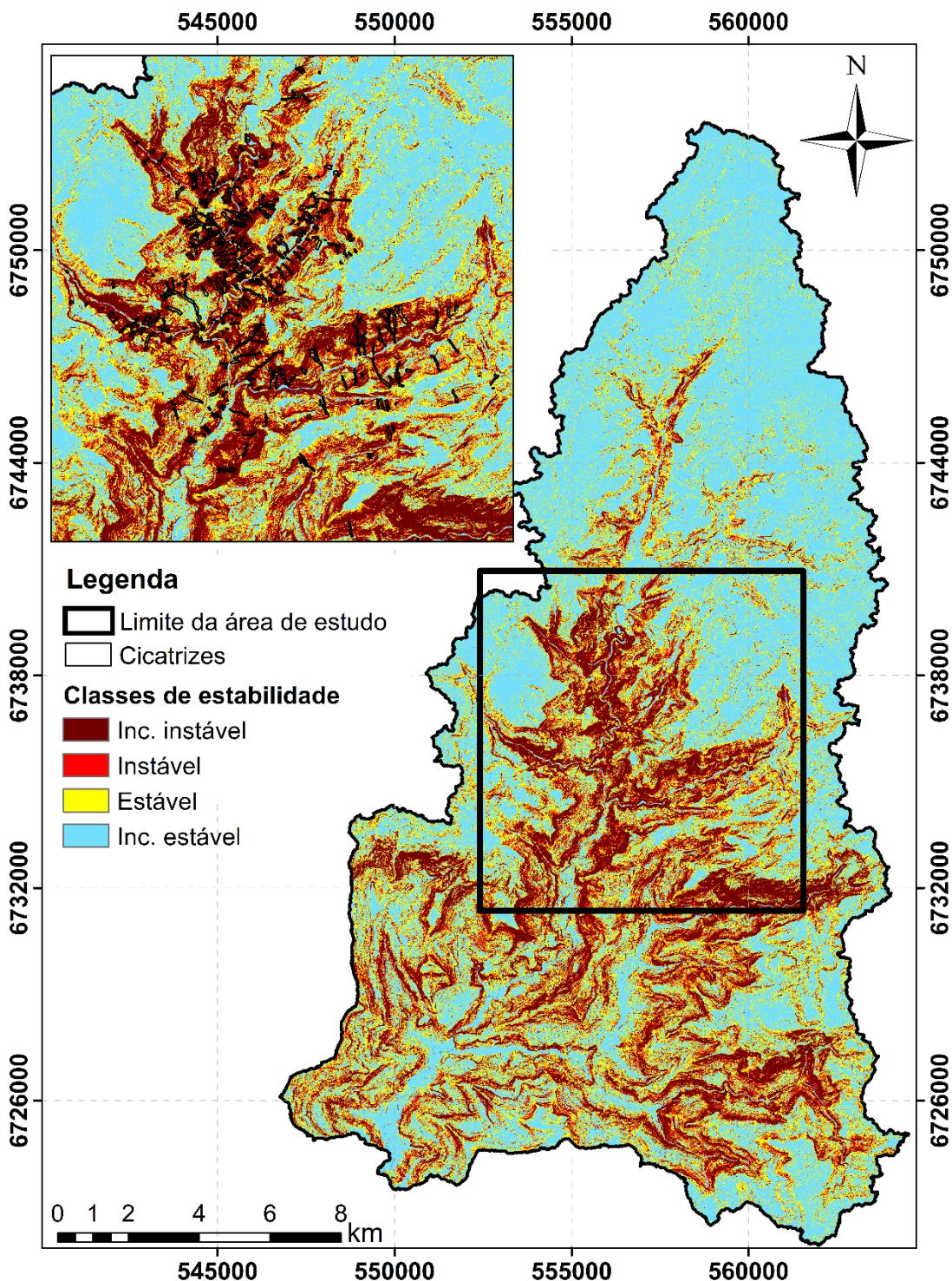


Figura 32 - Mapa de estabilidade simulação 32.

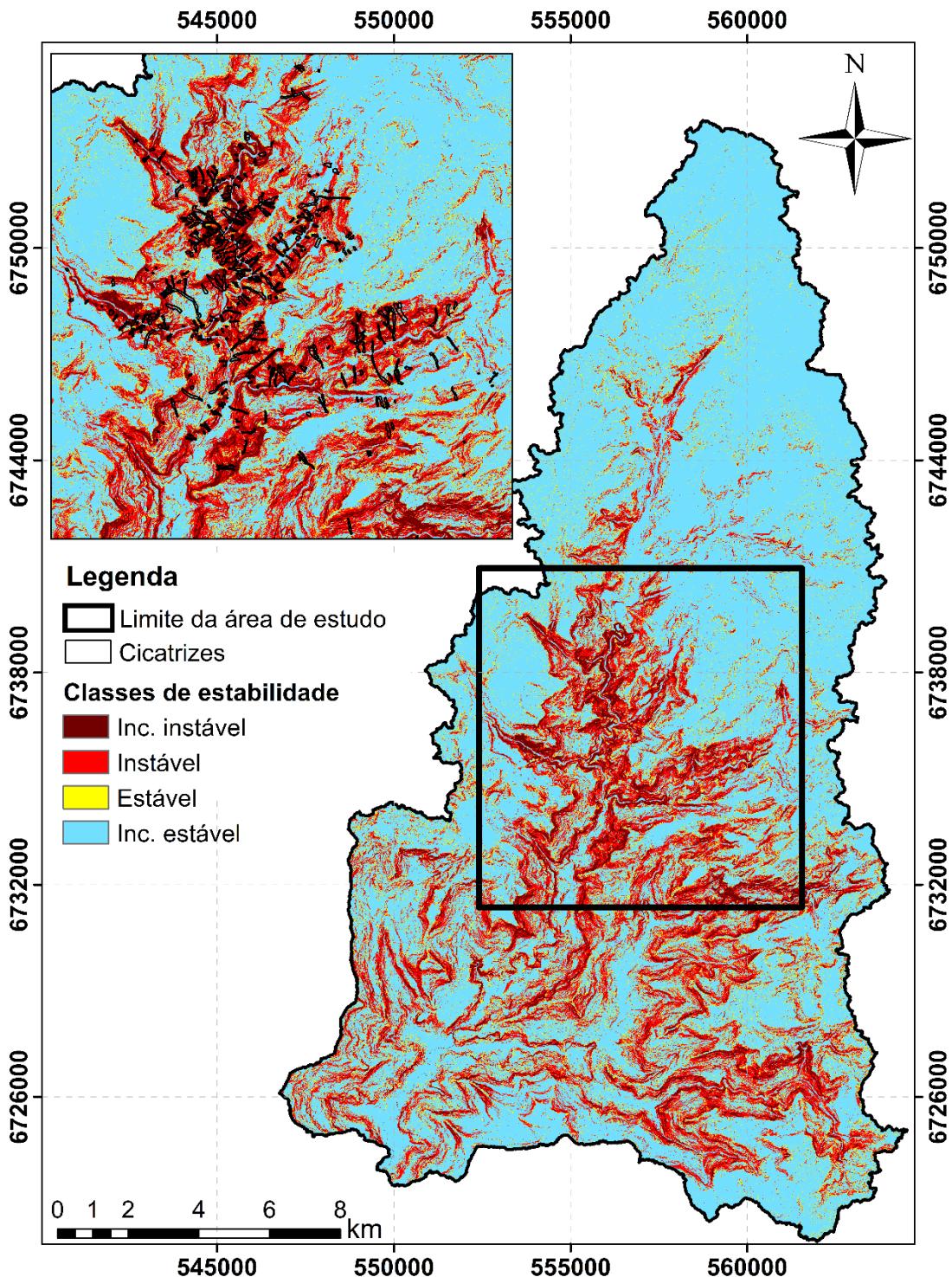


Figura 33 - Mapa de estabilidade simulação 33.

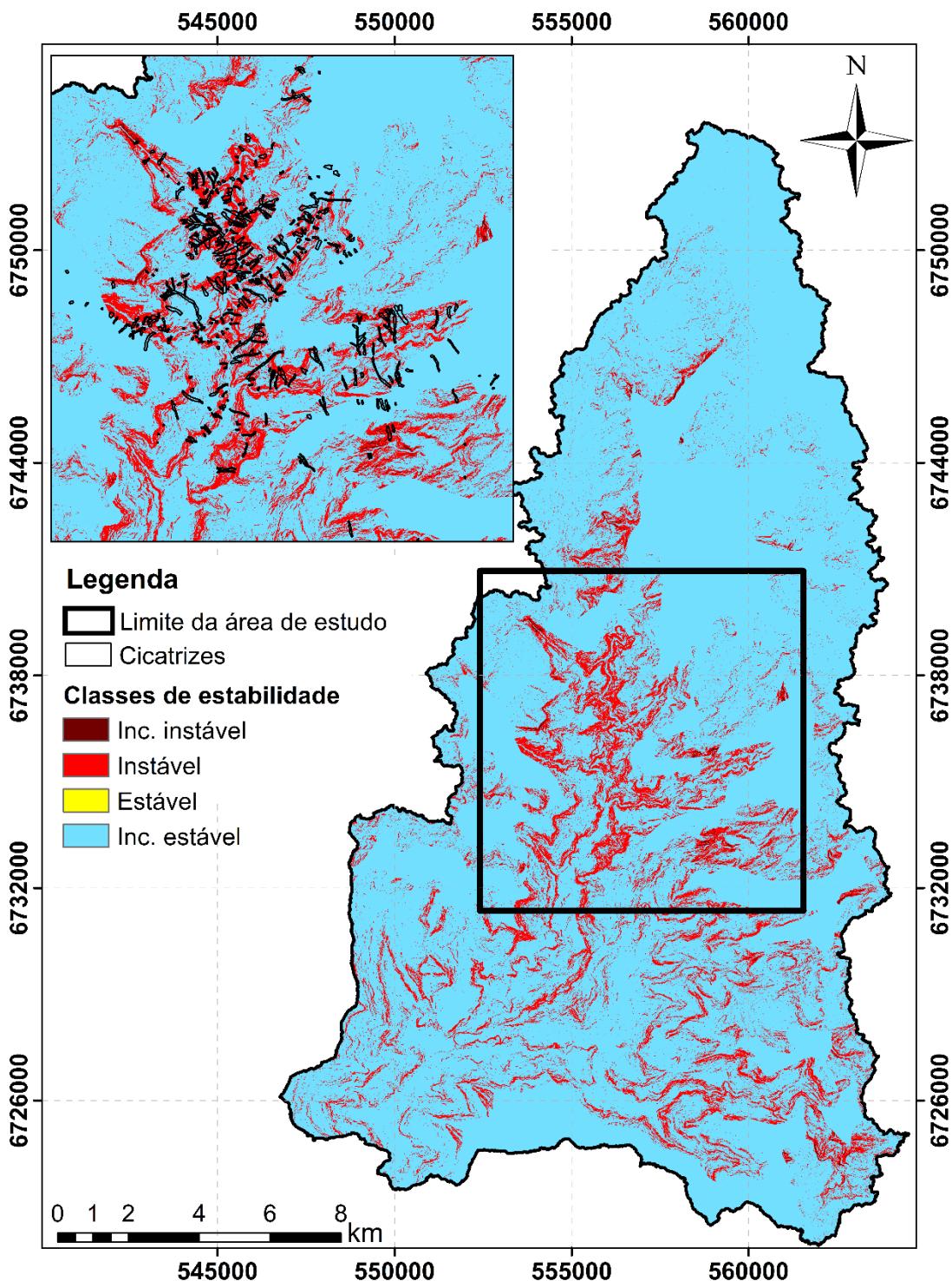


Figura 34 - Mapa de estabilidade simulação 34.

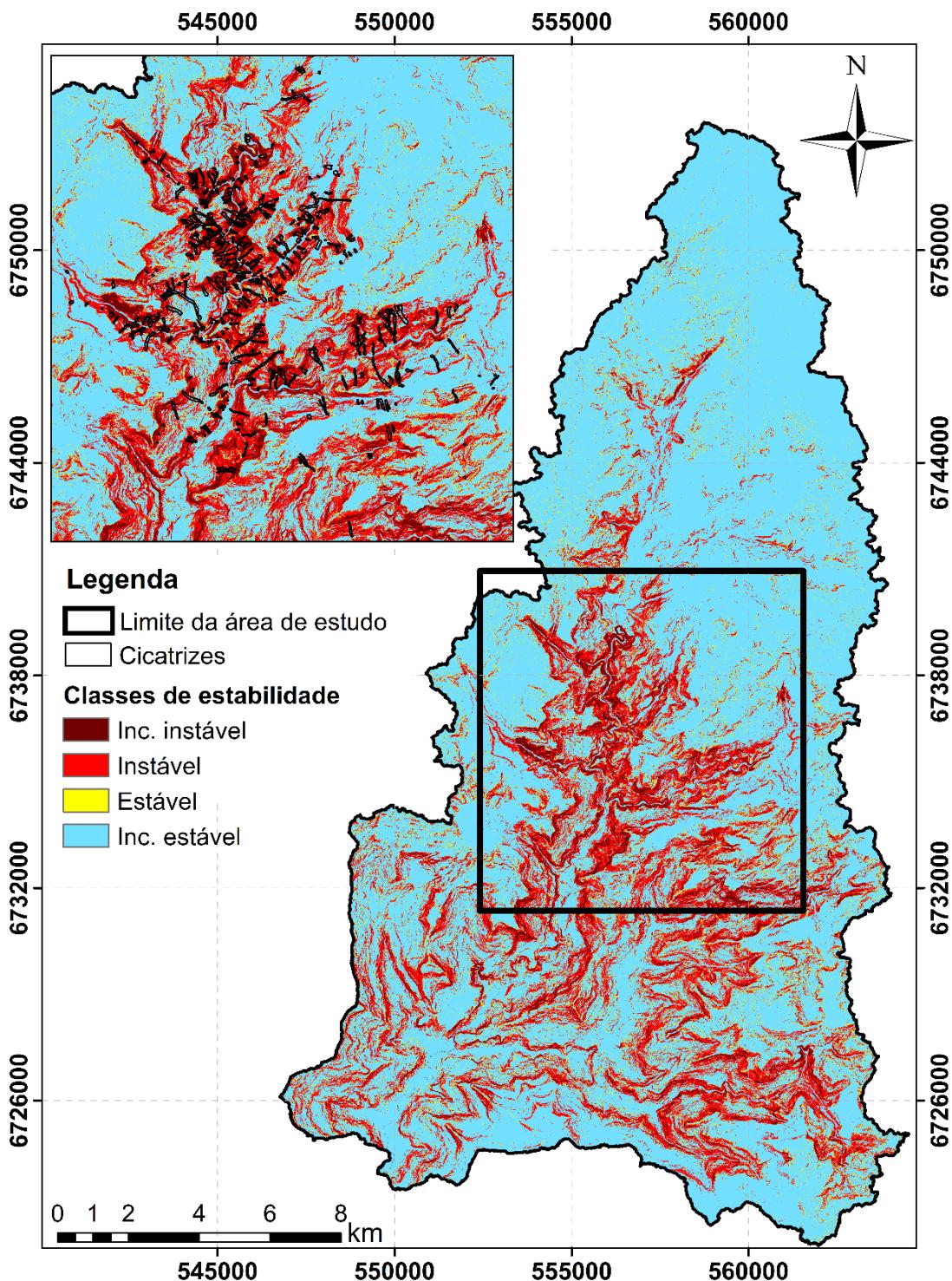


Figura 35 - Mapa de estabilidade simulação 35.

APÊNDICE D

MANUAL DE UTILIZAÇÃO DO SHALSANN

Versão recomendada: **QGIS 3.16.7**

Dados de entrada: ângulo de atrito interno do solo [graus], área de contribuição específica ou área de contribuição dividida pelo comprimento de célula [m], coesão das raízes [Pa], coesão do solo [Pa], declividade do terreno [graus], massa específica do solo [kg/m³], profundidade do solo [m] e sobrecarga da vegetação [Pa].

Resultado final: mapa de estabilidade de encostas.

Arquivos necessários:

SHALSANN

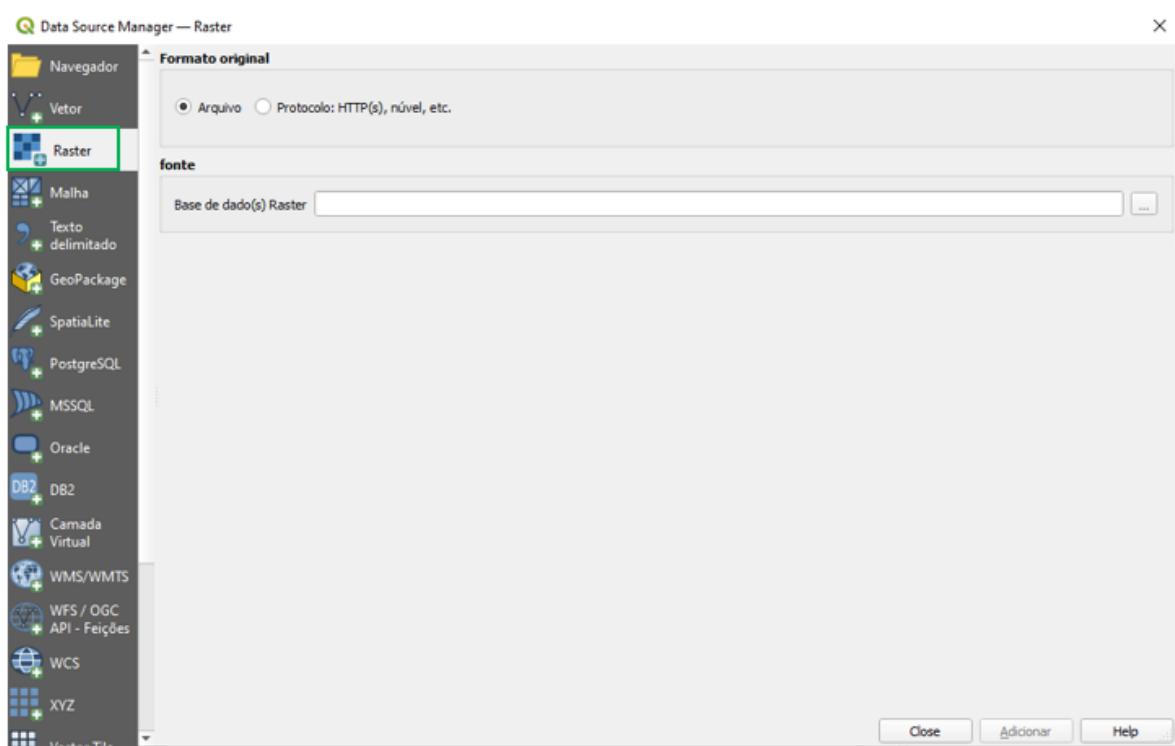
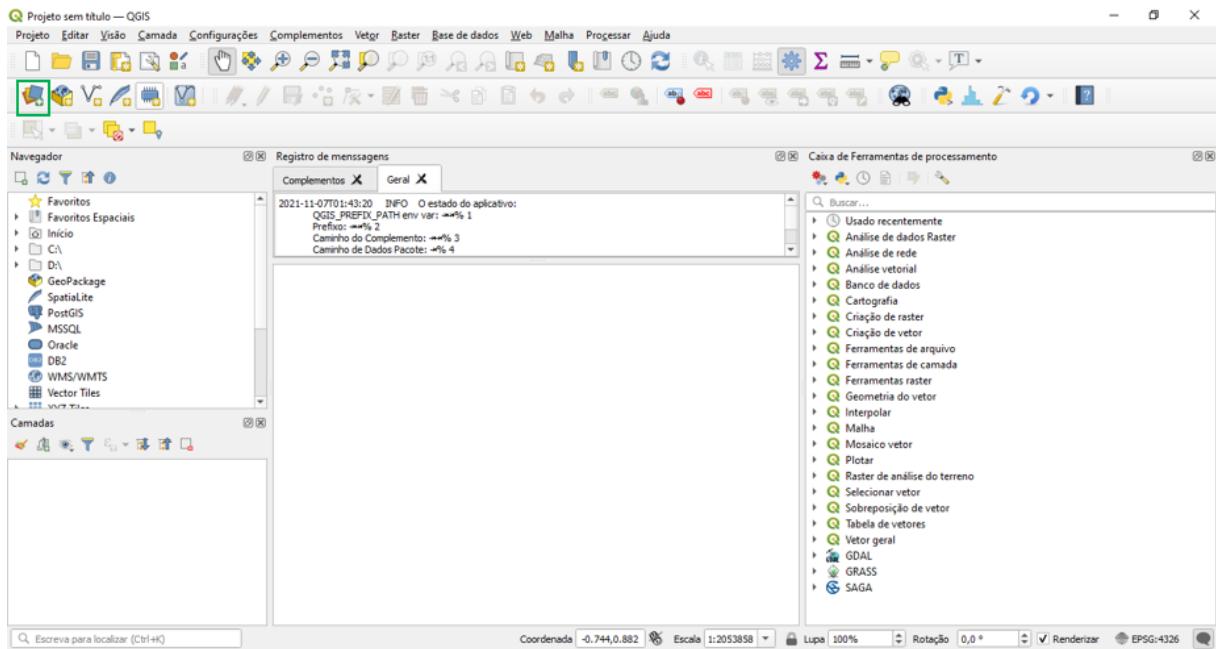
Modelo digital de terreno (MDT) com boa resolução.

Arquivos opcionais:

Arquivos em formato *raster* com os valores discretizados dos parâmetros.

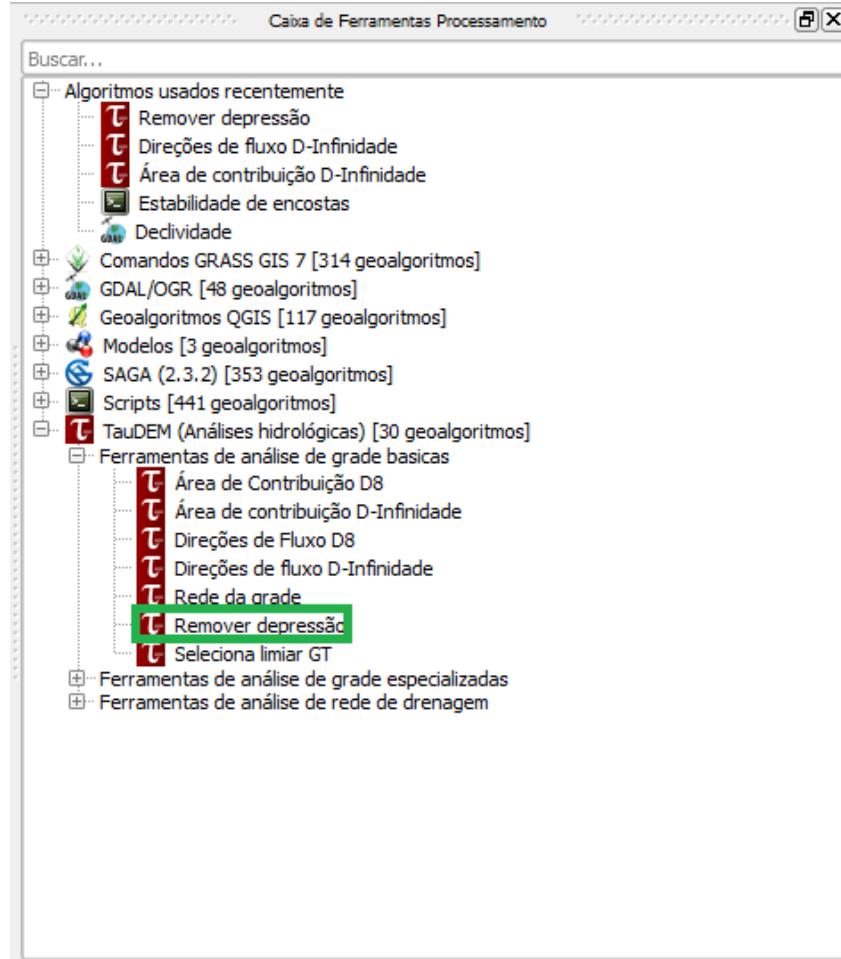
Criação dos parâmetros:

Para utilizar o modelo são necessários mapas para cada parâmetro, com valores discretizados ou constantes. Após a instalação dos programas requeridos é necessário abrir o *software* QGIS e adicionar o MDT da região de estudo. Para isso, basta clicar no ícone de adicionar *raster* () e escolher o arquivo do modelo digital de terreno.

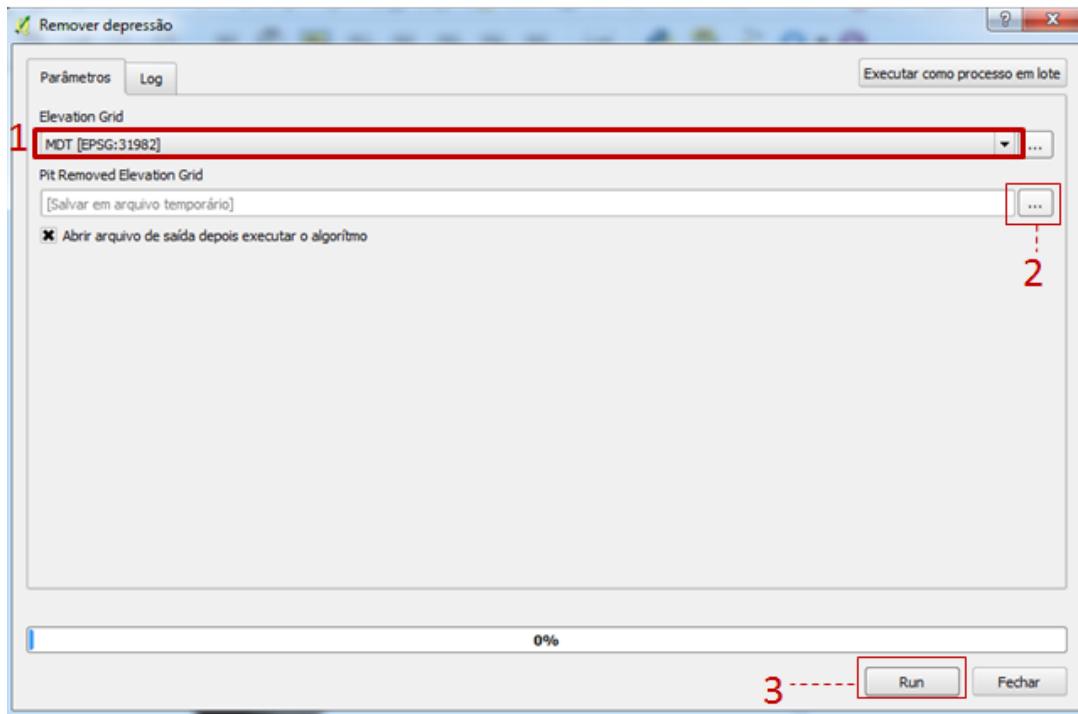


O primeiro parâmetro a ser criado é o de área de contribuição específica. Para auxiliar no processo serão utilizadas ferramentas da extensão TauDEM, previamente instalada.

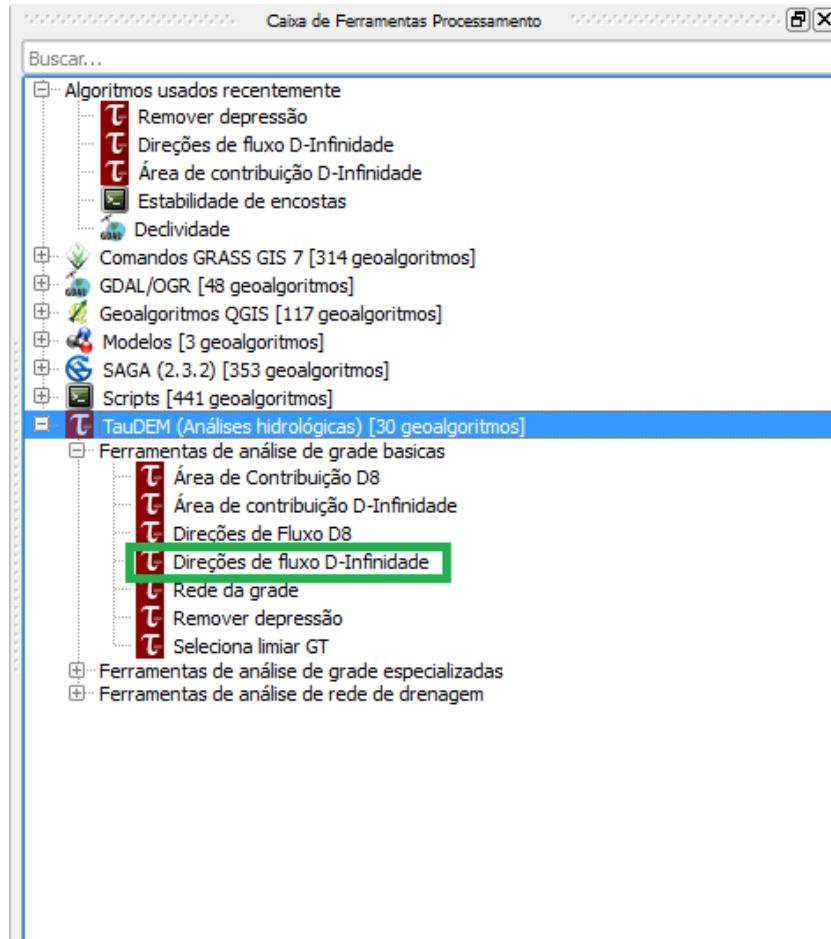
Com o MDT aberto utilize a função ***Remover depressão*** (*Pit remove*) nas *Ferramentas de análise de grade básicas* do TauDEM. Esta ferramenta remove todos os poços, depressões e buracos espúrios.



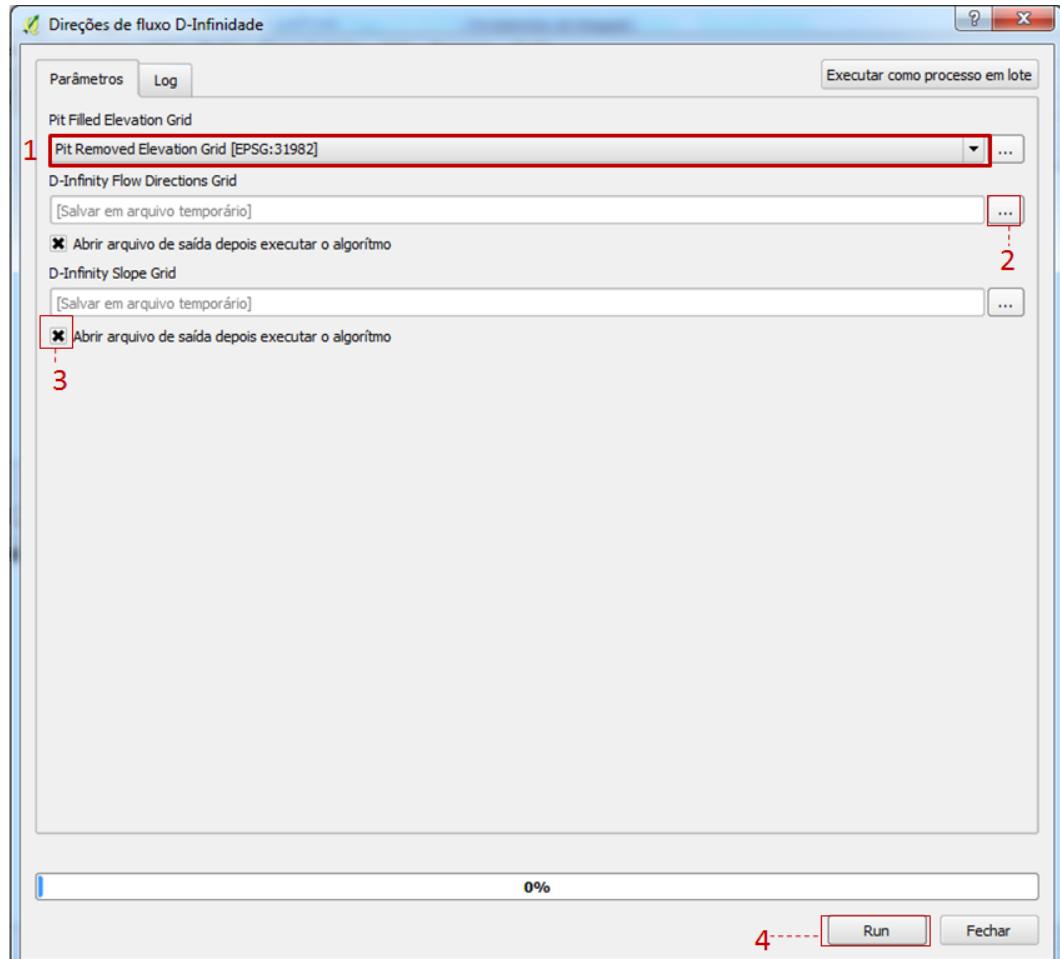
Na janela da ferramenta o primeiro passo é escolher o arquivo de entrada (1), que é o MDT, depois escolher o local em que o arquivo será salvo (2) e, por fim, executar a ação (3).



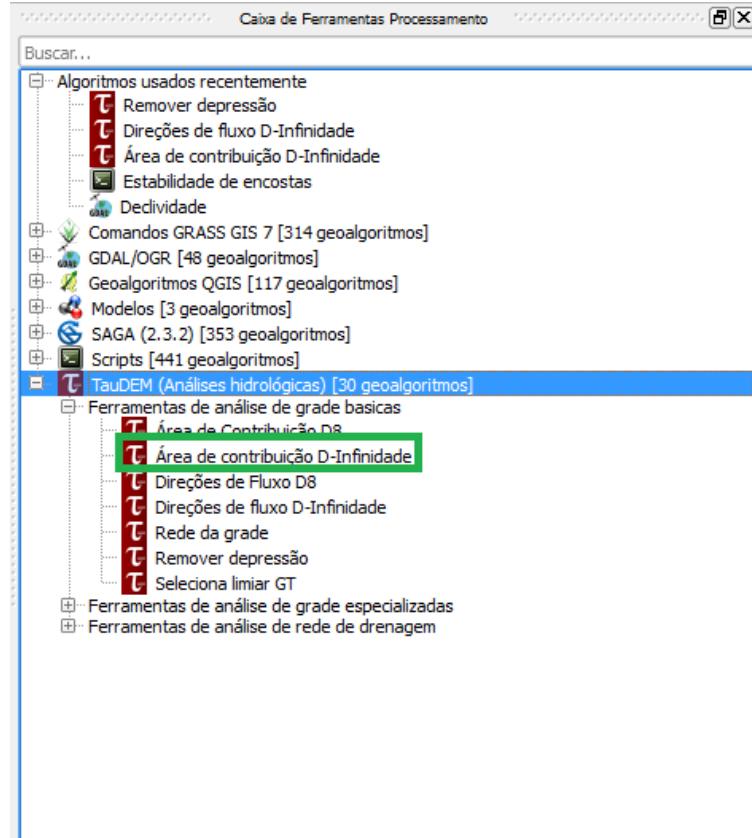
Após remover as depressões espúrias utilize a ferramenta **Direções de fluxo D-Infinidade (D-infinity Flow Direction)** nas *Ferramentas de análise de grade básicas* do TauDEM. Este algoritmo calcula o fluxo de água em infinitas direções e também gera o mapa de declividades, que será utilizado posteriormente.



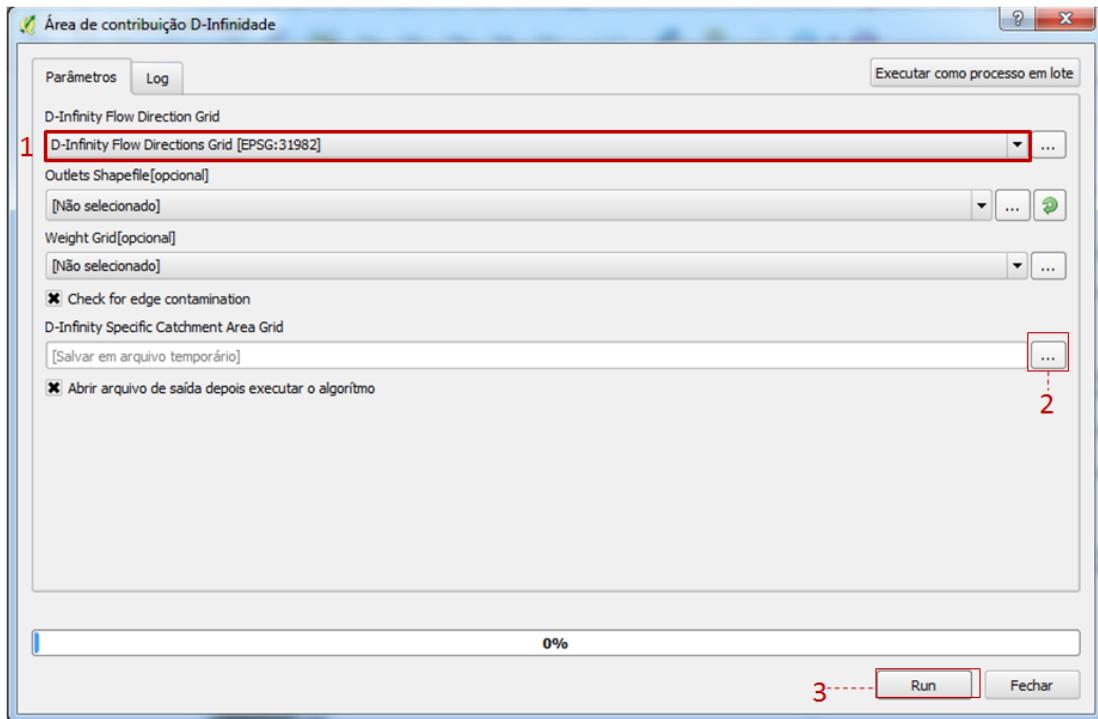
Na janela da ferramenta o primeiro passo é escolher o arquivo de entrada (1), que é o arquivo com as depressões removidas, depois escolher o local em que o arquivo será salvo (2), fazer o mesmo processo para a declividade (*D-Infinity Slope Grid*), manter marcada a opção de gerar a declividade (3) e, por fim, executar a ação (4).



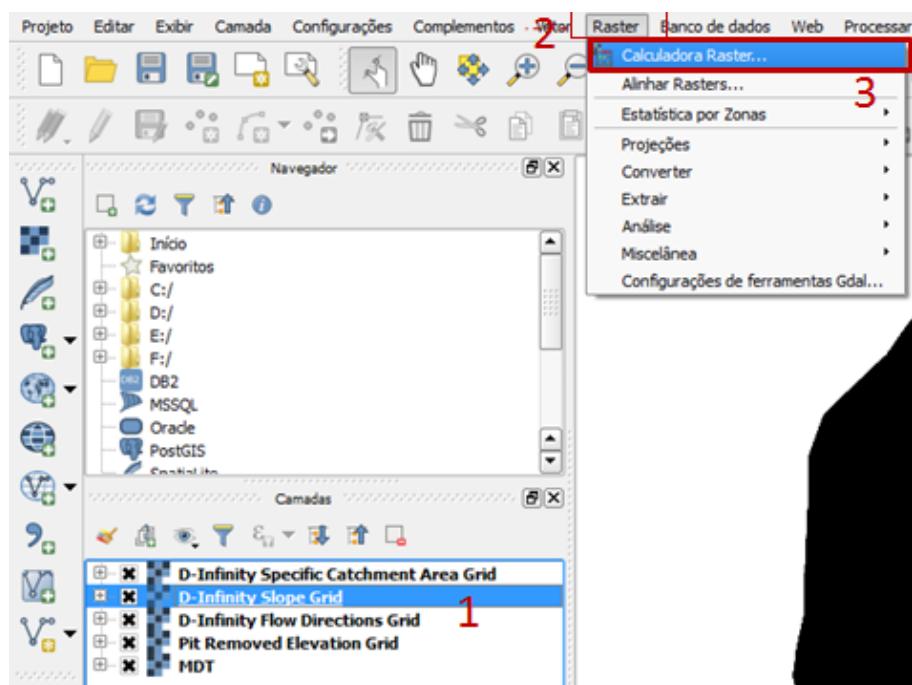
Após determinar as direções de fluxo utilize a ferramenta *Área de contribuição D-Infinidade* (*D-infinity Contributing Area*) nas *Ferramentas de análise de grade básicas* do TauDEM. Este algoritmo apresenta a rede de drenagem.



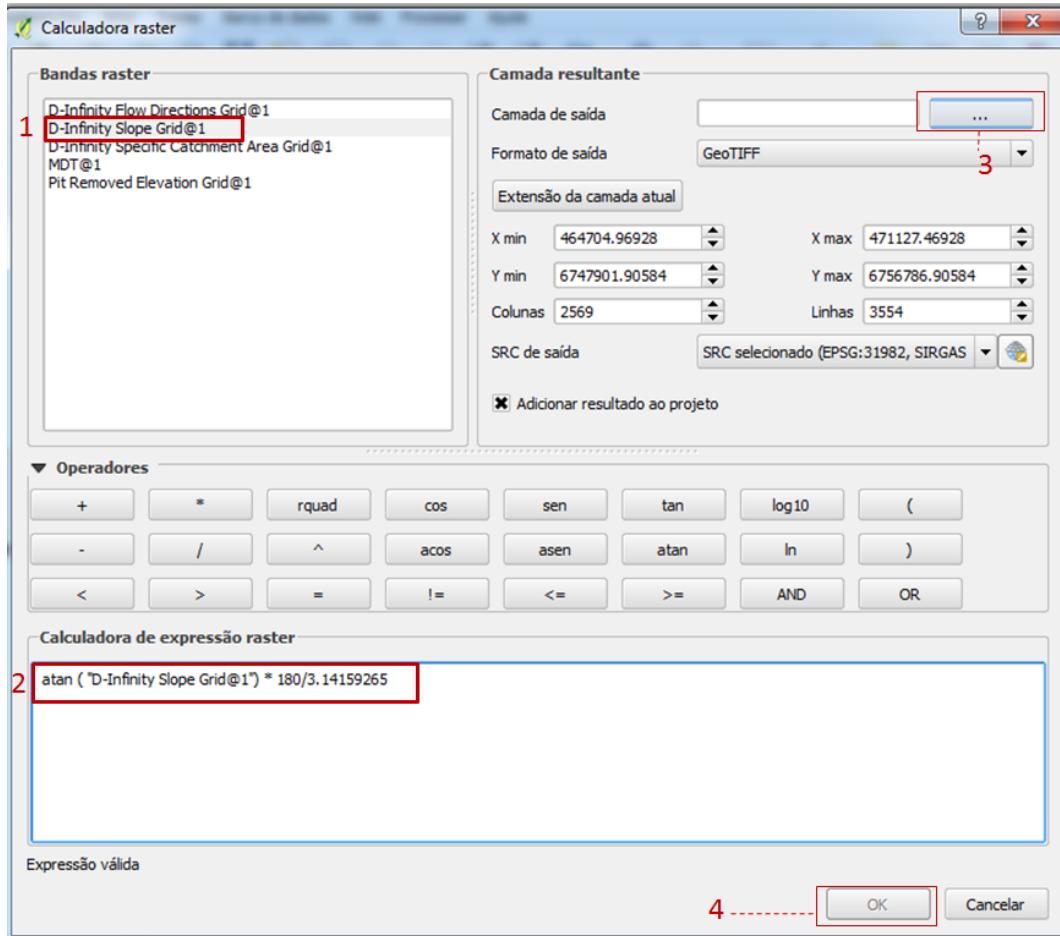
Na janela da ferramenta o primeiro passo é escolher o arquivo de entrada (1), que é o arquivo com as direções de fluxo, depois escolher o local em que o arquivo será salvo (2) e, por fim, executar a ação (3). Este arquivo gerado é o parâmetro de área de contribuição específica, em metros.



O segundo parâmetro a ser gerado é o de declividade na unidade correta, utilizando o mapa de **declividade (D-Infinity Slope Grid)** (1), gerado anteriormente com a ferramenta **Direções de fluxo D-Infinidade (D-infinity Flow Direction)**. Primeiramente clicar em Raster (2) > calculadora raster (3).



Na calculadora clicar duas vezes no *layer* de declividade (1), fazer o arcotangente deste raster, multiplicar por 180 e dividir por π (2). Escolher o local para salvar (3) e salvar as alterações (4). Este arquivo gerado é o parâmetro de declividade, em graus.



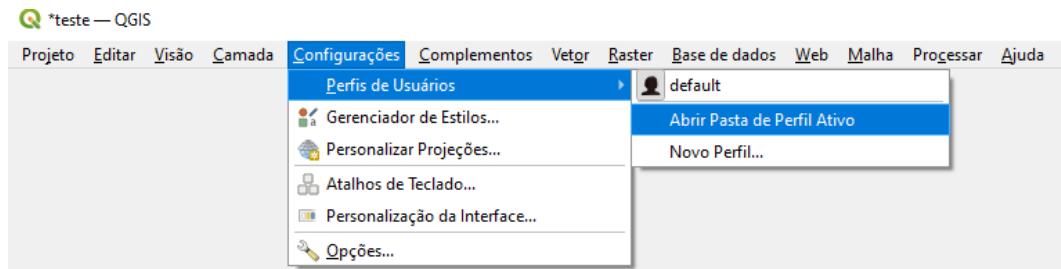
Para os parâmetros de valor constante pode-se utilizar tanto a ferramenta *raster calculator* quanto a ferramenta de *criação de camada raster constante*. Lembrando que o *raster base* deve ter o mesmo tamanho que os outros arquivos.

Assim pode-se gerar os arquivos de ângulo de atrito interno do solo [graus], coesão das raízes [Pa], coesão do solo [Pa], massa específica do solo [kg/m³], profundidade do solo [m] e sobrecarga da vegetação [Pa].

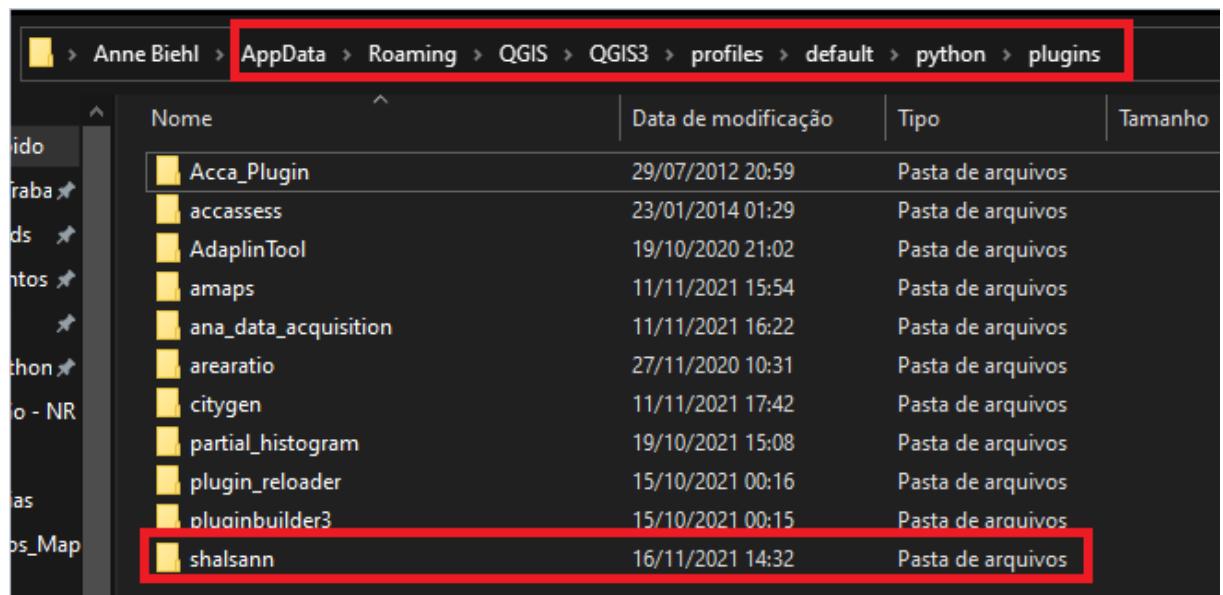
Aplicação do modelo:

Com todos os parâmetros necessários gerados é possível aplicar o modelo SHALSANN. Para tanto é preciso ter o arquivo com o plugin e instalá-lo. O arquivo do plugin deve ser

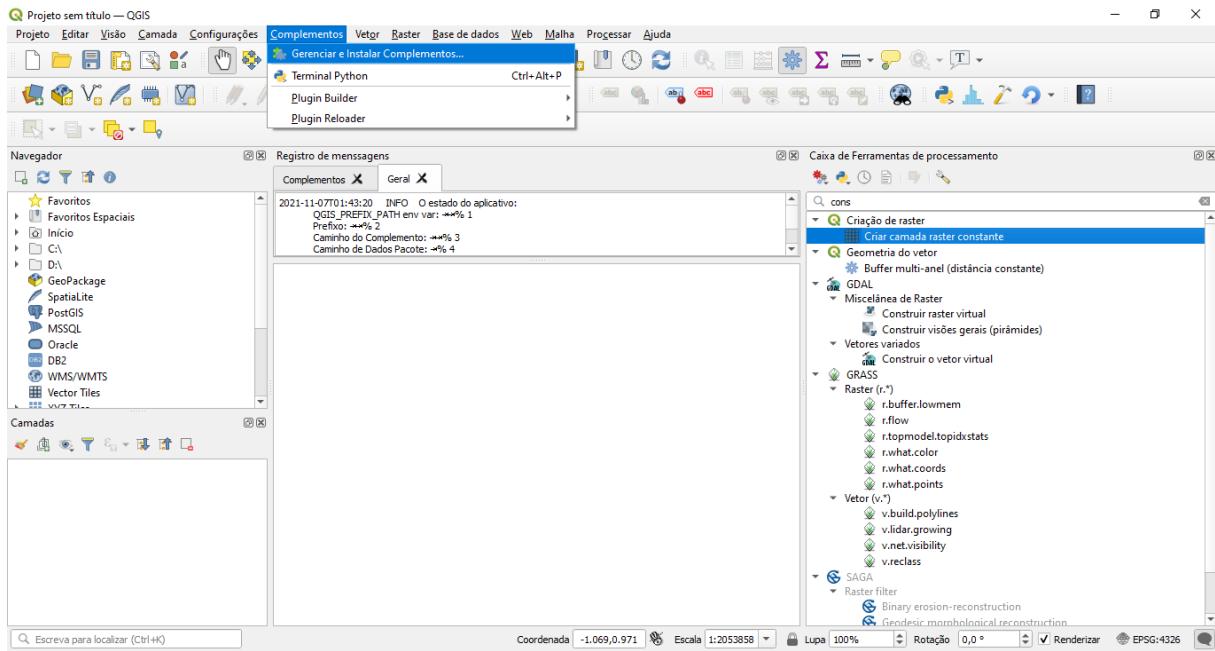
descompactado e colocado na pasta plugins do QGIS. A pasta é encontrada pelo caminho apresentado na figura abaixo.



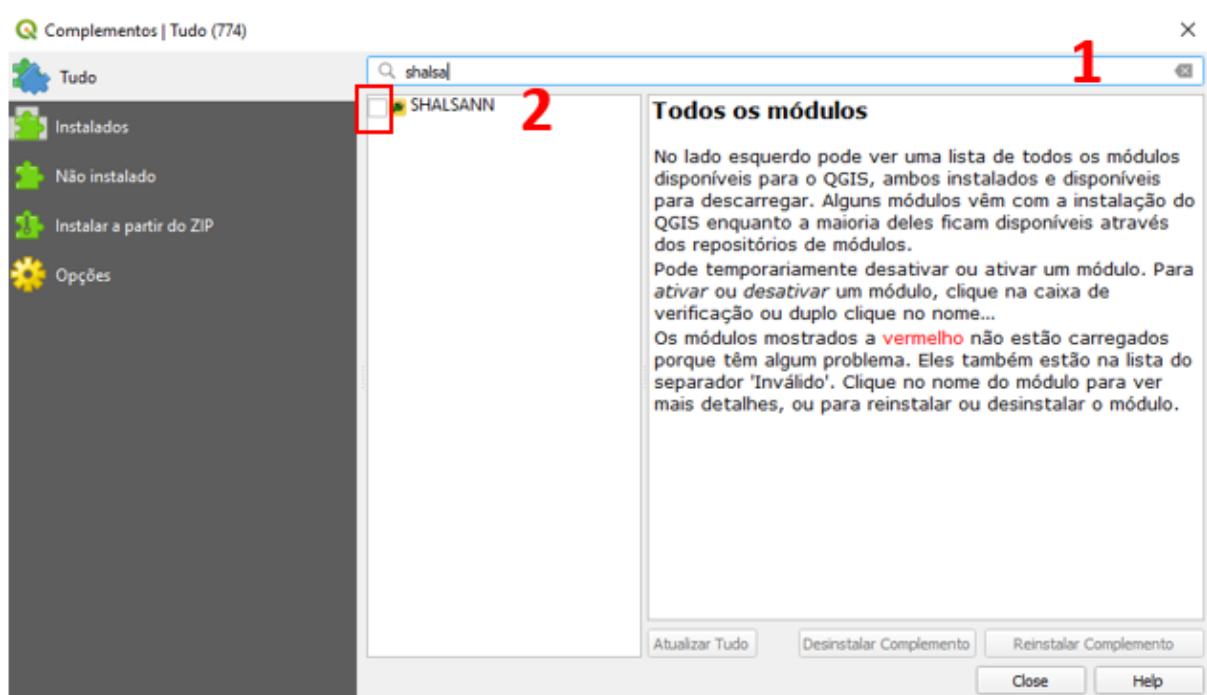
Dentro da pasta de perfil do usuário ir em python > plugins e armazenar a pasta do plugin.



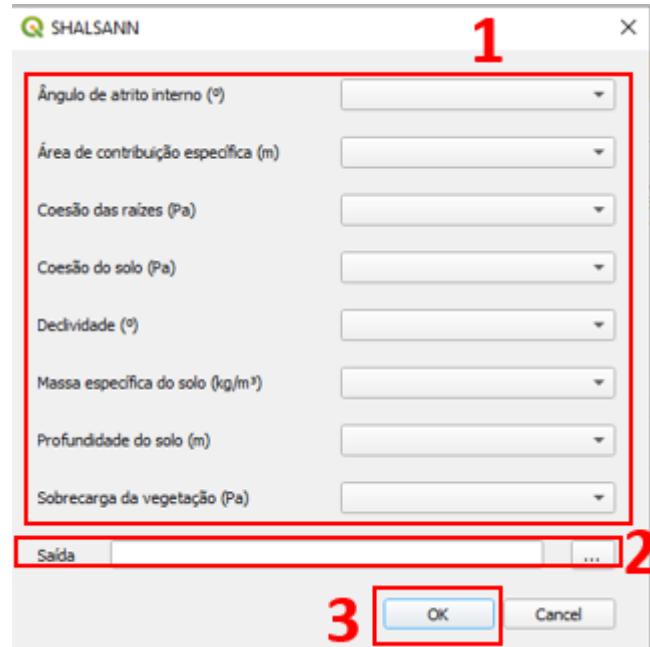
Após a inclusão do arquivo no sistema do QGIS, deve ser realizada a instalação do plugin na aba complementos.



Procurar o nome SHALSANN na aba de busca (1) e instalar o complemento (2).



Para gerar o mapa de áreas suscetíveis a escorregamentos basta abrir o modelo SHALSANN. Na janela da ferramenta o primeiro passo é escolher os arquivos de cada entrada (1), que são os arquivos dos parâmetros gerados anteriormente, depois escolher o local em que o arquivo será salvo (2) e, por fim, executar a ação (3).



O resultado final é o mapa de estabilidade de encostas (Estabilidade), variando de -10 a 10, sendo os valores representantes das áreas incondicionalmente instáveis e incondicionalmente estáveis respectivamente. Os valores intermediários dependem do parâmetro hidrológico, que deve ser calibrado a partir de cicatrizes de escorregamentos.

Observações:

Inicialmente o arquivo gerado está classificado de acordo com um arquivo base de origem. Mas reclassificando ou exportando ele fica com as classes corretas (-10 a 10).

Todos os mapas devem ter a mesma resolução e estar no mesmo sistema de coordenadas.

É possível utilizar dados discretizados e constantes.

Os parâmetros podem ser criados de outras formas, estas são só recomendações, utilize o que preferir.