

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Jéssica Huller

**Mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos translacionais na Microbacia
Hidrográfica do Itacorubi: uma análise comparativa entre dois métodos**

Florianópolis
2020

Jéssica Huller

**Mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos translacionais na Microbacia
Hidrográfica do Itacorubi: uma análise comparativa entre dois métodos**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Rafael Augusto dos Reis Higashi, Dr.

Coorientadora: Caroline Ester Christ, Dra.

Florianópolis

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Huller, Jéssica

Mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos
translacionais na Microbacia Hidrográfica do Itacorubi :
uma análise comparativa entre dois métodos / Jéssica
Huller ; orientador, Rafael Augusto dos Reis Higashi,
coorientadora, Caroline Ester Christ, 2020.
113 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Mapa de suscetibilidade. 3.
Deslizamentos translacionais. 4. Método dos Taludes
Infinitos. 5. Modelo Shalstab. I. Higashi, Rafael Augusto
dos Reis. II. Christ, Caroline Ester. III. Universidade
Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil.
IV. Título.

Jéssica Huller

Mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos translacionais na Microbacia do Itacorubi: uma análise comparativa entre dois métodos

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Civil” e aprovado em sua forma final pelo Curso de graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 03 de dezembro de 2020.

Prof.^a Luciana Rohde, Dr.(a)
Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Rafael Augusto dos Reis Higashi, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Civil Caroline Ester Christ, Dr.(a)
Coorientadora
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Cláudio César Zimmermann, Dr.
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Geólogo Matheus Klein Flach, Me.
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho a minha avó, Bernardete Heck Huller.

AGRADECIMENTOS

A minha família, especialmente aos meus pais, Michelle e Luciano Huller, por todo incentivo e amor incondicional em todos os momentos da minha vida, incluindo nesta graduação e no decorrer deste estudo.

Aos amigos que fiz ao longo da graduação, por todo apoio, companheirismo, conversas e companhias para o almoço.

À Joana Fuchs, por ser a melhor vizinha que eu poderia ter e por me mostrar um pouco do que é o amor de uma irmã.

Ao meu namorado, Luiz Gustavo Bento, por todo apoio emocional e por me encorajar a cada momento de dificuldade.

Ao meu orientador, Rafael Higashi, por todos os conselhos e incentivo, não apenas neste trabalho, mas também ao longo da minha graduação.

À minha coorientadora, Caroline Christ, pela paciência, por todos os ensinamentos, conversas e orientações desde minha iniciação científica e, especialmente, por todos os dados sem os quais este estudo não seria possível.

Aos membros da banca avaliadora, Matheus Klein e Prof.º Cláudio Zimmermann, pela disponibilidade e interesse em contribuir com esta pesquisa.

Aos colegas do Laboratório de Mecânica dos Solos e do LAMGEO, por todas as dicas, orientações e tardes realizando ensaios ao longo do último ano.

Aos meus professores de graduação, especialmente aos do departamento de Engenharia Civil, por todo ensinamento técnico e por me fazerem entender o papel e a responsabilidade de uma engenheira civil com a sociedade.

À Universidade Federal de Santa Catarina, por todas as oportunidades que tive e terei por meio desta graduação.

RESUMO

Em diversas cidades brasileiras é observada a presença de moradias em terrenos com declividade, inclusive em áreas de preservação permanente (inclinação superior a 30%). Essa ocupação irregular põe uma parcela considerável da população em situação de risco e demanda que o poder público atue de forma mais técnica na orientação do uso e ocupação do solo. Uma forma de prover este embasamento técnico para a análise de risco geotécnico da ocupação do solo é a elaboração de mapas de suscetibilidade. Alguns modelos matemáticos vêm sendo utilizados na determinação de mapas de suscetibilidade a deslizamentos rasos, sendo o mais consolidado o Shalstab. O presente estudo propõe a aplicação do Método dos Taludes Infinitos para o mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos translacionais na Microbacia do Itacorubi, região central de Florianópolis. Os parâmetros de resistência ao cisalhamento (c e ϕ) foram obtidos de Christ (2019), que se utilizou de ensaios de cisalhamento direto e Borehole Shear Test (BST) para tal determinação. Para as classes de suscetibilidade atribuídas às unidades, foram utilizados os fatores de segurança estipulados pela NBR 11682. Foram ainda consideradas duas possibilidades de formulação, com e sem percolação, permitindo a geração de dois mapas distintos. Estas possibilidades de análises foram aplicadas diretamente em SIG, onde é possível obter a inclinação real do talude e gerar as classes de suscetibilidade a deslizamentos. Os mapas resultantes foram comparados ao mapa de suscetibilidade de Christ (2019), obtido com base no modelo Shalstab. Como conclusão, observou-se o forte impacto da consideração da percolação de água no solo nos resultados apresentados. Ainda, concluiu-se que o Modelo SHALSTAB manteve-se mais próximo ao Método dos Taludes Infinitos com percolação na maioria das análises realizadas.

Palavras-chave: Mapeamento Geotécnico. Shalstab. Método dos Taludes Infinitos. Suscetibilidade a Deslizamentos. Deslizamentos Translacionais.

ABSTRACT

In several Brazilian cities it is observed the presence of houses in lands with declivity, including in permanent preservation areas (slope superior to 30%). This irregular occupation puts a considerable portion of the population at risk and demands that the public authorities act in a more technical way to guide the use and occupation of the land. One way to provide this technical basis for the geotechnical risk analysis of land occupation is the elaboration of susceptibility maps. Some mathematical models have been used in the determination of maps of susceptibility to shallow landslides, the most consolidated being Shalstab. The present study proposes the application of the Infinite Slopes Method for mapping the susceptibility to translational landslides in the Itacorubi Microbasin, central region of Florianópolis. Shear resistance parameters (c and ϕ) were obtained from Christ (2019), who used direct shear tests and Borehole Shear Test (BST) for such determination. For the susceptibility classes assigned to the units, the safety factors stipulated by NBR 11682 were used. Two formulation possibilities were also considered, with and without percolation, allowing the generation of two distinct maps. These analysis possibilities were applied directly in GIS, where it is possible to obtain the actual slope inclination and generate the sliding susceptibility classes. The resulting maps were compared to Christ's susceptibility map (2019), obtained based on the Shalstab model. As a conclusion, the strong impact of considering water percolation in the soil was observed in the results presented. It was also concluded that the SHALSTAB Model remained closer to the Infinite Slopes Method with percolation in most of the analyses performed.

Keywords: Geotechnical Mapping. Shalstab. Infinite Slopes Method. Landslide Susceptibility. Translational Landslides.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Rastejo.....	27
Figura 2 – Deslizamento Rotacional.....	29
Figura 3 – Deslizamento Translacional.....	30
Figura 4 – Queda de bloco.....	32
Figura 5 – Corrida.....	33
Figura 6 – Elemento de solo abcd sem percolação.....	42
Figura 7 – Elemento de solo abcd com percolação.....	43
Figura 8 – Grade idealizada para o Shalstab.....	45
Figura 9 – Estrutura matricial.....	47
Figura 10 – Comparação entre dados vetoriais e matriciais.....	48
Figura 11 – Metodologia de Higashi para Uso e Ocupação do Solo.....	50
Figura 12 – Microbacia Hidrográfica do Itacorubi, Florianópolis/SC.....	52
Figura 13 – Histograma de precipitações totais anuais (1969 – 2010)	53
Figura 14 – Relevo da Ilha de Santa Catarina.....	55
Figura 15 – Mapa Geotécnico da Ilha de Santa Catarina.....	58
Figura 16 – Fluxograma de desenvolvimento do estudo.....	59
Figura 17 – Mapa Geotécnico adaptado.....	62
Figura 18 – Gráfico de % de área por Unidade Geotécnica.....	63
Figura 19 – Mapa de suscetibilidade a deslizamentos translacionais.....	64
Figura 20 – Mapa com adequação das classes de suscetibilidade.....	66
Figura 21 – Mapa de Suscetibilidade sem percolação.....	72
Figura 22 – Mapa com adaptação das classes de suscetibilidade.....	73
Figura 23 – Mapa de Suscetibilidade com percolação.....	74
Figura 24 – Mapa com adaptação das classes de suscetibilidade.....	75
Figura 25 – Áreas por classe de suscetibilidade (MTI sem percolação).....	76
Figura 26 – Área por classe de suscetibilidade (MTI com percolação).....	77
Figura 27 – Áreas por classe de suscetibilidade (MTI sem percolação).....	78
Figura 28 – Área por classe de suscetibilidade (MTI com percolação).....	78
Figura 29 – Área por classe de suscetibilidade (Shalstab).....	79
Figura 30 – Porcentagens de área na classe A.....	79
Figura 31 – Porcentagens de área na classe B.....	80
Figura 32 – Porcentagens de área na classe C.....	80

Figura 33 – Áreas por classe de suscetibilidade (MTI sem percolação).....	81
Figura 34 – Área por classe de suscetibilidade (MTI com percolação).....	82
Figura 35 – Área por classe de suscetibilidade (Shalstab).....	82
Figura 36 – Porcentagens de área na classe A.....	83
Figura 37 – Porcentagens de área na classe B.....	83
Figura 38 – Porcentagens de área na classe C.....	84
Figura 39 – Áreas por classe de suscetibilidade (MTI sem percolação).....	85
Figura 40 – Área por classe de suscetibilidade (MTI com percolação).....	85
Figura 41 – Área por classe de suscetibilidade (Shalstab).....	86
Figura 42 – Porcentagens de área na classe A.....	86
Figura 43 – Porcentagens de área na classe B.....	87
Figura 44 – Porcentagens de área na classe C.....	87
Figura 45 – Áreas por classe de suscetibilidade (MTI sem percolação).....	88
Figura 46 – Área por classe de suscetibilidade (MTI com percolação).....	89
Figura 47 – Área por classe de suscetibilidade (Shalstab).....	89
Figura 48 – Porcentagens de área na classe A.....	90
Figura 49 – Porcentagens de área na classe B.....	90
Figura 50 – Porcentagens de área na classe C.....	91
Figura 51 – Áreas por classe de suscetibilidade (MTI sem percolação).....	92
Figura 52 – Área por classe de suscetibilidade (MTI com percolação).....	92
Figura 53 – Área por classe de suscetibilidade (Shalstab).....	93
Figura 54 – Porcentagens de área na classe A.....	93
Figura 55 – Porcentagens de área na classe B.....	94
Figura 56 – Porcentagens de área na classe C.....	94
Figura 57 – Áreas por classe de suscetibilidade (MTI sem percolação).....	95
Figura 58 – Área por classe de suscetibilidade (MTI com percolação).....	95
Figura 59 – Área por classe de suscetibilidade (Shalstab).....	96
Figura 60 – Porcentagens de área na classe A.....	96
Figura 61 – Porcentagens de área na classe B.....	97
Figura 62 – Porcentagens de área na classe C.....	97
Figura 63 – Áreas por classe de suscetibilidade (MTI sem percolação).....	98
Figura 64 – Área por classe de suscetibilidade (MTI com percolação).....	99
Figura 65 – Área por classe de suscetibilidade (Shalstab).....	99
Figura 66 – Porcentagens de área na classe A.....	100

Figura 67 – Porcentagens de área na classe B.....	100
Figura 68 – Porcentagens de área na classe C.....	101
Figura 69 – Áreas por classe de suscetibilidade (MTI sem percolação).....	102
Figura 70 – Área por classe de suscetibilidade (MTI com percolação).....	102
Figura 71 – Área por classe de suscetibilidade (Shalstab).....	103
Figura 72 – Porcentagens de área na classe A.....	103
Figura 73 – Porcentagens de área na classe B.....	104
Figura 74 – Porcentagens de área na classe C.....	104
Figura 75 – Porcentagens de área na classe A.....	105
Figura 76 – Mapa de Suscetibilidade Final.....	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Níveis de Intensidade de Desastres Naturais.....	22
Tabela 2 – Etapas de Prevenção a Desastres Naturais.....	24
Tabela 3 – Tipos de Movimentos de Massa.....	26
Tabela 4 – Utilização de modelos matemáticos.....	40
Tabela 5 – Comparação entre formato vetorial e matricial.....	48
Tabela 6 – Áreas conforme classes de inclinação pela Embrapa (2007).....	55
Tabela 7 – Dados de entrada para o Método dos Taludes Infinitos.....	61
Tabela 8 – Área por unidade geotécnica.....	63
Tabela 9 – Classes de estabilidade conforme Fator de Segurança.....	65
Tabela 10 – Fatores de Segurança resultantes (sem percolação).....	69
Tabela 11 – Fatores de Segurança resultantes (com percolação).....	70
Tabela 12 – Distribuição de área por classes.....	71
Tabela 13 – Distribuição de área por classes.....	72
Tabela 14 – Distribuição de área por classes.....	74
Tabela 15 – Distribuição de área por classes.....	75
Tabela 16 – Análise geral da área de estudos.....	77
Tabela 17 – Análise da unidade Cde.....	81
Tabela 18 – Análise da unidade Cgi.....	84
Tabela 19 – Análise da unidade Cgt.....	88
Tabela 20 – Análise das unidades Ddia, Dda e Dr.....	91
Tabela 21 – Análise da unidade Pvgi.....	95
Tabela 22 – Análise da unidade Pvgi.....	98
Tabela 23 – Análise das unidades Rgi e Rgt.....	101
Tabela 24 – Análise das unidades Gsq e SMSq.....	105
Tabela 25 – Distribuição de área por classes.....	106
Tabela 26 – Área comum aos 3 mapas.....	107
Tabela 27 – Área comum aos mapas MTI (perc.) e SHALSTAB.....	107

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas
BST Borehole Shear Test
Cde Cambissolo substrato depósito de encostas
Cgi Cambissolo substrato granito Ilha
Cgt Cambissolo substrato granito Itacorubi
Dda Dique de dacito
Ddia Dique de diabásio
Dr Dique de riolito
EPAGRI Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina
F.S. Fator de Segurança
Gsq Gleissolo substrato sedimentos quaternários
IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LAMGEO Laboratório de Mapeamento Geotécnico
MDT Modelo Digital do Terreno
MTI Método dos Taludes Infinitos
PVgi Podzólico Vermelho-amarelo substrato granito Ilha
PVgt Podzólico Vermelho-amarelo substrato granito Itacorubi
Rgi Litossolos de substrato granito Ilha
Rgt Litossolos de substrato granito Itacorubi
SIG Sistemas de Informações Geográficas
SMsq Solos Moles substrato sedimentos quaternários
UFSC Universidade Federal de Santa Catarina

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS	19
1.1.1	Objetivo Geral	19
1.1.2	Objetivos Específicos	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	CRESCIMENTO URBANO DESORDENADO	20
2.2	DESASTRES NATURAIS	21
2.2.1	Classificação	22
2.2.2	Risco e Perigo	23
2.2.3	Prevenção	23
2.3	MOVIMENTOS DE MASSA	25
2.3.1	Rastejo	27
2.3.2	Escorregamentos	27
2.3.2.1	<i>Rotacionais</i>	28
2.3.2.2	<i>Translacionais</i>	29
2.3.2.3	<i>Em cunha</i>	31
2.3.3	Queda	31
2.3.4	Corrida	32
2.4	RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO SOLO	33
2.4.1	Coesão	34
2.4.2	Ângulo de Atrito	34
2.4.3	Crítério de Ruptura de Mohr-Coulomb	35
2.4.4	Ensaio para determinação dos parâmetros de resistência	36
2.4.4.1	<i>Cisalhamento Direto</i>	36
2.4.4.2	<i>Borehole Shear Test</i>	38
2.5	FATOR DE SEGURANÇA	40

2.6	ESTABILIDADE DOS TALUDES INFINITOS	40
2.6.1	Método dos Taludes Infinitos	41
2.6.1.1	<i>Desconsiderando a percolação constante.....</i>	41
2.6.1.2	<i>Considerando a percolação constante</i>	43
2.6.2	Modelo SHALSTAB	44
2.7	SIG	45
2.8	MAPEAMENTO GEOTÉCNICO	49
2.9	MAPA DE SUSCETIBILIDADE.....	51
3	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS	52
3.1	LOCALIZAÇÃO	52
3.2	CLIMA	53
3.3	GEOLOGIA	53
3.4	GEOMORFOLOGIA E RELEVO	54
3.5	UNIDADES GEOTÉCNICAS.....	56
4	MATERIAIS E MÉTODO.....	59
4.1	ESCOLHA DA ÁREA DE ESTUDOS	60
4.2	LEVANTAMENTO DE DADOS PREEXISTENTES	60
4.2.1	Parâmetros de resistência e caracterização do solo	60
4.2.2	Delimitação da Área de Estudos	61
4.2.3	Mapa Geotécnico.....	61
4.2.4	Mapa de Suscetibilidade a Deslizamentos Translacionais pelo Modelo SHALSTAB.....	63
4.3	ADEQUAÇÃO DAS CLASSES DE SUSCETIBILIDADE	65
4.4	APLICAÇÃO DO MÉTODO DOS TALUDES INFINITOS	66
4.5	MAPAS DE SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS TRANSLACIONAIS PELO MÉTODO DOS TALUDES INFINITOS	67

4.6	MAPA DE SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS TRANSLACIONAIS FINAL.....	67
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
5.1	APLICAÇÃO DO MÉTODO DOS TALUDES INFINITOS	69
5.2	MAPA DE SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS TRANSLACIONAIS PELO MÉTODO DOS TALUDES INFINITOS	71
5.2.1	Sem percolação	71
5.2.2	Com percolação.....	73
5.3	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MAPAS.....	76
5.3.1	Análise geral da Microbacia	77
5.3.2	Análise das Unidades Geotécnicas isoladas	80
5.3.2.1	<i>Cde</i>	81
5.3.2.2	<i>Cgi</i>	84
5.3.2.3	<i>Cgt</i>	87
5.3.2.4	<i>Ddia, Dda, Dr</i>	91
5.3.2.5	<i>PVgi</i>	94
5.3.2.6	<i>PVgt</i>	97
5.3.2.7	<i>Rgi, Rgt</i>	101
5.3.2.8	<i>Gsq e SMsq</i>	104
5.4	MAPA DE SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS TRANSLACIONAIS FINAL.....	105
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	108
6.1	CONCLUSÕES	108
6.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	110

1 INTRODUÇÃO

A presença de moradias em terrenos com alta declividade é uma realidade comum em diversas cidades brasileiras, incluindo Florianópolis, capital do estado de Santa Catarina, que vem sofrendo um expressivo avanço populacional nos últimos anos.

Segundo Christ *et al.* (2019), “como consequência deste aumento populacional, ocorre a ocupação desordenada, incluindo em áreas suscetíveis a deslizamentos”. Os autores ainda ressaltam a importância de mapear áreas de suscetibilidade a problemas ligados à geotecnia como forma de proporcionar maior segurança à população.

Por meio desse processo de mapeamento de áreas de risco geotécnico, é possível fornecer embasamento técnico para que o poder público atue de forma proativa no processo de urbanização, orientando e regulamentando o correto uso e ocupação do solo, não apenas trabalhando de forma reativa aos problemas gerados pela ocupação já realizada de forma imprudente.

Os mapas de risco geotécnico podem apontar, por exemplo, a suscetibilidade a deslizamentos translacionais e rotacionais ou a suscetibilidade ao colapso do solo, sendo que para cada tipo de mapa são utilizados procedimentos específicos. No caso dos mapas de suscetibilidade a deslizamentos rotacionais, estes são comumente baseados em um mapa geotécnico e em inclinações críticas calculadas para cada unidade geotécnica, utilizando-se de softwares de análise de estabilidade de encostas baseados no Método de Bishop.

Já para os mapas de suscetibilidade a deslizamentos translacionais ou rasos, alguns modelos matemáticos vêm sendo utilizados, baseados na combinação de diversos dados hidrológicos, geotécnicos e de uso e ocupação do solo, sendo os mais consolidados o Sinmap e, principalmente, o Shalstab. No entanto, a suscetibilidade a deslizamento translacional de uma encosta isolada é tradicionalmente analisada com base nas equações do Método dos Taludes Infinitos, que engloba características do solo, como sua profundidade e inclinação do talude, resultando em um fator de segurança.

Neste contexto, este estudo teve como objetivo realizar o mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos rasos na Microbacia do Itacorubi, região central de

Florianópolis, com base na formulação do Método dos Taludes Infinitos (MTI), diretamente em ambiente SIG, considerando o equacionamento com e sem percolação. Ou seja, foram gerados dois mapas por meio da inserção dos fatores de segurança, calculados pelo MTI, para cada unidade geotécnica em intervalos de inclinação do solo de 5°. Ainda, o estudo permitiu um comparativo destes com o mapa de suscetibilidade de Christ (2019), realizado com base no modelo matemático do Shalstab.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Gerar mapas de suscetibilidade a deslizamentos translacionais por meio do Método dos Taludes Infinitos e compará-los a um modelo gerado por meio do Modelo Shalstab.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Obter os resultados dos parâmetros de resistência utilizados por Christ (2014 e 2019) em seus mapeamentos, assim como obter e adaptar os mapas geotécnico e de estabilidade a deslizamentos translacionais da autora;
- Obter os fatores de segurança a deslizamentos translacionais, por meio das equações do Método dos Taludes Infinitos, com base nos parâmetros de resistência do solo, para intervalos de inclinação de 5°.
- Elaborar dois mapas de estabilidade a deslizamentos translacionais para a Microbacia Hidrográfica do Itacorubi, diretamente em ambiente SIG, um considerando a percolação de água no solo e um segundo desconsiderando esta hipótese;
- Realizar uma comparação, quali e quantitativa, das áreas de cada classe de estabilidade apontadas nos mapas produzidos neste estudo e no mapa adaptado de Christ (2019);
- Elaborar um mapa de suscetibilidade a deslizamentos translacionais final, por meio do cruzamento dos três mapas em análise.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção destina-se à apresentação de conceitos e dados relevantes para o entendimento da presente pesquisa, fornecendo embasamento teórico para as seções subsequentes.

2.1 CRESCIMENTO URBANO DESORDENADO

O crescimento urbano de forma acelerada e sem orientação técnica por parte do poder público gera uma série de consequências socioeconômicas para uma cidade. No que se refere aos fatores geotécnicos, é necessário avaliar o direcionamento dos vetores de crescimento para regiões de risco a movimentos de massa. Segundo Higashi (2006), no gerenciamento de uma grande área, a tomada de decisões quanto ao direcionamento da mancha urbana é um processo moroso, o que dificulta a escolha das áreas mais aptas à ocupação. O autor ainda ressalta a importância de se utilizar de um sistema computacional, estruturado com dados geoambientais que agilizem essa análise.

Analisando o cenário de Florianópolis, capital de Santa Catarina, podemos perceber um crescimento populacional nos últimos anos, com forte presença de moradias em locais de alta declividade, inclusive em áreas de preservação permanente (inclinação superior a 30%).

Conforme dados do IBGE, a população de Florianópolis passou de 492.977 em 2018 para 500.973 habitantes em 2019, um crescimento de 1,6%. Se compararmos com a população de 2010 (421.240 habitantes) temos um crescimento de 15,9% em 9 anos, uma média de 1,8% ao ano.

As projeções de população total para Florianópolis em 2050 variam em diversos estudos, indo de cerca de 700.000 habitantes, segundo o Estudo de Crescimento Urbano da Prefeitura Municipal de Florianópolis (2013), até mais de 900.000 habitantes, segundo Campanário (2007) em estudo do Instituto de Planejamento de Florianópolis (IPUF).

Vale ressaltar, ainda, que já na década de 2010, segundo o Estudo de Crescimento Urbano da Prefeitura Municipal de Florianópolis (2013): “na ilha de Santa Catarina, quase toda a porção urbanizável, isto é, sem limitantes físicos a sua

implantação, é ocupada. ” De acordo com esse mesmo estudo, as principais deficiências na região do Núcleo Metropolitano de Florianópolis estão relacionadas com o espraiamento e crescimento urbano desordenado pela falta de regulação fundiária, transformando antigas parcelas agrícolas em solos urbanizados, mas sem reparti-las de maneira adequada e sem respeitar normas de construção. O estudo ressalta que este fator influencia na expansão da mancha urbana em direção a áreas de limitantes e condicionantes urbanísticos.

Para Higashi (2006), a ocupação desordenada das áreas urbanas ocorre, na maioria das vezes, sem qualquer intervenção do poder público. Contudo, em um país como o Brasil, com perspectivas de expansão, é indispensável uma política de planejamento territorial do meio físico que recorra ao uso de mapas. Estes devem possibilitar a interpretação de dados para posteriormente serem utilizados como subsídios ao planejamento regional e urbano.

O autor também enfatiza que atualmente o desenvolvimento urbano ordenado não é suficiente, precisando este ser autossustentável, promovendo equilíbrio entre o que é extraído da natureza e o que deve ser restituído. Entre as ferramentas que fomentam este equilíbrio nos municípios estão o Plano Diretor, a Lei de Uso e Ocupação do Solo e o Código Florestal Brasileiro.

2.2 DESASTRES NATURAIS

Os desastres naturais ocorrem a partir da relação entre o homem e as forças da natureza, sendo que este relacionamento se torna cada vez mais estreitado, intensificado, pela ocupação desordenada e acelerada das áreas urbanas.

Escorregamentos, inundações e secas são exemplos de fenômenos naturais severos, influenciados por características como o tipo de solo e as condições meteorológicas durante o evento. Quando estes fenômenos intensos ocorrem em locais com ocupação humana, resultando em danos materiais e humanos e prejuízos sócio-econômico, são considerados como “desastres naturais” (Kobiyama *et al.*, 2006).

Para Tominaga *et al.* (2009), “quando os fenômenos naturais atingem áreas ou regiões habitadas pelo homem, causando-lhe danos, passam a se chamar desastres naturais. ”

De acordo com Castro (1999), um desastre natural pode ser definido como o resultado de eventos adversos, naturais ou provocados pelo homem, sobre um ecossistema vulnerável, causando danos humanos, materiais e/ou ambientais. Para o autor, “a intensidade de um desastre depende da interação entre a magnitude do evento adverso e o grau de vulnerabilidade do sistema receptor afetado.”

2.2.1 Classificação

Os desastres naturais são classificados, principalmente, quanto à intensidade e à origem. No que se refere à origem, Castro (1999) os divide em três classes:

- Naturais: provocados por fenômenos naturais extremos, que independem da ação humana;
- Humanos: causados pela ação ou omissão humana, como os acidentes de trânsito e a contaminação de rios por produtos químicos;
- Mistos: associados às ações ou omissões humanas, que contribuem para intensificar, complicar ou agravar os desastres naturais.

No que se refere à intensidade, os desastres podem ser classificados em quatro níveis, conforme ilustrado na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 – Níveis de Intensidade de Desastres Naturais.

Nível	Intensidade	Situação
I	Desastre de pequeno porte, onde os impactos causados são pouco importantes e os prejuízos pouco vultuosos.	Facilmente superável com os recursos do município.
II	De média intensidade, onde os impactos são de alguma importância e os prejuízos são significativos, embora não sejam vultuosos.	Superável pelo município, desde que envolva uma mobilização e administração especial.
III	De grande intensidade, com danos importantes e prejuízos vultuosos.	A situação de normalidade pode ser restabelecida com recursos locais, desde que complementados com recursos estaduais e federais.
IV	Com impactos muito significativos e prejuízos muito vultuosos.	Não é superável pelo município, sem que receba ajuda externa. Eventualmente necessita de ajuda internacional.

Fonte: Adaptado de Kobiyama *et al.* (2006) com base em Castro (1999).

Os desastres ainda podem receber classificações quanto à duração (episódicos ou crônicos) e à evolução (súbitos, graduais ou somação de efeitos parciais).

2.2.2 Risco e Perigo

Embora sejam frequentemente utilizados como sinônimos, estes dois termos apresentam definições distintas. O perigo é um fenômeno natural que ocorre em épocas e região conhecidas que podem causar sérios danos nas áreas sob impacto. Enquanto que o risco é a probabilidade de perda esperada para uma área habitada em um determinado tempo, devido à presença iminente de um perigo (UNDP, 2004, *apud* Kobiyama *et al.*, 2006).

Kobiyama *et al.* (2006) cita um exemplo baseado em Ogura e Macedo (2002): um fenômeno atmosférico extremo como um tornado, que costuma ocorrer em uma determinada região (susceptibilidade) e época conhecida, gera uma situação de perigo. Se este se deslocar na direção de uma determinada área povoada, com uma possibilidade real de prejuízos em um determinado período (vulnerabilidade), teremos então uma situação de risco.

2.2.3 Prevenção

As medidas de prevenção à desastres naturais devem promover a minimização dos impactos causados pelos mesmos, uma vez que não se tem a capacidade de evitar que determinados fenômenos naturais ocorram.

Segundo Kobiyama *et al.* (2004), existem basicamente dois tipos de medidas preventivas:

- Estruturais: envolvem obras de engenharia, como as realizadas para a contenção de cheias (barragens, diques, alargamento de rios, reflorestamento). Contudo, tais obras são complexas e caras.
- Não-estruturais: envolvem ações de planejamento e gerenciamento, como sistemas de alerta e zoneamento ambiental.

Com relação às etapas de prevenção, Kobiyama *et al.* (2006) apresenta a Tabela 2:

Tabela 2 – Etapas de Prevenção a Desastres Naturais

Etapas	Classificação por Castro (1999)	Descrição
Pré-evento (Antes)	Prevenção e preparação	Antes de ocorrer os desastres, são realizadas atividades para reduzir os futuros possíveis prejuízos.
Evento (Durante)	Resposta	Durante e logo depois de ocorrência de desastres, são realizadas ações emergenciais, como o levantamento (registro).
Pós-evento (Depois)	Reconstrução	Após os desastres, atua-se na restauração e/ou reconstrução e/ou compensação dos prejuízos.

Fonte: Adaptado de Kobiyama *et al.* (2006) com base em Castro (1999).

No que se refere aos escorregamentos, estes são fenômenos naturais que moldam a superfície terrestre constantemente, mas que podem ser fortemente agravados pelo uso inadequado do solo. Ainda, quanto maior o crescimento populacional, maiores as chances de áreas suscetíveis a escorregamentos serem ocupadas. Os estados brasileiros mais afetados por este fenômeno são: Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais, Espírito Santo, Bahia, Sergipe, Alagoas, Pernambuco e Paraíba (Kobiyama *et al.*, 2006). Quanto às medidas preventivas aos escorregamentos, Kobiyama *et al.* (2006) cita:

- Evitar construir em encostas muito íngremes ou próximo a cursos d'água em vales muito profundos;
- Não efetuar cortes em encostas sem licença da Prefeitura, pois poderá estar contribuindo ainda mais para intensificar o efeito da declividade;
- Entrar em contato com órgãos municipais, estaduais e federais, buscando informações sobre ocorrências escorregamentos em determinada região;
- Exigir estudos sobre a região junto às prefeituras, além de planos de controle e monitoramento das áreas de risco;

- Atentar-se aos boletins meteorológicos e as notícias de rádio e TV de da região. Chuvas intensas podem facilmente desencadear os escorregamentos.

Com o avanço das geotecnologias (SIG, GPS, sensoriamento remoto, etc.), o mapeamento de áreas de risco de escorregamento vem sendo cada vez mais popular (Marcelino, 2003).

2.3 MOVIMENTOS DE MASSA

Os movimentos de massa são processos naturais importantes responsáveis pela constante modificação da superfície terrestre, sendo parte, segundo Tominaga *et al.* (2009), da “evolução geomorfológica em regiões serranas”. Para os autores:

Movimento de massa é o movimento do solo, rocha e/ou vegetação ao longo da vertente sob a ação direta da gravidade. A contribuição de outro meio, como água ou gelo se dá pela redução da resistência dos materiais de vertente e/ou pela indução do comportamento plástico e fluido dos solos.

Os movimentos de massa podem ser classificados de variadas maneiras conforme diversos autores, considerando o material em movimento, a velocidade, geometria dos planos de ruptura, profundidade do solo, teor de água, entre outros fatores. Contudo, para Cruden e Varnes (1996), a cinemática do deslizamento, ou seja, a forma como o movimento se distribui através da massa deslocada, é um dos principais critérios para classificar os deslizamentos de terras. Mais do que isso, para os autores, este é o critério principal para uma resposta apropriada a um deslizamento de terras. Em outras palavras, entender o movimento do solo, classificá-lo pela forma como ele ocorre fisicamente, é a principal ferramenta para definir como contê-lo com segurança.

Uma das classificações mais utilizadas internacionalmente é a descrita por Cruden e Varnes (1996) *apud* Das (2014), na qual os autores distinguem 5 classes de movimento:

- Queda: é o desprendimento do solo e/ou fragmentos de rocha que caem de um talude.

- Tombamento: é o movimento de rotação à frente do solo e/ou de massas rochosas aproximadamente no eixo abaixo do centro de gravidade da rocha que está sendo deslocada.
- Escorregamento: é o movimento descendente da massa de solo que ocorre em uma superfície de ruptura.
- Expansão lateral (ou espalhamento): é uma forma de escorregamento que ocorre por translação. Ocorre pelo movimento súbito de uma fração de areia ou silte recoberta por argila retentora de água ou sobrecarregada por aterro.
- Escoamento: é o movimento descendente da massa de solo de forma similar à de fluidos viscosos.

No que se refere a classificações brasileiras, para Tominaga *et al.* (2009), destacam-se as de Freire (1965), de Guidicini & Nieble (1984) e de Augusto Filho (1992). O último, classifica os movimentos de massa conforme a Tabela 3 abaixo.

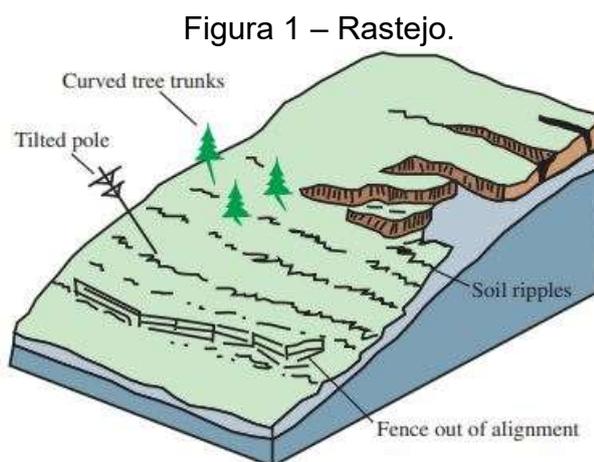
Tabela 3 – Tipos de Movimentos de Massa

Processos	Dinâmica/Geometria/Material
Rastejos	<ul style="list-style-type: none"> - Vários planos de deslocamento (internos); - Velocidades muito baixas (cm/ano) a baixas e decrescentes com a profundidade; - Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes; - Solo, depósitos, rocha alterada/fraturada; - Geometria indefinida.
Escorregamentos	<ul style="list-style-type: none"> - Poucos planos de deslocamento (externos); - Velocidades médias (m/h) a altas (m/s); - Pequenos a grandes volumes de material; - Geometria e materiais variáveis (planares, circulares, em cunha).
Quedas	<ul style="list-style-type: none"> - Sem planos de deslocamento; - Movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado; - Velocidades muito altas (vários m/s); - Material rochoso; - Pequenos a médios volumes; - Geometria variável (lascas, placas, blocos).
Corridas	<ul style="list-style-type: none"> - Muitas superfícies de deslocamento; - Movimento semelhante ao de um líquido viscoso; - Desenvolvimento ao longo das drenagens; - Velocidades médias a altas; - Mobilização de solo, rocha, detritos e água; - Grandes volumes de material; - Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas.

Fonte: Adaptado de Kobiyama *et al.* (2006) com base em Castro (1999).

2.3.1 Rastejo

Para Augusto Filho (1994) *apud* Kobiyama *et al.* (2006), o rastejo (*creep*) é um fenômeno bem lento (cm/ano) e, por isso, sua energia destrutiva é menor que a dos demais tipos. O autor destaca que esse tipo de movimento pode ser facilmente identificado pela mudança na verticalidade das árvores, postes, muros (Figura 1).



Fonte: Cruden e Varnes (1996).

Segundo Tominaga *et al.* (2009) os rastejos são definidos como:

Movimentos lentos e contínuos de material de encostas com limites indefinidos. Envolvem, muitas vezes, grandes volumes de solos, sem que apresente uma diferenciação visível entre o material em movimento e o estacionário.

Para os autores, os rastejos são causados pela ação da gravidade associada aos efeitos das variações de temperatura e umidade, sendo o processo de expansão e contração da massa de material, o provocador do movimento vertente abaixo.

2.3.2 Escorregamentos

Escorregamentos (ou deslizamentos) são movimentos rápidos, com velocidade média a alta, que ocorrem quando uma massa se desloca sobre uma superfície de ruptura definida, no momento em que o Fator de Segurança do talude atinge o valor unitário. Têm as chuvas como principal agente deflagrador. Apresentam alto poder destrutivo e são bastante comuns no Brasil. De acordo com o Centro

Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (2016), os deslizamentos constituem o principal tipo de movimento de massa que o centro monitora e alerta.

Augusto Filho (1994) *apud* Kobiyama *et al.* (2006) destaca que, por ser um fenômeno bastante comum em todo mundo, a sociedade busca entender a dinâmica dos escorregamentos (modelagem) e mapear as áreas de risco, com a intenção de evitar grandes danos e prejuízos.

Tominaga *et al.* (2009) definem os deslizamentos como:

Movimentos rápidos, de porções de terrenos (solos e rochas), com volumes definidos, deslocando-se sob ação da gravidade, para baixo e para fora do talude ou da vertente.

Guidicini e Nieble (1984) explicam que um escorregamento ocorre quando a relação entre a resistência ao cisalhamento do material e a tensão de cisalhamento na superfície potencial de movimentação decresce até atingir uma unidade, no momento da ruptura.

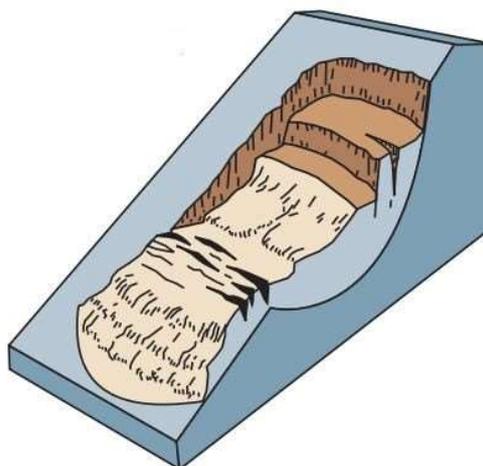
Os autores ressaltam que a velocidade do movimento depende da inclinação da superfície de escorregamento, da origem da movimentação e da natureza do terreno, variando de quase zero a alguns metros por segundo. Os movimentos mais bruscos ocorrem em terrenos relativamente homogêneos, que combinam coesão com elevado atrito interno, apresentando uma superfície de escorregamento mais inclinada.

De acordo com a geometria da superfície de ruptura, os deslizamentos podem ser classificados como rotacionais (ou circulares), translacionais (ou planares) e deslizamentos em forma de cunha.

2.3.2.1 Rotacionais

Quando a superfície de ruptura é curvada (Figura 2) no sentido superior com movimento rotatório em materiais superficiais homogêneos, o deslizamento é classificado como rotacional (Cemaden, 2016).

Figura 2 – Deslizamento Rotacional.



Fonte: Cruden e Varnes (1996).

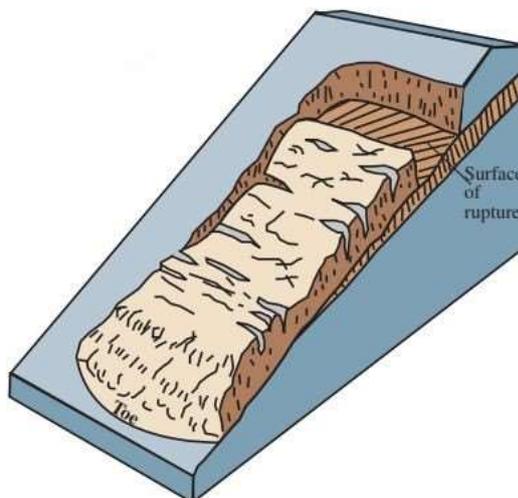
Tominaga *et al.* (2009) expõem que a ocorrência destes movimentos está associada geralmente à existência de solos espessos e homogêneos, como os decorrentes da alteração de rochas argilosas. O início do deslizamento muitas vezes é provocado pela execução de cortes na base destes materiais, como na implantação de uma estrada ou construção de edificações, ou ainda pela erosão fluvial no sopé da vertente (Fernandes e Amaral, 1996; *apud* Tominaga *et al.*, 2009).

Os deslizamentos rotacionais podem ter efeitos desastrosos, como em casos de um deslizamento súbito de solo residual que recobre uma rocha, seja ao longo de uma superfície qualquer ou da própria superfície da rocha.

2.3.2.2 Translacionais

Quando o escorregamento ocorre em uma superfície relativamente plana (Figura 3) e associada a solos mais rasos, é classificado como deslizamento translacional (Cemaden, 2016). É o movimento de massa mais frequente entre todos os tipos.

Figura 3 – Deslizamento Translacional.



Fonte: Cruden e Varnes (1996).

Formam uma superfície de ruptura planar, associada às heterogeneidades dos solos e rochas, como descontinuidades mecânicas e/ou hidrológicas derivadas de processos geológicos, geomorfológicos ou pedológicos (Tominaga *et al.*, 2009).

Esta superfície de ruptura, comumente, encontra-se a uma profundidade de 0,5 a 5,0 m, o que caracteriza os deslizamentos translacionais como rasos, apresentando maior extensão no comprimento.

Ocorrem em encostas tanto de alta como de baixa declividade e podem atingir centenas ou até milhares de metros (Guidicini e Nieble, 1984). Conforme o material transportado, os deslizamentos translacionais podem ser categorizados como de rocha, de solo ou de solo e rocha.

Conforme Tominaga *et al.* (2009) temos:

- Escorregamentos translacionais de rocha: a movimentação se dá em planos de fraqueza que correspondem a superfícies associadas à estrutura geológica, tais como estratificação, xistosidade, falhas, juntas de alívio de tensões e outras.
- Escorregamentos translacionais de solo: os movimentos ocorrem ao longo de uma superfície plana vinculada a alguma feição estrutural do substrato. Ocorrem dentro do manto de alteração, com forma tabular e espessuras variam. Em geral, o movimento é de curta duração, velocidade elevada e grande poder de destruição.

- Escorregamentos translacionais de solo e rocha: a massa transportada pelo movimento apresenta um volume de rocha significativo. O que melhor representa tais movimentos é o deslizamento de massas de colúvio. Os depósitos de colúvio que, usualmente, encontram-se nos sopés das escarpas, são constituídos por blocos rochosos envolvidos em matriz terrosa, provenientes do mesmo processo de acumulação.

O autor também explica que os escorregamentos translacionais, se associados com grande quantidade de água, podem se tornar corridas ou se converter em rastejo, após a acumulação do material movimentado no pé da vertente.

Os deslizamentos translacionais, em geral, ocorrem durante ou logo após períodos de chuvas intensas. A ação da água nestes movimentos é mais superficial e as rupturas ocorrem em curto espaço de tempo, devido ao rápido aumento da umidade durante eventos pluviométricos importantes (Fernandes e Amaral, 1996; *apud* Tominaga *et al.*, 2009).

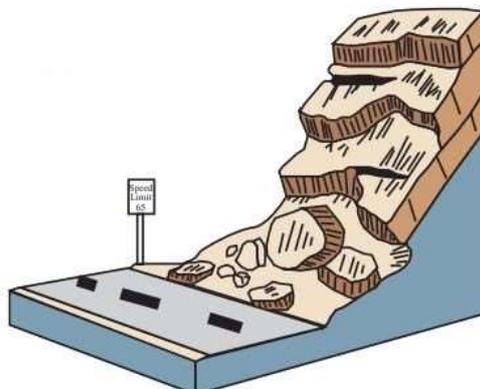
2.3.2.3 Em cunha

Escorregamentos em cunha têm ocorrência mais restrita a regiões que apresentam um relevo fortemente controlado por estruturas geológicas. São associados a maciços rochosos alterados, nos quais a existência de duas estruturas planares, desfavoráveis à estabilidade, condiciona o deslocamento de um prisma ao longo do eixo de intersecção destes planos. Ocorrem sobretudo em taludes de corte ou em encostas que sofreram algum tipo de desconfinamento (Infanti Jr. e Fornasari Filho, 1998; *apud* Tominaga *et al.*, 2009).

2.3.3 Queda

As quedas ocorrem quando um bloco em altura se solta de uma encosta com acentuada inclinação, descendo em alta velocidade (Figura 4).

Figura 4 – Queda de bloco.



Fonte: Cruden e Varnes (1996).

Para Augusto Filho (1994) *apud* Kobiyama *et al.* (2006), as quedas ocorrem quando rochas se desprendem de encostas com inclinação próxima a 90° , num movimento tipo queda livre de alta velocidade (vários m/s). O autor destaca a preocupação necessária com a trajetória dos blocos durante a queda e o rolamento.

Tominaga *et al.* (2009) definem a queda de blocos como uma ação de queda livre partindo de uma elevação, com ausência de superfície de movimentação. Os autores citam o exemplo de lascas de maciços rochosos que são deslocados pelo intemperismo e caem pela ação da gravidade.

Vale ressaltar as diversas possibilidades de alteração no movimento de uma queda, tendo em vista que o bloco em movimento pode rolar encosta abaixo após a queda livre, saltando e se fragmentando a depender do relevo da encosta e da solidez do bloco, o que torna este movimento bastante imprevisível e alvo de estudos de modelagens computacionais. Um exemplo é o modelo tridimensional STONE, proposto por Guzzetti *et al.* (2002).

Guidicini e Nieble (1984) citam causas diversas para as quedas de blocos: variação térmica do maciço rochoso, perda de sustentação dos blocos por ação erosiva da água, alívio de tensões de origem tectônica, vibrações e outras.

2.3.4 Corrida

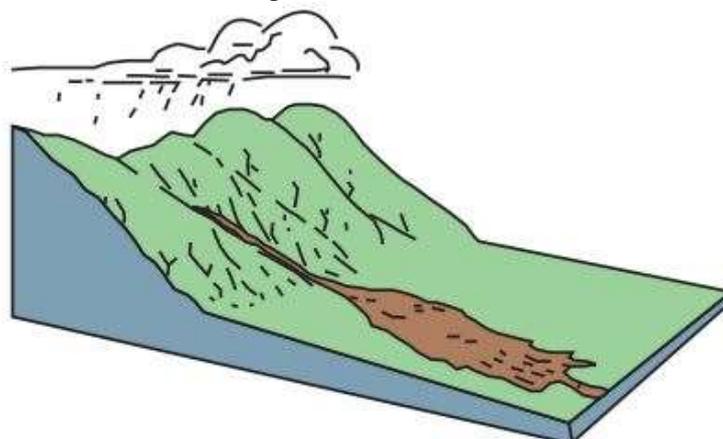
Corridas são formas rápidas de escoamento de caráter fundamentalmente hidrodinâmico. São ocasionadas pela perda de atrito interno das partículas de solo, em virtude da destruição de sua estrutura interna, na presença de excesso de água.

Estes movimentos são gerados a partir de uma grande quantidade de materiais como solo, rocha e árvores que formam uma massa de elevada densidade e viscosidade. A massa deslocada pode atingir grandes distâncias com extrema rapidez, mesmo em áreas pouco inclinadas, com poder destrutivo muito maior que o dos escorregamentos (Guidicini & Nieble, 1984).

Segundo Augusto Filho (1994) *apud* Kobiyama *et al.* (2006), as corridas são movimentos muito rápidos (m/s), devido ao fato do material transportado se comportar como um fluido altamente viscoso. O autor aponta que, apesar de serem mais raras de ocorrer, as corridas produzem estragos maiores que os escorregamentos, uma vez que o fluxo destrói tudo no seu caminho, ou seja, desde a encosta de formação até a planície de deposição.

As corridas podem ser denominadas conforme o material que carregam, como terra, lama ou detritos. Diversos estudos são realizados para tentar antever onde a corrida acontecerá, como este material irá fluir e onde irá se depositar, o que auxilia na implantação de medidas de contenção e na redução dos danos sociais e econômicos.

Figura 5 – Corrida.



Fonte: Cruden e Varnes (1996).

2.4 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO SOLO

A resistência ao cisalhamento é definida pela NBR 6502 (1995) como a “máxima tensão de cisalhamento que o solo pode suportar sem sofrer ruptura”. A norma ainda define a resistência de pico como sendo a resistência ao cisalhamento

máxima que pode ser mobilizada dentro de uma massa de solo, no plano de ruptura, segundo o critério de ruptura adotado.

Das (2014) descreve a resistência ao cisalhamento do solo como sendo a resistência interna por área específica que uma massa de solo consegue oferecer para resistir a rupturas e a deslizamentos ao longo de qualquer plano em seu interior. Os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo são a coesão e o ângulo de atrito interno.

2.4.1 Coesão

A coesão pode ser definida como a resistência aos esforços de cisalhamento que depende, fundamentalmente, da natureza e composição da rocha, ou seja, independe das tensões aplicadas (NBR 6502, 1995). A norma também explica que a coesão é provocada pela atração físico-química entre partículas ou pela cimentação destas. A coesão é parâmetro determinante na resistência de solos finos, como argilas e siltes, sendo fortemente vinculada à consistência desses solos.

A coesão pode ser dividida em aparente e verdadeira, como expõe Sbroglia (2015):

- Coesão aparente: ocorre em solos parcialmente saturados, originada da atração entre os grãos de solo decorrente da presença de meniscos capilares nos contatos entre os grãos (pressão capilar da água). Esta parcela de coesão se dissipa quando o solo é totalmente seco ou saturado.
- Coesão verdadeira: gerada pelas forças eletroquímicas de atração das partículas de argila ou resultante da cimentação.

2.4.2 Ângulo de Atrito

Atrito interno é a parcela da resistência ao cisalhamento de um solo que corresponde à força de atrito desenvolvida no deslizamento entre os grãos e/ou partículas desse solo (NBR 6502, 1995). A norma ainda define o ângulo de atrito interno como o ângulo formado com o eixo das tensões normais pela tangente, em

um determinado ponto da curva envoltória de Mohr, representativa das resistências ao cisalhamento, sob diferentes tensões normais.

Segundo Sbroglia (2015), o ângulo de atrito pode ser descrito como o máximo ângulo que a força cisalhante pode ter com a normal ao plano sem que ocorra deslizamento. A autora ainda explica que o atrito decorre da tendência ao movimento, ocorrendo por deslizamento ou por entrosamento:

- Deslizamento: o atrito é gerado entre as superfícies dos grãos quando um tende a se mover em relação ao outro.
- Entrosamento (ou embricamento): o atrito é causado pelo encaixe entre os grãos do solo.

2.4.3 Critério de Ruptura de Mohr-Coulomb

A teoria de Mohr (1900) afirma que a ruptura de um material ocorre pela combinação das tensões normal e de cisalhamento, e não em razão de tensões máximas isoladamente (Das, 2014). Ou seja, a tensão cisalhante é função da tensão normal em um plano de ruptura, podendo ser expressa conforme apresentado por Das (2014):

$$\tau_f = f(\sigma) \quad (1)$$

A Equação 1 define uma envoltória de ruptura curva. Porém, para a maioria dos problemas de mecânica dos solos, a tensão de cisalhamento em um plano de ruptura pode ser aproximada a uma função linear da tensão normal (Coulomb, 1776; *apud* Das, 2014). Esta função, denominada como critério de ruptura de Mohr-Coulomb, expressa em termos de tensão efetiva, pode ser definida como:

$$\tau_f = c' + \sigma' \cdot \tan \varphi' \quad (2)$$

Onde

c' = coesão com base na tensão efetiva;

φ' = ângulo de atrito interno com base na tensão efetiva;

σ' = tensão normal efetiva no plano de ruptura;

τ_f = resistência ao cisalhamento.

2.4.4 Ensaios para determinação dos parâmetros de resistência

Para estipular os parâmetros c e φ de um determinado solo, é possível se utilizar de correlações empíricas, ensaios em laboratório ou ensaios em campo. A correlação empírica mais utilizada associa os resultados de ensaios SPT (Standard Penetration Test) com valores de coesão e ângulo de atrito.

Já no que se refere à ensaios de laboratório, podemos citar os ensaios de Compressão Triaxial e de Cisalhamento Direto, sendo este último mais comumente utilizado, no que se refere ao estudo de estabilidade de taludes, uma vez que se apresenta como uma opção mais rápida e simples do que o ensaio de Compressão Triaxial.

Com relação a ensaios de campo, Sbroglia (2015) cita como mais utilizados o ensaio de palheta (Vane Shear Test), o ensaio CPT (Cone Penetration Test) e o ensaio pressiométrico ou PMT (Pressiometer Ménard Test). Todavia, o ensaio de campo Borehole Shear Test (BST) vem sendo amplamente utilizado nos estudos realizados pelo Laboratório de Mapeamento Geotécnico (LAMGEO) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), inclusive na pesquisa de Christ (2019), que embasa o presente estudo.

Com base no apresentado, optou-se por detalhar, a seguir, os ensaios de Cisalhamento Direto e Borehole Shear Test.

2.4.4.1 Cisalhamento Direto

O Cisalhamento Direto é um ensaio de laboratório onde um corpo-de-prova, submetido a uma tensão normal, é solicitado até a ruptura pelo deslocamento de uma porção da amostra em relação à outra, segundo um plano de cisalhamento predefinido (NBR 6502, 1995).

Para Das (2014), esta é a forma mais antiga e de arranjo mais simples para o ensaio de cisalhamento. O procedimento busca definir qual a tensão de cisalhamento capaz de provocar a ruptura em uma amostra de solo submetida a uma determinada tensão normal. Partindo deste par de valores de tensão normal e cisalhante, é possível obter um ponto da envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb. Com a realização do ensaio em amostras similares, alterando-se apenas a tensão normal aplicada, é

possível construir a envoltória de ruptura do solo, a partir da qual são obtidos os valores de coesão e ângulo de atrito pelo critério de ruptura de Mohr-Coulomb (Equação 2).

O ensaio de cisalhamento direto se utiliza de uma caixa metálica bipartida, onde é acomodado o corpo de prova, e de duas pedras porosas (inferior e superior) que permitem a drenagem da amostra.

Sbroglia (2015) explica que o ensaio de cisalhamento direto pode ser dividido em dois estágios:

- **Consolidação:** consolida-se o corpo de prova por meio da aplicação de uma tensão normal, que é mantida constante para cada ensaio;
- **Cisalhamento:** com o auxílio de uma máquina de deformação controlada, é imposto um deslocamento controlado à seção inferior da caixa, gerando uma tensão cisalhante que é aumentada, gradativamente, até produzir a ruptura do corpo de prova ao longo do plano de contato entre as duas seções da caixa.

A velocidade que será imposta para a ruptura dependerá do tipo de solo ensaiado, sendo que para ensaios em argila a ruptura deverá ser mais lenta, em razão da baixa permeabilidade, enquanto para areias essa ruptura poderá ocorrer em uma velocidade maior.

Para calcular a estabilidade de um talude que possa vir a inundar-se, é necessário que o ensaio para determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento seja feito em corpos de prova inundados (Sbroglia, 2015). Assim, é possível reproduzir com maior fidelidade a situação real de campo, uma vez que a coesão é especialmente afetada pela presença de água.

Das (2014) alerta que a confiabilidade dos resultados do cisalhamento direto pode ser questionada, uma vez que o ensaio não permite o cisalhamento ao longo do plano mais fraco do corpo de prova, o mesmo é forçado a se romper ao longo do plano de separação da caixa bipartida. Porém, o autor afirma que, apesar de algumas deficiências no processo, este ainda é o ensaio mais simples e econômico, no que se refere a solos arenosos.

Ainda, segundo Carames (2017), o procedimento de coleta de amostras para o ensaio de cisalhamento direto induz a condições não idênticas àsquelas presentes no ambiente natural, o que se deve ao alívio de tensões no volume de solo coletado.

Também, o autor ressalta que, apesar de dita indeformada, é comum que a amostra sofra pequenas deformações, seja no transporte ou manuseio, além de passar por possíveis variações de umidade e temperatura.

2.4.4.2 Borehole Shear Test

O Borehole Shear Test (BST), foi desenvolvido por Richard Handy e associados (Handy and Fox, 1967) na década de 1960 (Bechtum, 2012; *apud* Christ, 2019). Trata-se de um ensaio de cisalhamento de campo que se destaca pela facilidade e rapidez de execução, não necessitando de extração de amostra indeformada e nem de elevado tempo de consolidação. O ensaio vem se mostrando especialmente útil para situações em que há a necessidade de diversos ensaios, como na elaboração de mapas geotécnicos, permitindo cobrir grandes áreas em reduzido tempo.

Para a execução do BST, primeiramente é feita a perfuração no solo com auxílio de um trado pedológico. Em seguida, é inserida a sonda cisalhante, que alcançará a profundidade desejada para o ensaio por meio do encaixe de hastes rosqueáveis. Em teoria, não existe limitação para a profundidade de realização do ensaio, porém, segundo Domingues *et al* (2019), há uma dificuldade em alcançar grandes profundidades em razão do número de hastes rosqueáveis que seriam necessárias e da profundidade máxima que o trado pedológico é capaz de escavar.

Posteriormente, a sonda é expandida lateralmente com uso de uma bomba manual, o que implica na transferência de carga das placas cisalhantes para as paredes do furo. Assim, é aplicada a tensão normal, medida por meio de um manômetro, responsável pela consolidação do solo. Para tal, é necessário aguardar o tempo de consolidação, conforme especificado pelos idealizadores do ensaio.

Este tempo varia de acordo com a granulometria do solo, indo de 5 a 15 minutos. Embora este tempo possa parecer curto, o equipamento já foi assim utilizado, de forma satisfatória, em diversos estudos internacionais. Um exemplo é o estudo de Lutenegger e Timian (1987), que analisam os resultados do BST em uma argila marinha.

Devemos levar em conta, ainda, que Lutenegger e Hallberg (1981) esclarecem que o cisalhamento do solo ocorre diretamente na face do furo. Ou seja,

a superfície de ruptura apresenta uma profundidade mínima de solo. Ainda, vale ressaltar que o efeito de descompressão, fortemente presente quando é retirada uma amostra indeformada de solo, é extremamente reduzido no caso do BST, uma vez que o solo é mantido confinado.

Após a etapa de consolidação, inicia-se o rompimento do solo mediante a extração da sonda a uma velocidade de, aproximadamente, 2 rotações da manivela (no sentido horário) por segundo. A tensão de cisalhamento máxima registrada indica a ruptura por cisalhamento.

Com base na realização do ensaio com, pelo menos, três tensões normais de consolidação diferentes em um mesmo solo, é possível construir a envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb e obter os parâmetros de resistência ao cisalhamento. Idealmente, esses pontos devem ser gerados em um mesmo furo, sendo realizada a rotação da sonda para que o rompimento ocorra em uma face íntegra do furo. Conforme explica Christ (2019), “a cabeça de cisalhamento deve ser removida do furo e as placas limpas antes da próxima aplicação da tensão normal”. A autora ressaltava que, no caso da aplicação de tensões normais de forma progressiva, podem ser realizados até quatro ensaios na mesma profundidade, apenas rotacionando a cabeça de cisalhamento.

Por último, Domingues *et al* (2019) aponta que, de acordo com o manual do equipamento fornecido pela empresa Handy Geotechnical Instruments, se o solo a ser ensaiado tiver mais de 10% de pedregulho, há uma dificuldade em escavar adequadamente o furo para a introdução da sonda cisalhante, além de que as partículas de pedregulho em contato com as placas cisalhantes acabam interferindo negativamente na qualidade dos resultados do ensaio.

No Brasil, o Borehole Shear Test é ainda pouco conhecido e utilizado, uma vez que os únicos equipamentos existentes no país são os adquiridos pelo Laboratório de Mapeamento Geotécnico (LAMGEO) da Universidade Federal de Santa Catarina. O laboratório em questão vem realizando diversos estudos com o equipamento, especialmente para validar a confiabilidade dos seus resultados em comparação a outros ensaios já consolidados. Destacam-se as pesquisas de Sakamoto *et al.* (2014), Contessi (2016), Caraméz (2017), Massocco (2017), Bellina (2017), Sbroglia *et al.* (2018) e Christ (2019).

2.5 FATOR DE SEGURANÇA

Das (2014) apresenta o fator de segurança quanto à resistência como a relação matemática entre a resistência média ao cisalhamento do solo (τ_f) e a tensão média de cisalhamento desenvolvida ao longo da superfície de ruptura (τ_d), conforme ilustrado na Equação 3.

$$F_s = \tau_f / \tau_d \quad (3)$$

Ainda, o fator de segurança pode ser definido, segunda a NBR 11682 (1991), como a relação entre os esforços estabilizantes (resistentes) e os esforços instabilizantes (atuantes) para determinado método de cálculo adotado. A norma também destaca que essa determinação matemática não é o fator de segurança realmente existente, devido à imprecisão das hipóteses e incerteza dos parâmetros do solo adotados.

A NBR 11682 (Estabilidade de Taludes, 1991), também aponta que a avaliação dos parâmetros de segurança, para projetos de taludes que se utilizem de modelos matemáticos, deve atender aos padrões expostos na Tabela 4. Ao atingir o valor unitário, o F_s indica o equilíbrio crítico, ou seja, a encosta está na iminência do deslizamento.

Tabela 4 – Utilização de modelos matemáticos.

Grau de segurança necessário ao local	Padrão: fator de segurança mínimo
Alto	1,50
Médio	1,30
Baixo	1,15

Fonte: Adaptado de NBR 11682 (1991).

2.6 ESTABILIDADE DOS TALUDES INFINITOS

Um talude é dito infinito quando a relação entre suas dimensões, extensão e espessura, for consideravelmente grande. Nesses casos, a superfície potencial de ruptura se apresenta paralela à superfície do terreno, estando o solo sujeito aos chamados deslizamentos translacionais (rasos). De acordo com Guidicini e Nieble

(1984), a camada de solo em contato direto com o leito rochoso geralmente constitui o plano de menor resistência. Segundo Christ (2019), os deslizamentos translacionais envolvem o movimento de uma massa de solo ao longo de uma superfície grosseiramente plana com pouca rotação. Nestes casos, para determinar o Fator de Segurança em relação à ruptura por cisalhamento, é comumente utilizado o Método dos Taludes Infinitos.

2.6.1 Método dos Taludes Infinitos

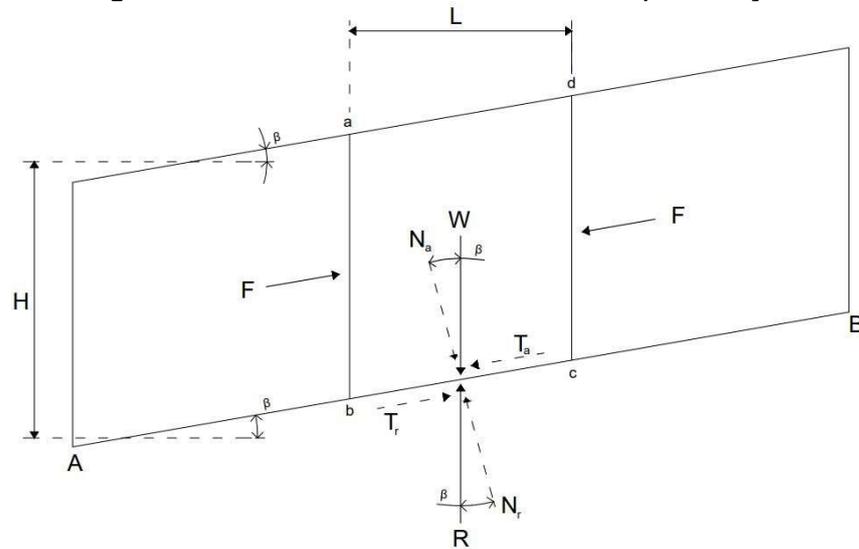
Para Melo e Kobiyama (2018), a teoria do talude infinito se adequa às situações de deslizamentos rasos, em que o comprimento da encosta é muito superior à profundidade de solo, em função do tipo de análise realizada: “um plano infinito de solo sobre um plano inclinado que desconsidera os efeitos provindos do atrito nas laterais e nas extremidades”.

O Método dos Taludes Infinitos se baseia no critério de ruptura de Mohr-Coulomb, expresso na Equação 2, podendo ou não considerar a hipótese de percolação constante de água no solo.

2.6.1.1 Desconsiderando a percolação constante

Presumindo que não ocorra percolação, pode-se adotar que a poropressão no solo seja zero. Considerando o esquema abaixo, vamos avaliar o Fator de Segurança quanto a uma ruptura no plano AB, com base em Das (2014).

Figura 6 – Elemento de solo abcd sem percolação.



Fonte: Adaptado de Das (2014).

O elemento de solo abcd (Figura 6) apresenta profundidade H [m], comprimento perpendicular L [m] e peso W [N], com possível ruptura no plano AB de inclinação β [graus]. As forças F são iguais e contrárias, sendo por isso ignoradas. O peso W é dado pela Equação 4 abaixo:

$$W = \gamma \cdot L \cdot H \quad (4)$$

Onde γ é o peso específico do solo em N/m^3 . Decompondo o peso W em duas forças, uma perpendicular e uma paralela ao plano AB, temos:

$$N_a = \gamma \cdot L \cdot H \cdot \cos \beta \quad (5)$$

$$T_a = \gamma \cdot L \cdot H \cdot \sin \beta \quad (6)$$

Analogamente, a reação ao peso W pode ser expressa por R , decomposta como:

$$N_r = \gamma \cdot L \cdot H \cdot \cos \beta \quad (7)$$

$$T_r = \gamma \cdot L \cdot H \cdot \sin \beta \quad (8)$$

Dividindo as forças citadas pela área da base do elemento de solo, obtemos as tensões normal, cisalhante e resistiva, respectivamente:

$$\sigma' = \gamma \cdot H \cdot \cos^2 \beta \quad (9)$$

$$\tau = \gamma \cdot H \cdot \cos \beta \cdot \sin \beta \quad (10)$$

$$\tau_d = \gamma \cdot H \cdot \cos \beta \cdot \sin \beta \quad (11)$$

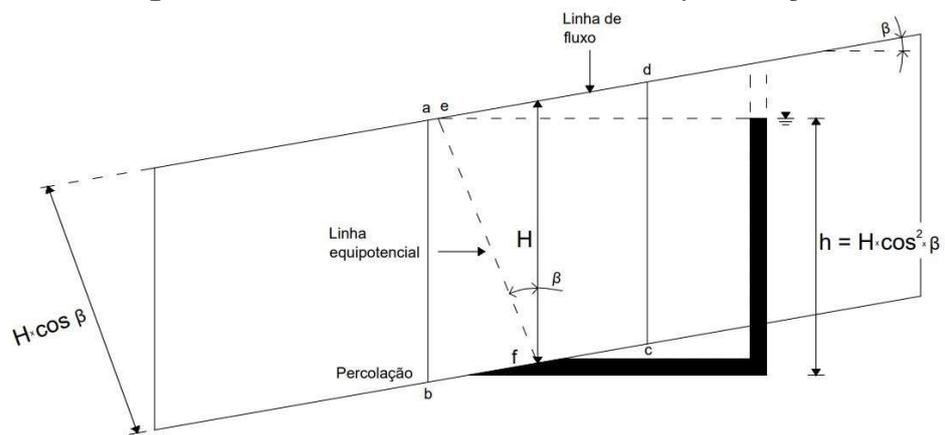
Partindo destas expressões e da equação do F_s apresentada anteriormente, é possível obter a Equação 12:

$$F_s = \frac{c'}{\gamma \cdot H \cdot \cos^2 \beta \cdot \tan \beta} + \frac{\tan \varphi'}{\tan \beta} \quad (12)$$

2.6.1.2 Considerando a percolação constante

De forma análoga ao demonstrado anteriormente, é possível deduzir a equação do Fator de Segurança supondo a ocorrência de um fluxo de percolação no solo e que o lençol freático atinja a superfície do terreno, com base na Figura 7.

Figura 7 – Elemento de solo abcd com percolação



Fonte: Adaptado de Das (2014).

Das (2014) considera que o peso W é dado pela Equação 13, onde γ_{sat} é o peso específico do solo saturado em N/m^3 .

$$W = \gamma_{sat} \cdot L \cdot H \quad (13)$$

Seguindo a linha de cálculo utilizada no tópico anterior, é possível chegar à Equação 14:

$$F_s = \frac{c'}{\gamma_{sat} \cdot H \cdot \cos^2 \beta \cdot \tan \beta} + \frac{\gamma' \cdot \tan \varphi'}{\gamma_{sat} \cdot \tan \beta} \quad (14)$$

Sendo que

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w \quad (15)$$

Onde

γ' = peso específico efetivo do solo;

γ_w = peso específico da água.

2.6.2 Modelo SHALSTAB

Diversos modelos matemáticos relacionados à previsão de escorregamentos foram desenvolvidos para buscar atender às mais diversas situações. Dentre os modelos apontados por Christ (2019), podemos destacar:

- SHALSTAB - Análise de Estabilidade a Deslizamentos Rasos (Dietrich e Montgomery, 1998);
- SINMAP - Mapeamento de Índice de Estabilidade (Pack *et al.*, 1998).

Christ (2019) aponta o Modelo Shalstab como o mais utilizado no mundo, assim como no Brasil, para a análise de estabilidade de taludes infinitos. A autora explica que o Shalstab (Shallow Landslide Stability Analysis) pode ser implementado em linguagem AML (ArcInfo Macro Language), o que permite a sua utilização em softwares de geoprocessamento do tipo ArcInfo.

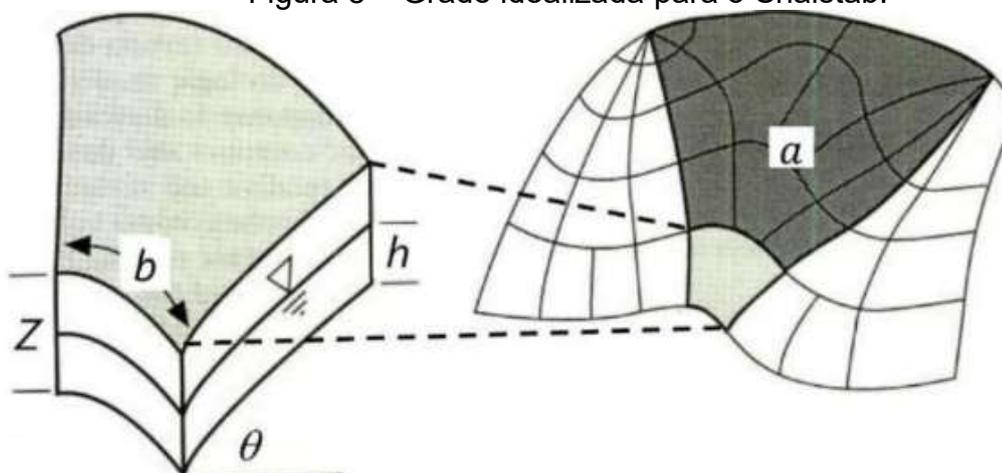
Sbroglia (2015) explica que a fundamentação matemática do SHALSTAB é composta por dois módulos:

- Estabilidade de encosta infinita: combina parâmetros geotécnicos e topográficos para simular o grau de estabilidade de uma determinada porção do solo localizada sobre o afloramento rochoso;
- Hidrológico de estado uniforme: utiliza parâmetros geomorfológicos e hidrológicos para estimar o grau de saturação do terreno.

Gomes (2006) *apud* Sbroglia (2015) aponta que a eficiência do Modelo Shalstab está relacionada ao fato do mesmo não delegar para as técnicas de SIG a definição das áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos rasos, mas sim aos processos hidrológicos e mecânicos, que priorizam o controle topográfico no desencadeamento da ruptura. Segundo Dietrich e Montgomery (1998), o modelo calcula o grau de suscetibilidade a escorregamentos translacionais para cada pixel dentro de uma malha, obtida a partir de um Modelo Digital de Elevação. Essa malha seria composta por elementos como o exemplificado na Figura 8 abaixo (cinza claro), apresentando comprimento (b), área de contribuição (a) onde a chuva que precipita

converge para este elemento, declividade real (θ), profundidade de solo (Z) e altura da coluna de água no subsolo (h).

Figura 8 – Grade idealizada para o Shalstab.



Fonte: Montgomery e Dietrich (1994).

Para Silva (2006) *apud* Christ (2019), é importante mencionar que o modelo tem restrições no que diz respeito à previsão de afloramentos rochosos, falésias, precipícios, áreas de lençol freático profundo e regiões que apresentem camadas espessas de solo.

O SHALSTAB vem se destacando em estudos recentes, tendo sido utilizado por autores como Guimarães (2000), Vieira (2007), Guesser (2013), Reginatto (2013), Michel e Kobiyama (2014), Sakamoto *et al.* (2016), Sbroglia (2015) e Christ (2019).

2.7 SIG

Os SIG's (Sistemas de Informações Geográficas) são softwares que correlacionam informações georreferenciadas a um banco de dados. Christ (2019) explica que os SIG's associam informações espaciais e não espaciais, permitindo uma série de análises e possibilidades de integração de dados.

Dentre as definições de diversos autores, é importante ressaltar:

Um SIG pode ser definido como um sistema destinado à aquisição, armazenamento, manipulação, análise e apresentação de dados referidos espacialmente na superfície terrestre. Portanto, o sistema de informação geográfica é uma particularidade do sistema de informação no sentido amplo. Essa tecnologia automatiza tarefas até então realizadas manualmente e

facilita a realização de análises complexas, através da integração de dados de diversas fontes (BRITO e ROSA, 1996).

O SIG é uma ferramenta que oferece a possibilidade de integrar os dados de diferentes fontes e tipos, assim como sua manipulação. As operações de análise espacial e a possibilidade de visualização dos dados em qualquer tempo, durante todo o processo, fizeram do SIG um poderoso aliado tanto para a análises espaciais como para tomada de decisões (LOCH, 2006).

As aplicações de um SIG são as mais diversas, dentro e fora da engenharia. Christ (2019) cita o uso do software em análises ambientais e de saneamento, implantação de estradas e hidrelétricas, além de planejamento e mobilidade urbana. Higashi (2006) destaca as aplicações de SIG no campo do Mapeamento Geotécnico, que proporcionam a elaboração de mapas temáticos, cartografia geotécnica, modelagem numérica de terrenos para análise de risco, avaliação geotécnica e gerenciamento ambiental, além de possibilitarem análises como um sistema de apoio à tomada de decisões, bem como um sistema de gerenciamento de informações.

Segundo Higashi (2006), uma das características fundamentais do SIG é tratar relações espaciais entre objetos geográficos, como quando se deseja cruzar mapas ou informações espaciais. O autor destaca que, para isso, é necessário que sejam consideradas as relações entre as classes de cada tema, chamadas relações topológicas. Enquanto os mapas correspondem às informações espaciais georreferenciadas (layers), as classes correspondem a objetos geográficos como pontos, linhas ou polígonos (Higashi, 2006).

Ainda no estudo de Higashi (2006), são apontadas duas características principais em um Sistema de Informações Geográficas:

- Possibilitam a integração, em uma única base de dados, de informações geográficas provenientes de fontes diversas (dados cartográficos, imagens de satélites, modelos numéricos do terreno, gráficos em geral).
- Oferecem mecanismos para recuperar, manipular e visualizar estes dados, através de algoritmos de manipulação e análise.

Um software SIG pode operar com arquivos (layers) em formato vetorial e matricial, sendo possível realizar a conversão entre ambos.

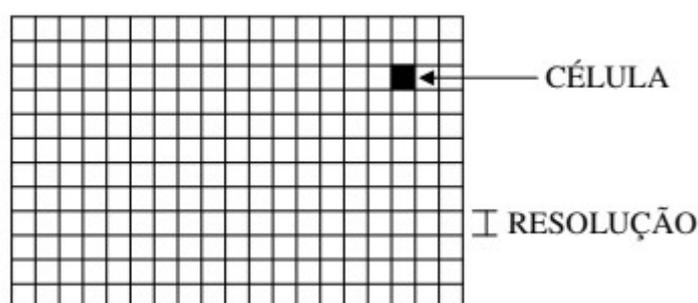
É possível destacar algumas características desses formatos de dados:

- Dados Vetoriais: são pontos, linhas e polígonos, sendo o shapefile o formato mais comum de arquivo. Segundo Christ (2019), os dados

vetoriais são bastante utilizados em estudos de engenharia, pois permitem o atrelamento de dados não espaciais (tabela de atributos) e facilitam o uso de uma infinidade de ferramentas. Higashi (2006) explica que os dados vetoriais possuem registros de informação espacial caracterizados por coordenadas (x,y) em um sistema de coordenadas plano.

- Dados Matriciais: também chamadas de imagens raster, podem corresponder a mapas escaneados, imagens de satélite ou aerofotogramétricas (Christ, 2019). De acordo com Higashi (2006), as estruturas matriciais se utilizam de uma grade regular sobre a qual se representa, célula a célula, o elemento que está sendo retratado (Figura 9).

Figura 9 – Estrutura matricial.



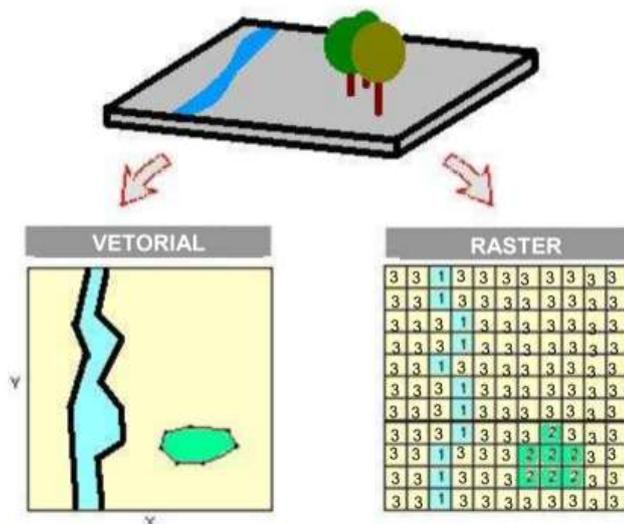
Fonte: Higashi (2006).

A cada célula é atribuído um código referente ao atributo estudado, para que o computador saiba a que elemento ou objeto pertence determinada célula (Higashi, 2006).

No tratamento de dados matriciais, o terreno é visto como uma superfície plana e cada célula corresponde a uma porção do espaço representado. A relação matemática entre o tamanho da célula utilizada e a área real que ela representa resulta na resolução do mapa.

Christ (2019) aponta que, por representar a superfície ponto a ponto, o uso de dados em formato matricial resulta em arquivos maiores. A Figura 10 ilustra uma comparação entre os métodos de representação matricial e vetorial.

Figura 10 – Comparação entre dados vetoriais e matriciais.



Fonte: Novita (2012) *apud* Christ (2019).

Ainda, a Tabela 5 apresenta algumas vantagens da representação de mapas temáticos em meio matricial ou vetorial (Câmara e Monteiro, 2005; *apud* Higashi, 2006).

Tabela 5 – Comparação entre formato vetorial e matricial.

Aspecto	Formato Vetorial	Formato Matricial
Relações espaciais entre objetos	- Relacionamentos topológicos entre objetos disponíveis	- Relacionamentos espaciais devem ser interpixel
Ligação com banco de dados	- Facilita associar atributos a elementos gráficos	- Associa atributos apenas a classes do mapa
Análise, Simulação e Modelagem	- Representação indireta de fenômenos contínuos - Álgebra de mapas é limitada	- Representa melhor os fenômenos com variação contínua no espaço - Simulação e modelagem mais fáceis
Escalas de trabalho	- Adequado tanto a grandes quanto a pequenas escalas	- Mais adequado para pequenas escalas (1:25.000 e menores)
Algoritmos	- Problemas com erros geométricos	- Processamento mais rápido e eficiente
Armazenamento	- Por coordenadas (mais eficiente)	- Por matrizes

Fonte: Adaptado de Câmara e Monteiro (2005) *apud* Higashi (2006).

2.8 MAPEAMENTO GEOTÉCNICO

O mapeamento geotécnico é a metodologia utilizada quando se objetiva espacializar dados referentes à mecânica dos solos em uma determinada região. Zuquette (2004) descreve o mapeamento geotécnico como o processo que busca avaliar e descrever as características dos componentes do meio físico, bem como os possíveis comportamentos frente a diferentes formas de uso do solo, processos naturais e induzidos. Para o autor o mapeamento geotécnico associa diversas áreas de conhecimento às informações geotécnicas. Para Higashi (2006):

O mapeamento geotécnico pode ser definido como uma metodologia, em que sob a forma de um mapa são representadas as principais características geomecânicas do solo, podendo ser utilizado na previsão do comportamento de polígonos de solos chamados de unidades geotécnicas.

Segundo Santos (1997), o mapa geotécnico é um instrumento de gestão territorial, visto que estabelece um zoneamento do solo, subdividindo-o em unidades diferenciadas, segundo critérios relativos ao meio físico. A autora explica que cada unidade geotécnica requer um tratamento específico para seu uso, evitando problemas decorrentes da ocupação inadequada e gerando um desenvolvimento sustentável do meio físico.

Para a elaboração de um mapa geotécnico é preciso reunir cartas de hidrologia, altimetria, divisão política, declividade, e, especialmente, os mapas pedológico e geológico. Partindo destes dados, são realizadas as visitas a campo, para que se possa identificar melhor a delimitação entre as unidades geotécnicas (Christ, 2019).

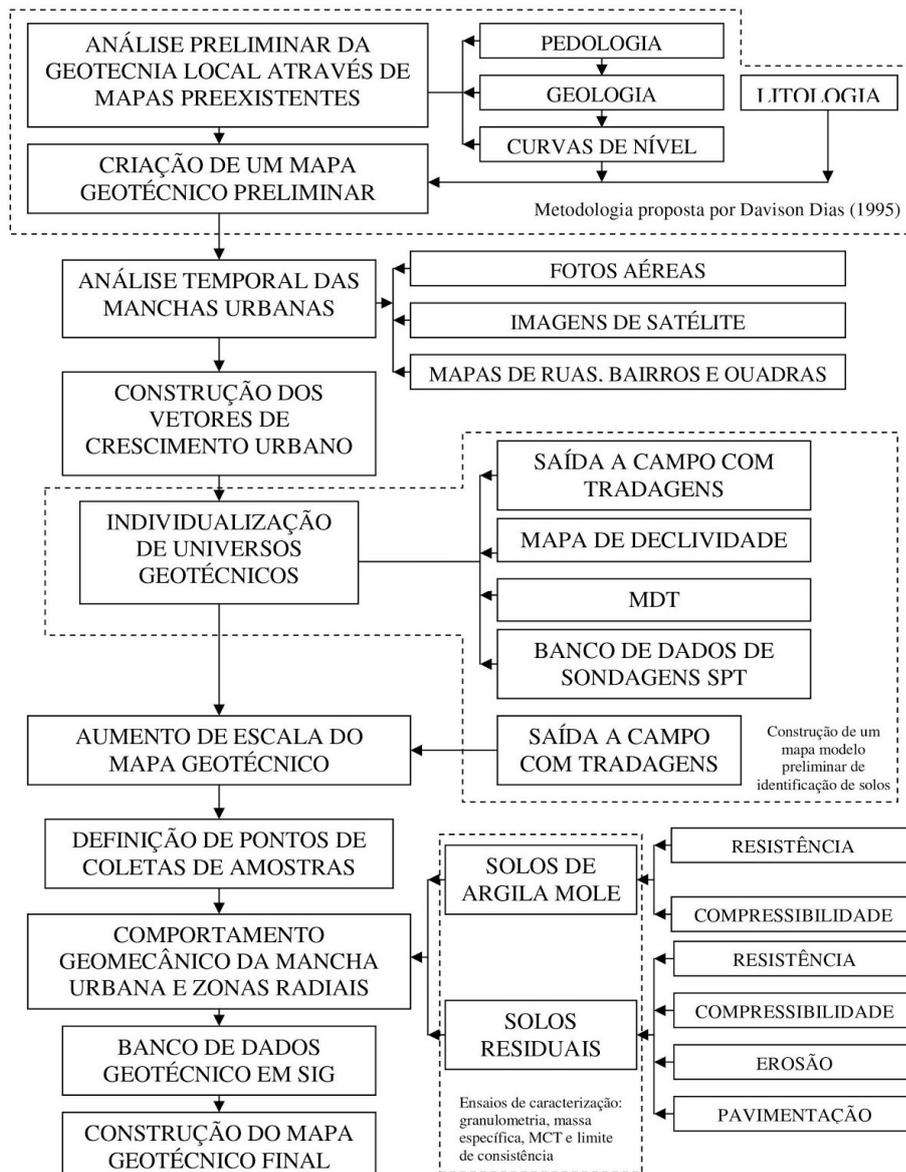
Por meio destas etapas, o mapeamento geotécnico apresenta uma melhor escala, permitindo a definição de pontos de coleta de amostras para a análise do comportamento mecânico dos solos. Higashi (2006) destaca que a utilização da Pedologia como ciência orientadora do mapeamento é uma ferramenta importante no conhecimento das unidades geotécnicas.

Visando descrever os solos brasileiros do ponto de vista geotécnico, as pesquisas de Davison Dias (1985, 1986, 1987, 1989 e 1993) se destacaram por desenvolver uma Metodologia de Mapeamento Geotécnico de Grandes Áreas para solos tropicais. Higashi (2006) resume a metodologia explicando que a mesma se

utiliza, essencialmente, do cruzamento dos mapas geológico e pedológico e de indicações de comportamento do solo, obtendo-se um terceiro mapa de estimativa de comportamento dos solos, o mapa geotécnico.

O autor ressalta que esta técnica de mapeamento é comprovada por diversos trabalhos, estudos e práticas de campo, constituindo a base geotécnica para o desenvolvimento da própria Metodologia de Higashi (2006) para o uso e ocupação dos solos de cidades costeiras brasileiras, através de SIG. O diagrama abaixo ilustra as etapas sugeridas pelo autor, com fundamento na Metodologia de Davison Dias (1995).

Figura 11 – Metodologia de Higashi para Uso e Ocupação do Solo.



Fonte: Higashi (2006).

Ainda, Christ (2019) evidencia a contribuição do mapa geotécnico na elaboração de mapas de suscetibilidade, buscando estabelecer uma relação entre o comportamento mecânico do solo e sua origem e formação.

2.9 MAPA DE SUSCETIBILIDADE

Primeiramente, faz-se necessário esclarecer que um mapa de suscetibilidade difere de um mapa de risco, que se utiliza de metodologias de zoneamento e cadastramento de risco. Chris (2019) explica que os mapas de risco envolvem o estudo do número de moradias e da população exposta a um possível desastre natural, como os deslizamentos, envolvendo probabilidade e focando nas áreas onde a ocupação urbana está presente.

Já os mapas de suscetibilidade não levam em consideração se a área de estudos é ocupada ou não, deixando de englobar a análise de risco à vida da população e avaliando apenas a probabilidade técnica de ocorrência de um determinado fenômeno.

Para Christ (2019), os indicadores presentes em um mapa de suscetibilidade se apresentam de forma qualitativa, estipulando, por exemplo, baixa, média e alta suscetibilidade.

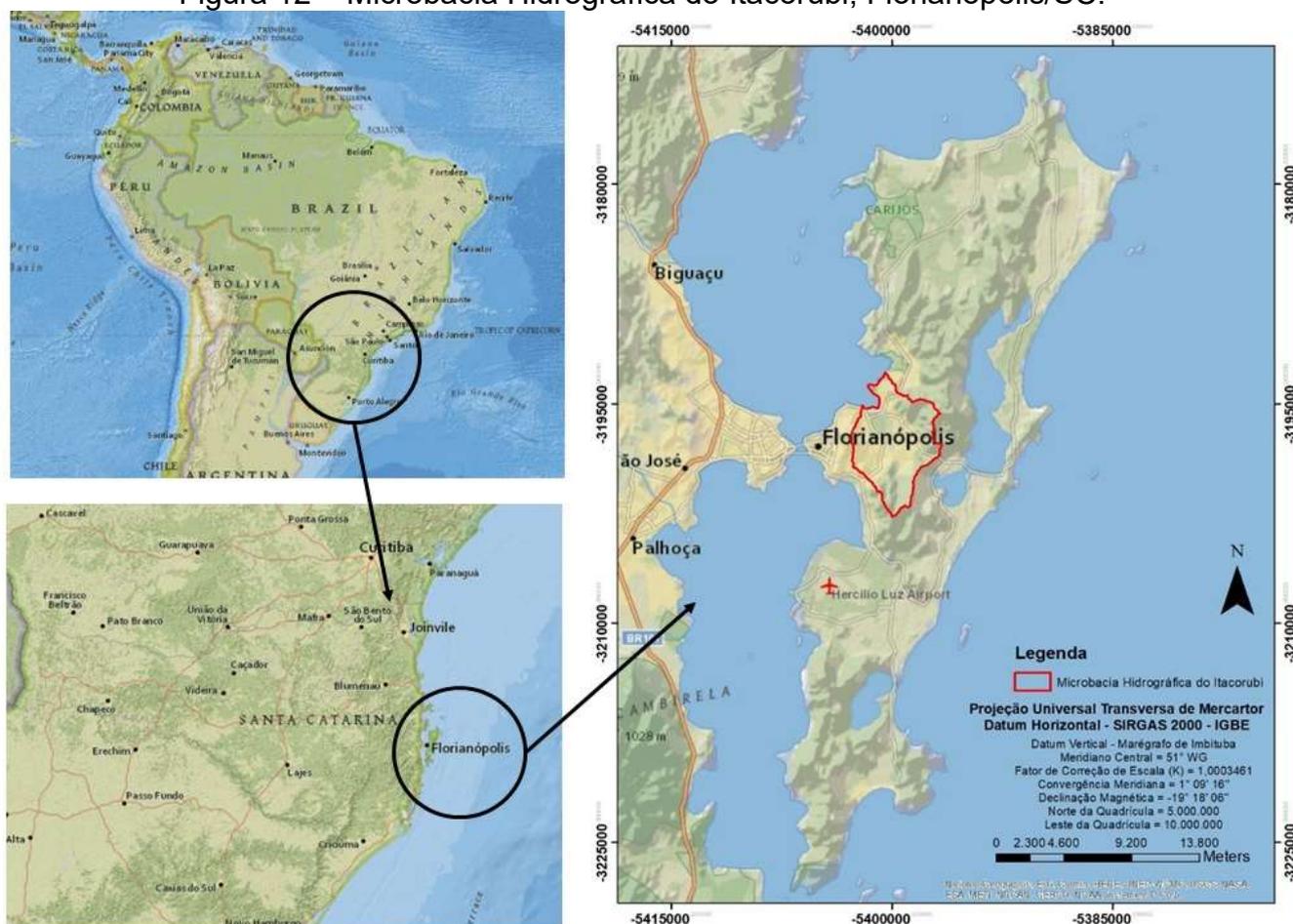
Fell *et al.* (2013) *apud* Christ (2019), explicam o mapa de suscetibilidade a deslizamentos como “uma avaliação quantitativa do tipo, do volume (ou área) e da distribuição espacial de deslizamentos que existem ou potencialmente podem ocorrer em uma área”.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS

3.1 LOCALIZAÇÃO

A Microbacia Hidrográfica do Itacorubi situa-se na região centro-oeste da Ilha de Santa Catarina, porção insular do município de Florianópolis (Figura 12). Encontra-se entre os paralelos $27^{\circ}34'35''$ e $27^{\circ}37'57''$ de Latitude Sul e os meridianos $48^{\circ}28'25''$ e $48^{\circ}33'00''$ de Longitude Oeste.

Figura 12 – Microbacia Hidrográfica do Itacorubi, Florianópolis/SC.



Fonte: Autora (2020).

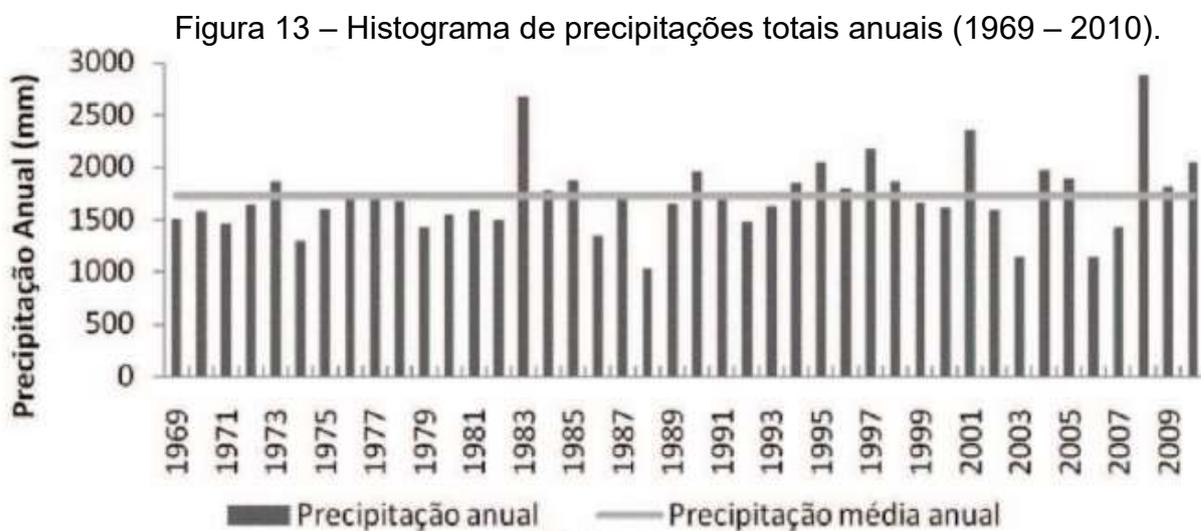
A área da Microbacia abrange os bairros Jardim Santa Mônica, Córrego Grande, Trindade, Parque São Jorge, Itacorubi, João Paulo, Pantanal e Carvoeira, com área aproximada de $26,7 \text{ km}^2$.

3.2 CLIMA

Caraméz (2017) cita que, conforme o Grupo de Gestão do Espaço/UFSC (GGE, 2006), a Microbacia do Itacorubi apresenta clima Mesotérmico Úmido, característico do litoral sul brasileiro. O autor ainda explica que a região conta com estações do ano bem caracterizadas e temperaturas oscilando entre 16°C e 24°C. A Massa Tropical Atlântica se destaca na primavera e verão, e a Massa de Ar Polar Atlântica tem maior presença nos meses de outono e inverno.

O sistema de classificação Köppen classifica a região como clima tropical chuvoso e quente “Af”, com temperatura média superior a 18°C e úmido o ano inteiro, e clima temperado chuvoso e quente “Cfa”, com temperatura média do mês mais quente superior a 22°C e úmido o ano inteiro (CARAMÉZ, 2017).

Na Figura 13, podemos analisar o histograma de precipitações totais anuais para a área de estudos, apresentado por Mulungo (2012). O autor verifica que a média anual de precipitações é de 1722,72 mm, com 35,9% desse valor ocorrendo no verão, 27,3% na primavera, 17,9% no outono e 18,9% no inverno.



3.3 GEOLOGIA

Santos (1997) descreve a geologia da Ilha de Santa Catarina como um conjunto de rochas cristalinas, granitoides e vulcanitos (Ciclo Tectônico Brasileiro), cortados por diques de diabásio, sobrepostos por coberturas sedimentares recentes.

A autora explica que as rochas cristalinas constituem os morros, grosseiramente alinhados na direção Nordeste, que conferem à Ilha um aspecto alongado.

Os morros servem como anteparos para o acúmulo de material sedimentar, muitas vezes derivado deles próprios. Os granitoides afloram sob a forma de matacões de médio e grande porte e lajeados. Já os diques de diabásio apresentam-se geralmente alterados devido ao intemperismo, com direção predominante Nordeste - Sudoeste (SANTOS, 1997).

Os manguezais presentes na região do Itacorubi são descritos por Caruso Jr. (1993) *apud* Santos (1997) como:

Depósitos formados em regiões planas, de desembocadura de rios ou córregos no mar, sendo depósitos sedimentares finos, ricos em matéria orgânica, com ocorrência atual de vegetação gramínea, algas e espécies típicas de dicotiledôneas.

3.4 GEOMORFOLOGIA E RELEVO

Santos (1997) expõe que a Ilha de Santa Catarina, originalmente, tratava-se de um “arquipélago” de rochas cristalinas – atualmente morros. No período Quaternário, esse conjunto de ilhas teria se interligado por meio de formações constituídas por sedimentos marinhos, lacustres, eólicos e fluviais – atualmente planícies.

Silva (2010) explica que a Microbacia Hidrográfica do Rio Itacorubi era uma paleoenseada, situada em uma Ilha isolada, e que fazia parte desse “arquipélago” de origem. A autora também cita que os terrenos cristalinos (embasamentos rochosos) correspondem à Unidade Geomorfológica Serras Litorâneas, constituída de granitos do Complexo Granítico Pedras Grandes, riolitos e diques de diabásio. Nas encostas das elevações cristalinas, predomina o aspecto morfológico das rampas de dissipação colúvio-aluviais.

As áreas sedimentares delimitam o contorno da Microbacia Hidrográfica do Itacorubi fazem parte da Unidade Geomorfológica Planícies Costeiras (SILVA, 2010).

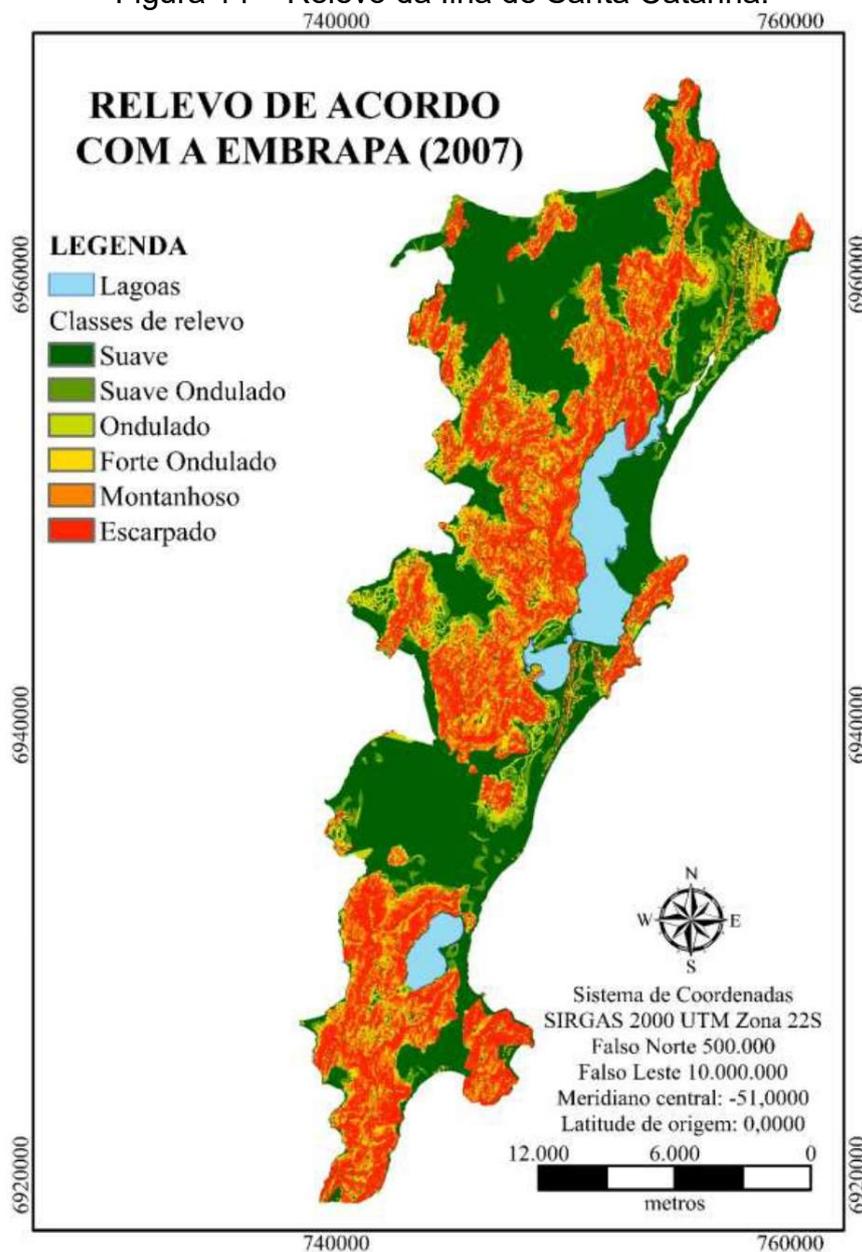
Ainda, com relação ao relevo da Ilha de Santa Catarina, Christ (2019) apresenta a seguinte Tabela 6 com as classes de inclinação presentes na ilha, com base na classificação da Embrapa (2007). A autora também apresenta o Mapa de Relevo da Ilha de Santa Catarina, partindo desta mesma classificação (Figura 14).

Tabela 6 – Áreas conforme classes de inclinação pela Embrapa (2007).

Relevo ou Classe de Inclinação	Inclinação	Área [km ²]	Área [%]
Plano	Até 3%	171,23	42,89
Suave ondulado	Entre 3 e 8%	16,94	4,24
Ondulado	Entre 8 e 20%	17,50	4,38
Forte ondulado	Entre 20 e 45%	37,24	9,33
Montanhoso	Entre 45 e 75%	61,38	15,38
Escarpado	Superior a 75%	94,95	23,78

Fonte: Christ (2019).

Figura 14 – Relevo da Ilha de Santa Catarina.



Fonte: Christ (2019).

3.5 UNIDADES GEOTÉCNICAS

Christ (2019) desenvolveu um mapeamento geotécnico para a Ilha de Santa Catarina, por meio do melhoramento do mapeamento geotécnico de Santos (1997), elaborado de acordo com a metodologia de Davison Dias (1987). Analisando o mapa geotécnico de Christ (2019), apresentado na Figura 15, conforme a área do presente estudo, podemos perceber a presença das seguintes unidades geotécnicas:

- Cambissolo substrato depósito de encostas (Cde)
- Cambissolo substrato granito ilha (Cgi)
- Cambissolo de substrato granito Itacorubi (Cgt)
- Dique de dacito (Dda)
- Dique de diabásio (Ddia)
- Dique de riolito (Dr)
- Gleissolo substrato sedimentos quaternários (Gsq)
- Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato granito Ilha (PVgi)
- Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato granito Itacorubi (PVgt)
- Litossolo de substrato granito Ilha (Rgi)
- Litossolo de substrato granito Itacorubi (Rgt)
- Solos Moles substrato sedimentos quaternários (SMSq)

A unidade Cambissolo de substrato depósito de encostas (Cde) é uma classe de solos minerais não hidromórficos, cuja drenagem varia de acentuada a insuficiente. Os horizontes A e B (incipiente) não contém plintita. O horizonte B pode apresentar argila de atividade alta, caso o material de origem seja o diabásio. Quanto ao relevo, estão localizados na transição entre planícies e morros (SANTOS, 1997).

A unidade geotécnica Cambissolo de substrato granito (Cgi e Cgt), é descrita por Santos (1997) como solos minerais não hidromórficos, bem drenados. Segundo a autora, apresentam sequência de horizonte A e B incipientes, C pouco espesso e R. Apresenta grande número de matações dispersos em seu meio e ocorrem próximos aos topos de morro.

O solo Gleic constitui uma classe de solos hidromórficos com argila de alta atividade, caracterizados pela presença de um horizonte subsuperficial de coloração acinzentada (SANTOS, 1997).

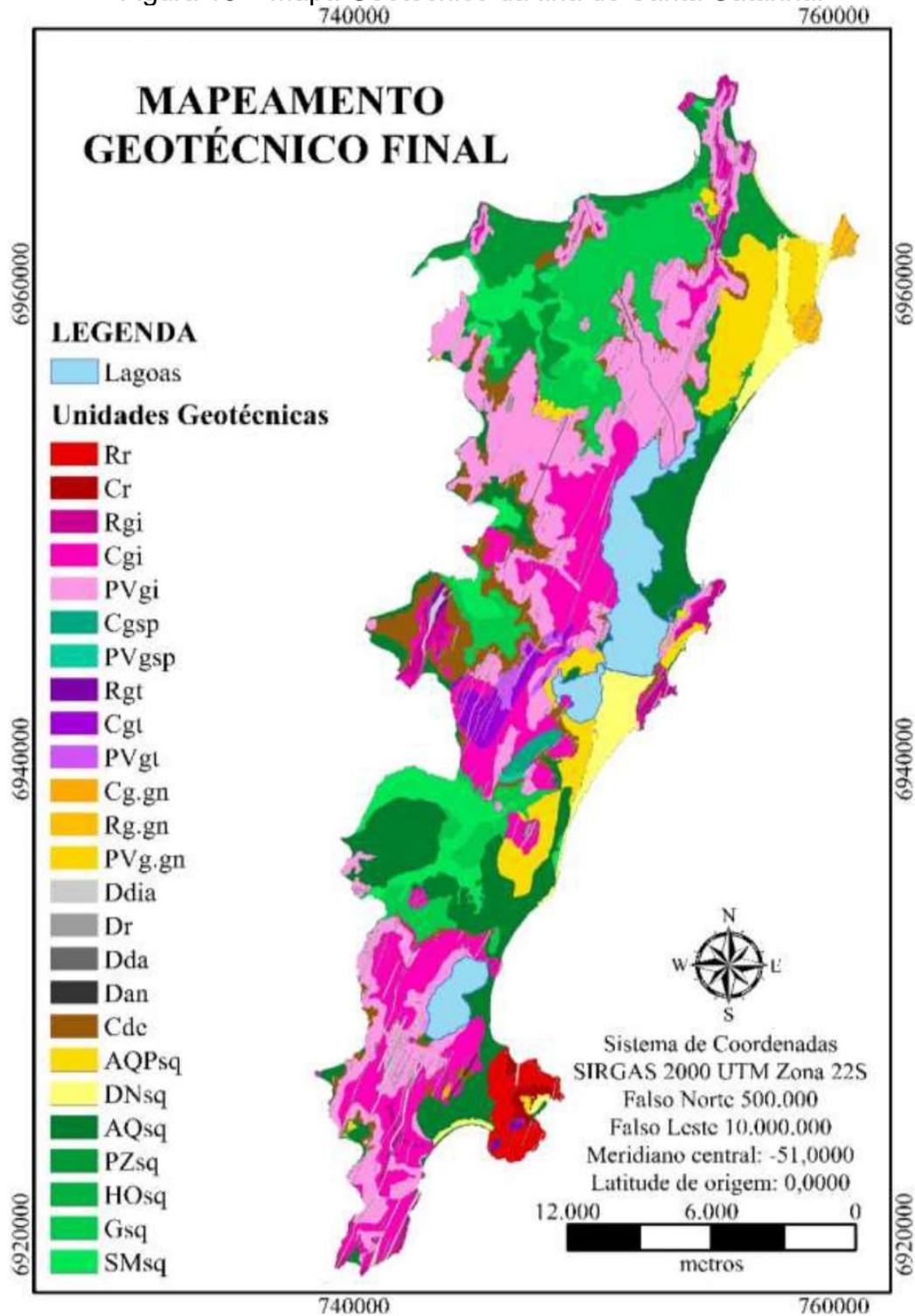
A unidade geotécnica Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato granito ilha (PVgi) apresenta os horizontes A B, C, RA e R. O horizonte A é arenoso em tons de marrom claro, o B tem coloração vermelho amarelada e o C apresenta cores rosadas amareladas, com espessuras que chegam a 25 m e presença de matações (SANTOS, 1997).

A unidade geotécnica Podzólico Vermelho-Amarelo de substrato granito Itacorubi (PVgt) apresenta solos com textura média, mais escuros que o granito Ilha (PVgi). São solos mais argilosos, mais plásticos e mais espessos (SANTOS, 1997).

Santos (1997) explica que as unidades R compreendem os solos litólicos: solos rasos, pouco desenvolvidos, caracterizados pela presença de horizonte A assentado diretamente sobre a rocha matriz ou por afloramentos de rocha.

A unidade Solos Moles substrato sedimentos quaternários (SMsq) abrange solos predominantemente halomórficos (salinos), alagados, ocorrendo nas partes baixas do litoral, diretamente influenciados pelo movimento das marés, sob cobertura vegetal de mangue (SANTOS, 1997).

Figura 15 – Mapa Geotécnico da Ilha de Santa Catarina.

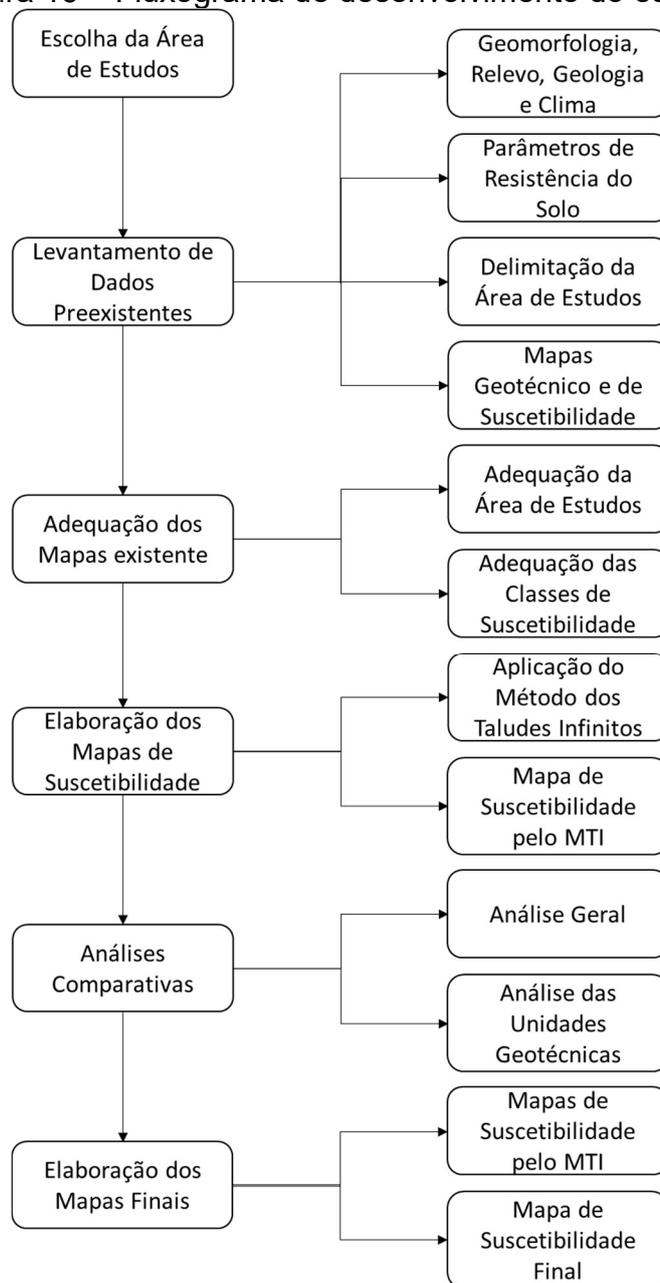


Fonte: Christ (2019).

4 MATERIAIS E MÉTODO

Este capítulo descreve as etapas realizadas neste estudo, assim como as ferramentas utilizadas para atingir os objetivos propostos nesta pesquisa. Ainda, foram apresentados os dados preexistentes necessários para o desenvolvimento dos resultados do presente trabalho. As etapas realizadas podem ser analisadas no fluxograma apresentado na Figura 16.

Figura 16 – Fluxograma de desenvolvimento do estudo.



Fonte: Autora (2020).

4.1 ESCOLHA DA ÁREA DE ESTUDOS

Trata-se da etapa inicial do desenvolvimento do presente estudo, em que foi analisada a disponibilidade de dados preexistentes, como mapa geotécnico recente, ensaios de caracterização do solo na região e estudos correlatos. Optou-se assim pela definição da área de estudos como sendo a Microbacia do Itacorubi, Florianópolis/SC, local presente em diversos estudos recentes, como Christ (2019), Caraméz (2017), Mulungo (2012) e Silva (2010).

Ainda, foi considerado o uso e ocupação do solo de forma desordenada e a importância da região para o município de Florianópolis. Por fim, levou-se em conta a familiaridade da autora com a região em específico, tendo em vista a realização prévia de artigo científico na referida área de estudos.

4.2 LEVANTAMENTO DE DADOS PREEXISTENTES

Para viabilizar os objetivos propostos no presente estudo, nesta etapa fez-se necessário obter dados de estudos anteriores realizados na mesma área de pesquisa. Dentre esses dados, estão os mapas geotécnico e de suscetibilidade a deslizamentos translacionais, além dos parâmetros de resistência e caracterização do solo.

4.2.1 Parâmetros de resistência e caracterização do solo

Os parâmetros de resistência e caracterização do solo para cada unidade geotécnica presente na Microbacia do Itacorubi foram obtidos de Christ (2014 e 2019), estando apresentados na Tabela 7. Estes serão os dados de entrada utilizados no cálculo das Equações 12 e 14 do Método dos Taludes Infinitos.

Christ (2019) explica que determinadas unidades geotécnicas apresentaram área pouco significativa e/ou alta dificuldade de acesso. Sendo assim, a autora optou por agrupá-las a outras unidades considerando a similaridade de comportamento geotécnico. Por isso, podemos notar que as unidades geotécnicas D_{dia}, D_{da} e D_r apresentam os mesmos valores de parâmetros, assim como as unidades R_{gi} e R_{gt}.

Tabela 7 – Dados de entrada para o Método dos Taludes Infinitos.

Unidade Geotécnica	c (kPa)	ϕ (°)	H (m)	γ (N/m³)	γ_{sat} (N/m³)	γ' (N/m³)
Cde	7,89	28,31	13,45	19,10	19,80	9,99
Cgi	11,50	24,09	10,00	15,80	18,50	8,69
Cgt	3,50	29,42	10,00	15,80	18,50	8,69
Ddia, Dda, Dr	5,53	25,77	6,48	15,80	18,50	8,69
PVgi	11,25	27,58	7,34	16,30	17,50	7,69
PVgt	2,70	23,36	7,34	16,30	17,50	7,69
Rgi, Rgt	13,37	22,65	1,00	19,10	19,80	9,99

Fonte: Christ (2014 e 2019).

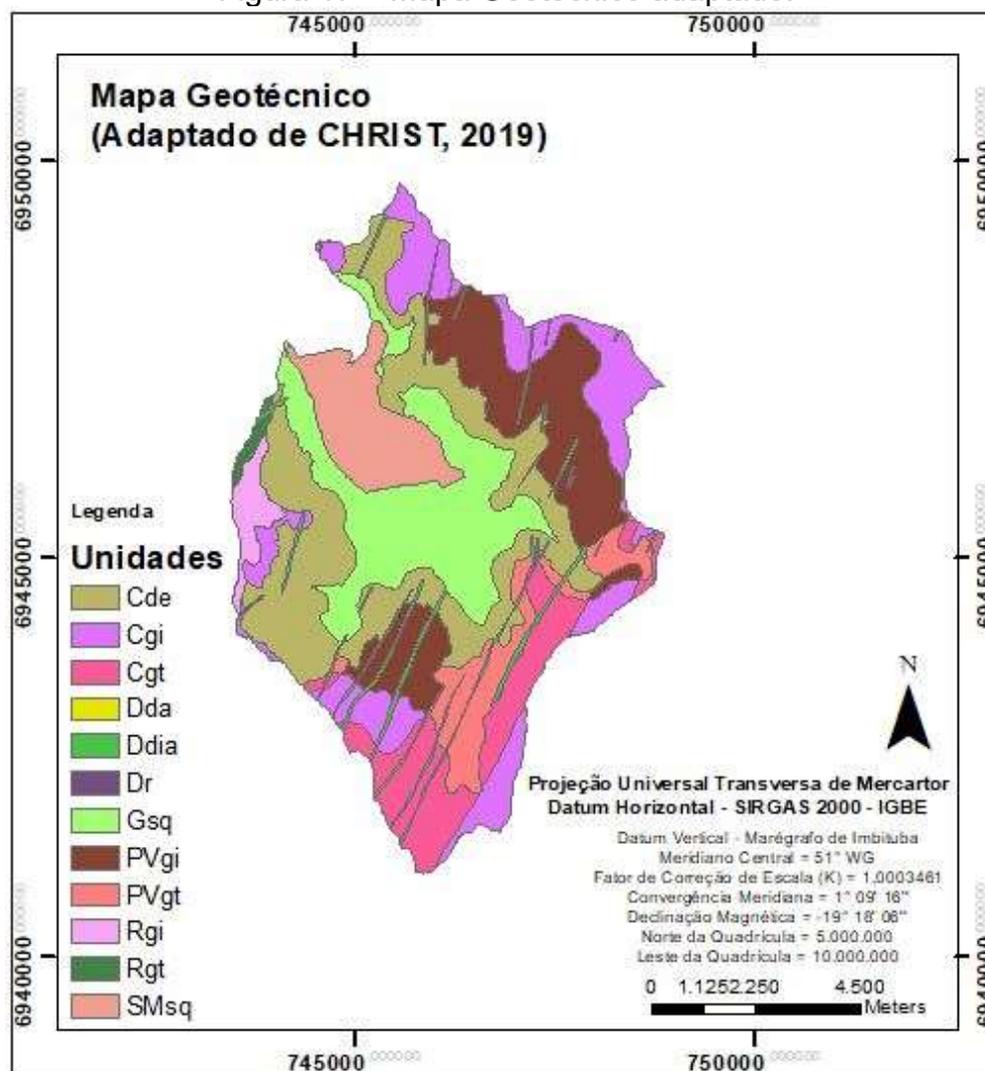
4.2.2 Delimitação da Área de Estudos

Nesta etapa, foram obtidas as curvas de nível da biblioteca de mapas digitais de Santa Catarina, disponibilizada pelo Epagri Ciram. Em seguida, foi delimitada a área do presente estudo através do contorno da Microbacia Hidrográfica do Itacorubi definido por Caramez (2017). Este contorno também será utilizado para realizar o recorte dos demais mapas utilizados neste estudo.

4.2.3 Mapa Geotécnico

Partindo do mapa geotécnico da Ilha de Santa Catarina gerado por Christ (2019), citado anteriormente, foi recortada somente a área em análise no presente estudo, a Microbacia do Itacorubi, a fim de facilitar a visualização das suas unidades geotécnicas (Figura 17).

Figura 17 – Mapa Geotécnico adaptado.



Fonte: Autora (2020), adaptado de Christ (2019).

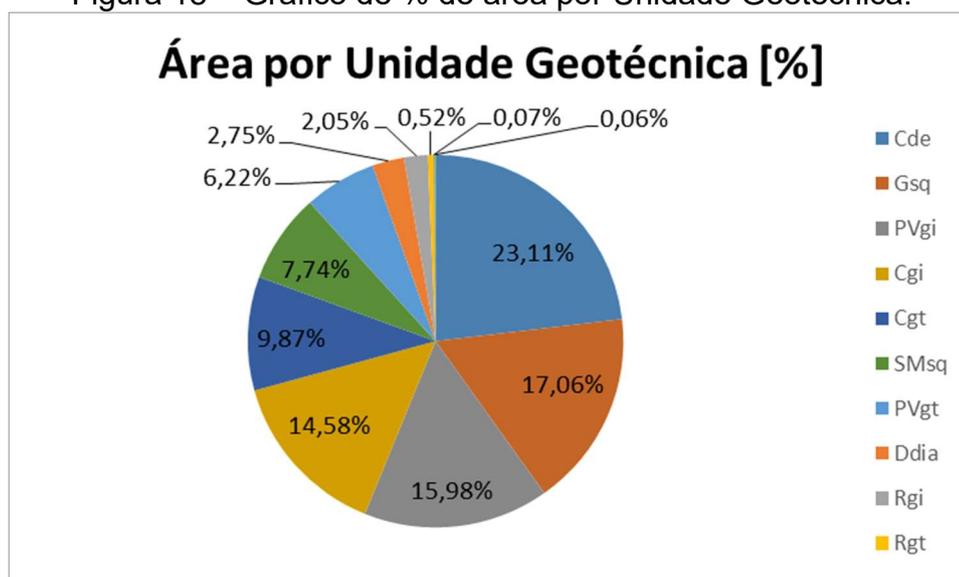
Ainda, podemos analisar por meio da área de cada uma dessas doze unidades, que a presença predominante é do Cambissolo substrato depósito de encostas (Cde), seguido pelo Gleissolo substrato sedimentos quaternários (Gsq), conforme descrito na Tabela 8 e ilustrado no gráfico da Figura 18:

Tabela 8 – Área por unidade geotécnica.

Unidade Geotécnica	Área [m ²]	Área [%]
Cde	6172295,2	23,11%
Gsq	4555117,2	17,06%
PVgi	4265846,5	15,98%
Cgi	3893012,3	14,58%
Cgt	2634685,4	9,87%
SMSq	2066314,5	7,74%
PVgt	1660755,4	6,22%
Ddia	733881,3	2,75%
Rgi	547273,6	2,05%
Rgt	140097,1	0,52%
Dda	17894,4	0,07%
Dr	15991,6	0,06%
Área Total	26,7 km ²	

Fonte: Adaptado de Câmara e Monteiro (2005) *apud* Higashi (2006).

Figura 18 – Gráfico de % de área por Unidade Geotécnica.

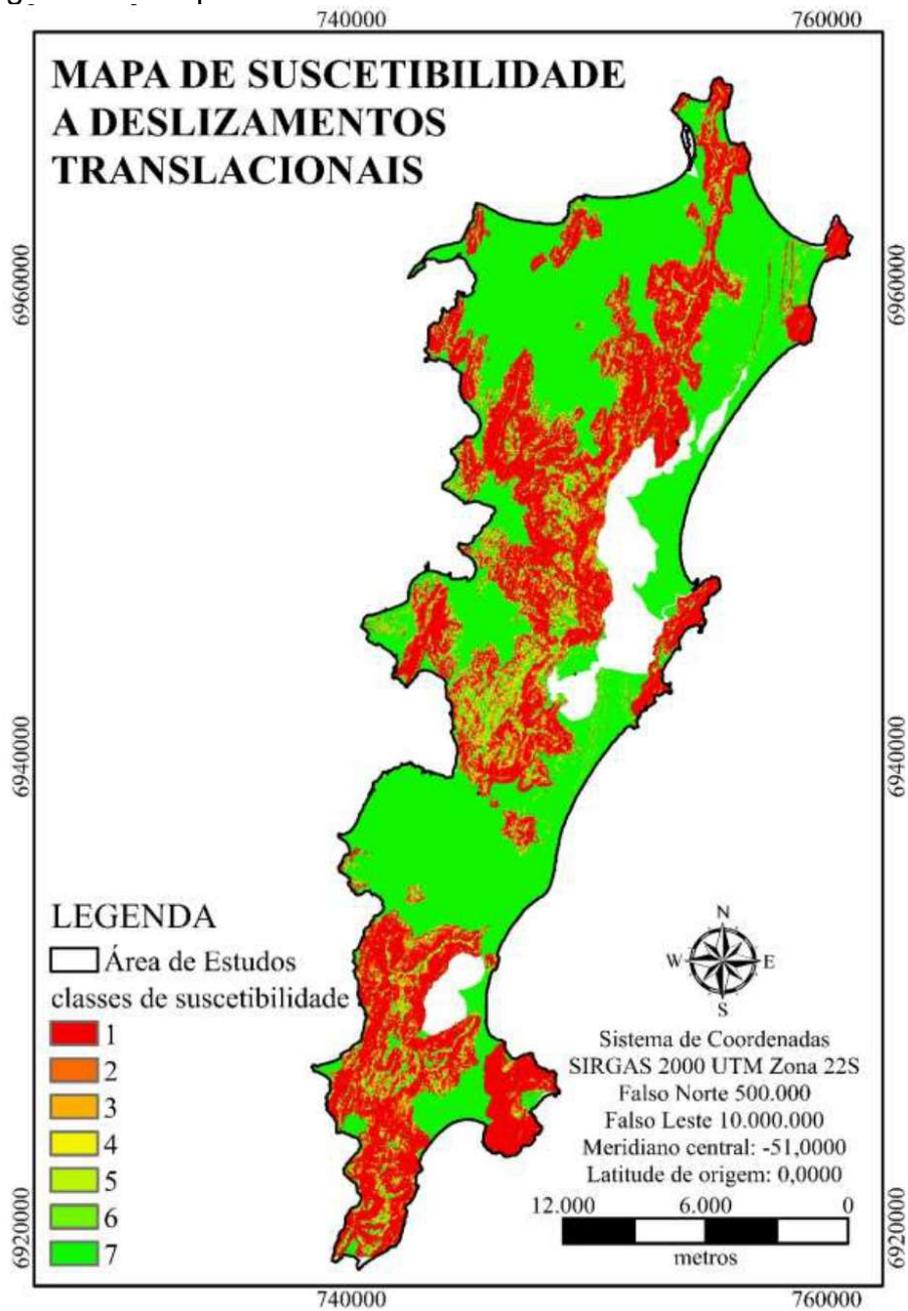


Fonte: Autora (2020).

4.2.4 Mapa de Suscetibilidade a Deslizamentos Translacionais pelo Modelo SHALSTAB

Para fins de comparação com os mapas a serem gerados no presente estudo, com base no Método dos Taludes Infinitos, foi utilizado o mapa de suscetibilidade a deslizamentos translacionais de Christ (2019), elaborado com base no modelo SHALSTAB (Figura 19).

Figura 19 – Mapa de suscetibilidade a deslizamentos translacionais.



Fonte: Christ (2019).

De forma semelhante ao mapa geotécnico, o mapa de suscetibilidade a deslizamentos translacionais também foi adaptado para a exibição somente da área de estudos em questão.

4.3 ADEQUAÇÃO DAS CLASSES DE SUSCETIBILIDADE

O mapa de suscetibilidade de Christ (2019), elaborado por meio do Modelo SHALSTAB, apresenta 7 classes de suscetibilidade. Já no mapa elaborado no presente estudo, foram definidas 4 classes de suscetibilidade de acordo com os Fatores de Segurança estipulados na NBR 11682, conforme exposto na Tabela 9.

Tabela 9 – Classes de estabilidade conforme Fator de Segurança.

Fator de Segurança	Classe de Estabilidade
$FS \geq 1,5$	Estável
$1,5 > FS \geq 1,3$	Baixa Instabilidade
$1,3 > FS \geq 1,15$	Média Instabilidade
$1,15 > FS$	Alta Instabilidade

Fonte: Adaptado da NBR 11682 (1991).

Sendo assim, fez-se necessário adaptar estas classes de suscetibilidade em ambos os mapas, possibilitando uma análise comparativa entre os mesmos. As classes adotadas para esta comparação foram denominadas como A (maior estabilidade), B (media estabilidade) e C (maior instabilidade).

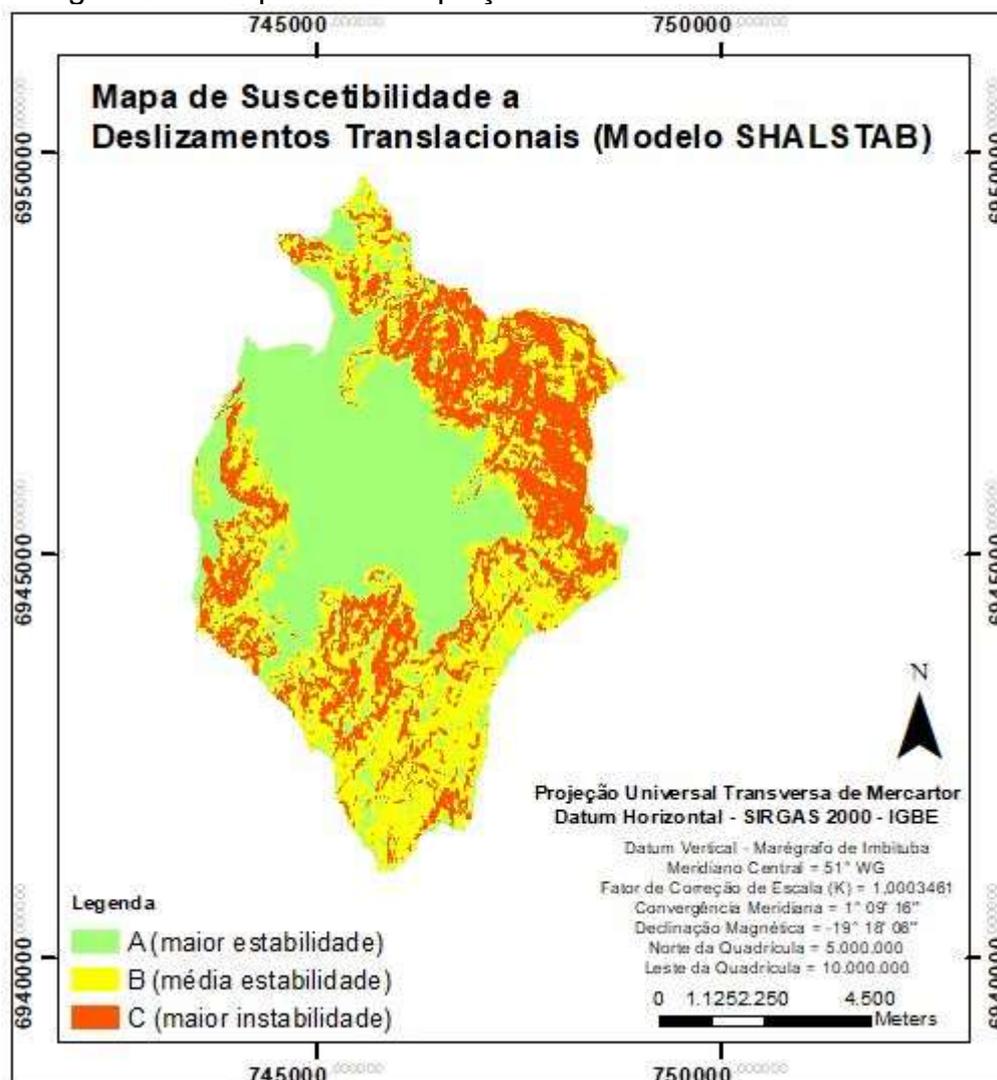
O mapa elaborado no presente estudo, teve suas duas classes intermediárias (Baixa e Média Instabilidade) unificadas na classe B, mantendo suas classes de maior e menor suscetibilidade inalteradas.

Para o mapa de Christ (2019), foi utilizada a adaptação já realizada pela autora em seus estudos:

“Para a definição do mapa final de suscetibilidade a deslizamentos de encostas foram cruzadas as informações obtidas dos mapeamentos a deslizamentos rasos e profundos. O mapa de deslizamentos translacionais foi adaptado para três classes, sendo que a classe mais suscetível (classe 1) e a classe menos suscetível (classe 7) foram mantidas, enquanto que as classes intermediárias foram unificadas. “

A terminologia final empregada pela autora adota 3 classes de suscetibilidade a deslizamentos translacionais, sendo a classe 1 a menos suscetível e a classe 3 a mais suscetível. No presente estudo, estas classes passam a ser denominadas como A e C, respectivamente, conforme podemos visualizar no mapa da Figura 20.

Figura 20 – Mapa com adequação das classes de suscetibilidade.



Fonte: Autora (2020), adaptado de Christ (2019).

Para fins de análise comparativa, foram obtidas as áreas de cada uma destas 3 classes de suscetibilidade na bacia em estudo, assim como em cada unidade geotécnica apresentada.

4.4 APLICAÇÃO DO MÉTODO DOS TALUDES INFINITOS

Nesta etapa, foi elaborada uma planilha em software Excel, permitindo o cálculo dos Fatores de Segurança através das equações do Método dos Taludes Infinitos, com e sem percolação (Equações 12 e 14).

O cálculo foi realizado separadamente para cada unidade geotécnica. Os parâmetros de resistência e caracterização do solo de Christ (2014 e 2019), apresentados anteriormente, foram utilizados como dados de entrada na planilha.

Para a inclinação do terreno (β), optou-se por definir intervalos de 5 em 5 graus de inclinação, adotando-se o limite superior para o cálculo do Fator de Segurança de cada um desses intervalos.

4.5 MAPAS DE SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS TRANSLACIONAIS PELO MÉTODO DOS TALUDES INFINITOS

Como já citado, optou-se neste estudo por desenvolver dois mapas de suscetibilidade à deslizamentos translacionais, um considerando a presença de percolação no solo e o outro desconsiderando esta possibilidade.

Partindo das curvas de nível, foi gerado um mapa de declividades, com classes de 5 em 5 graus de inclinação, posteriormente fragmentado conforme as unidades geotécnicas apresentadas na área de estudos. A resolução utilizada foi de 1x1m por pixel.

Então, foram inseridos os valores de Fator de Segurança, com e sem percolação, obtidos pelo Método dos Taludes Infinitos, na Tabela de Atributos do mapa em questão.

Após a inserção destes valores no sistema SIG, foi feita a classificação destes Fatores de Segurança conforme as classes de suscetibilidade definidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (1991).

Visando analisar os mapas gerados em comparação com o mapeamento adaptado de Christ (2019), foi feita a readequação destas classes de suscetibilidade, conforme apresentado no tópico anterior. Por fim, foram calculadas as áreas de cada classe para cada mapa e, especificamente, para cada unidade geotécnica.

4.6 MAPA DE SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS TRANSLACIONAIS FINAL

Por fim, para que se obtivesse um mapa de suscetibilidade a deslizamentos translacionais que combinasse os resultados de todos os três mapas analisados, foi elaborado um mapa final. Para tal, foi realizado o cruzamento dos três mapas, gerando

um mapa final em que cada área apresentava três classes de suscetibilidade, uma segundo cada metodologia. A classe final adotada para cada área foi sempre a de maior suscetibilidade.

Com isso, foi possível analisar a porcentagem da área da microbacia hidrográfica que se encontrava na mesma classe de suscetibilidade em todos os três mapas. Ainda, foi realizada essa análise também considerando apenas os mapas produzidos pelo Modelo SHALSTAB e pelo MTI com percolação.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, estão apresentados os resultados obtidos por meio da metodologia apresentada anteriormente, com base na revisão bibliográfica citada. São eles:

- Fatores de Segurança obtidos pelo Método dos Taludes Infinitos (MTI), com e sem considerar a percolação de água no solo;
- Mapas de Suscetibilidade a Deslizamentos Translacionais, pelo Método dos Taludes Infinitos, com e sem percolação;
- Adequação das classes de suscetibilidade dos mapas gerados;
- Análise comparativa das áreas de cada classe de suscetibilidade entre os mapas gerados e mapa de Christ (2019).

5.1 APLICAÇÃO DO MÉTODO DOS TALUDES INFINITOS

As análises com base no método de estabilidade de taludes infinitos resultaram no exposto na Tabela 10 (sem percolação) e na Tabela 11 (com percolação).

Tabela 10 – Fatores de Segurança resultantes (sem percolação).

β (°)	Cde	Cgi	Cgt	Ddia, Dda, Dr	PVgi	PVgt	Rgi, Rgt
5	6,51	5,95	6,70	6,14	7,05	5,20	12,83
10	3,23	2,96	3,33	3,05	3,51	2,58	6,46
15	2,13	1,96	2,19	2,02	2,33	1,70	4,36
20	1,58	1,45	1,62	1,49	1,73	1,26	3,32
25	1,24	1,15	1,27	1,18	1,37	0,99	2,72
30	1,00	0,94	1,03	0,96	1,12	0,80	2,34
35	0,83	0,79	0,85	0,80	0,95	0,66	2,09
40	0,70	0,68	0,72	0,69	0,81	0,56	1,92
45	0,60	0,59	0,61	0,59	0,71	0,48	1,82
50	0,51	0,52	0,52	0,51	0,63	0,41	1,77
c (kPa)	7,89	11,50	3,50	5,53	11,25	2,70	13,37
ϕ (°)	28,31	24,09	29,42	25,77	27,58	23,36	22,65
γ (N/m³)	19,10	15,80	15,80	15,80	16,30	16,30	19,10

Fonte: Autora (2020).

Tabela 11 – Fatores de Segurança resultantes (com percolação).

β (°)	Cde	Cgi	Cgt	Ddia, Dda, Dr	PVgi	PVgt	Rgi, Rgt
5	3,45	3,12	3,25	3,12	3,63	2,41	10,18
10	1,71	1,55	1,61	1,56	1,81	1,20	5,14
15	1,13	1,03	1,06	1,03	1,21	0,79	3,49
20	0,84	0,77	0,79	0,77	0,90	0,59	2,68
25	0,66	0,61	0,62	0,61	0,72	0,46	2,21
30	0,54	0,51	0,50	0,50	0,60	0,38	1,92
35	0,45	0,43	0,42	0,42	0,51	0,32	1,74
40	0,38	0,38	0,35	0,36	0,45	0,27	1,62
45	0,33	0,33	0,30	0,32	0,40	0,23	1,56
50	0,29	0,30	0,26	0,28	0,37	0,20	1,55
c (kPa)	7,89	11,50	3,50	5,53	11,25	2,70	13,37
ϕ (°)	28,31	24,09	29,42	25,77	27,58	23,36	22,65
γ (N/m³)	19,10	15,80	15,80	15,80	16,30	16,30	19,10

Fonte: Autora (2020).

Analisando as Tabelas 10 e 11, podemos notar que as unidades Rgi, Rgt e PVgi apresentam os maiores fatores de segurança. Este fato mostra-se coerente com os valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento, apresentados na Tabela 7, dos quais podemos destacar as seguintes observações:

- As unidades Rgi e Rgt apresentam o maior valor de coesão (13,37 kPa) dentre as unidades geotécnicas da área de estudos, maior valor de peso específico (19,10 N/m³) e a menor profundidade média do solo (1m), o que resulta em fatores de segurança bastante acima dos valores das outras unidades.
- A unidade PVgi, embora apresente o menor peso específico (15,80 N/m³), apresenta um valor de coesão ainda alto (11,25 kPa) em comparação as demais unidades, a terceira menor profundidade de solo (7,34m) e o segundo maior ângulo de atrito (27,58°), o que resulta em fatores de segurança não tão expressivamente maiores que os das demais unidades geotécnicas.

5.2 MAPA DE SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS TRANSLACIONAIS PELO MÉTODO DOS TALUDES INFINITOS

A seguir, são apresentados os mapas de suscetibilidade a deslizamentos translacionais, elaborados por meio do Método dos Taludes Infinitos em ambiente SIG, conforme metodologia apresentada.

5.2.1 Sem percolação

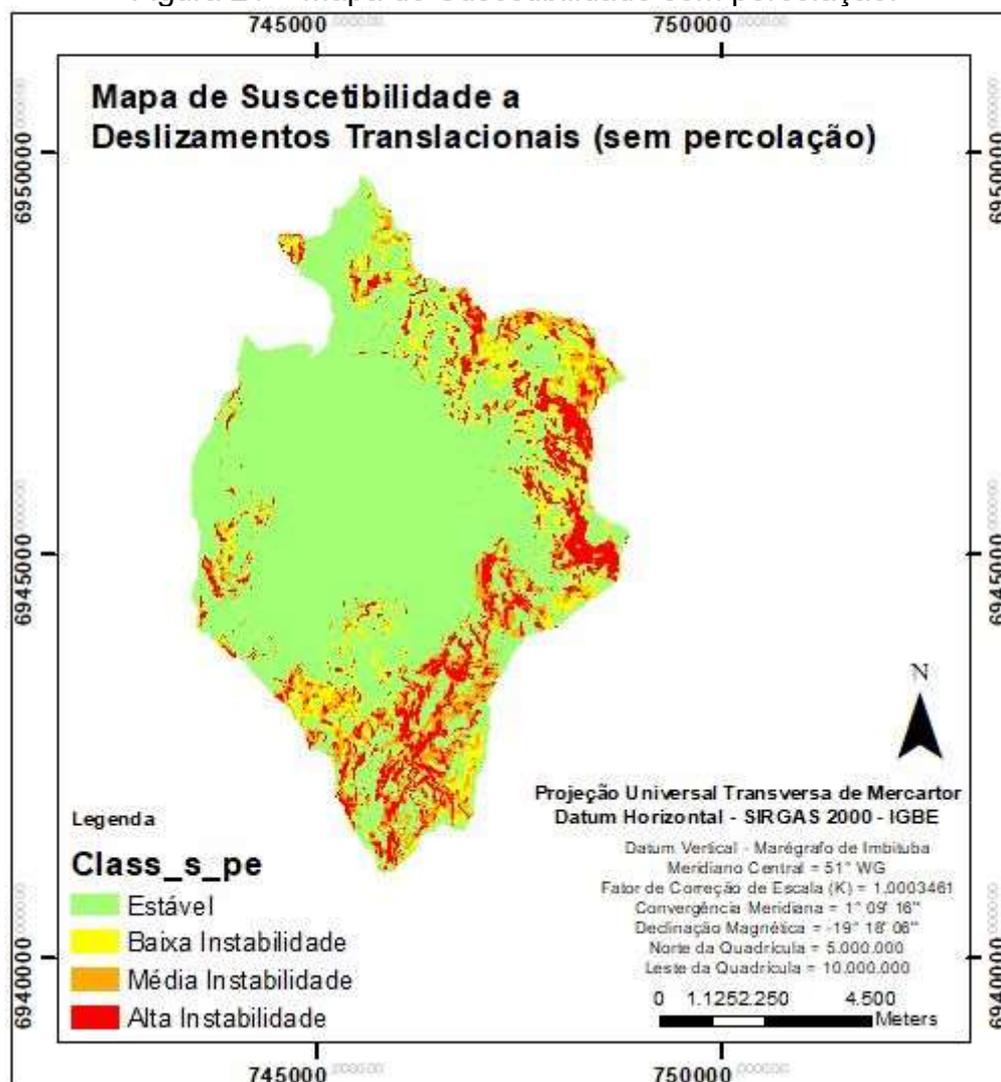
Partindo dos valores da Tabela 10, obteve-se o mapa apresentado na Figura 21 com as 4 classes de suscetibilidade da NBR 11682. As áreas de cada classe estão apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Distribuição de área por classes.

Classe de Suscetibilidade	Área [km²]	Área [%]
Alta Instabilidade	2,77	10%
Média Instabilidade	2,47	9%
Baixa Instabilidade	2,31	9%
Estável	19,14	72%
Área Total	26,70	100%

Fonte: Autora (2020).

Figura 21 – Mapa de Suscetibilidade sem percolação.



Fonte: Autora (2020).

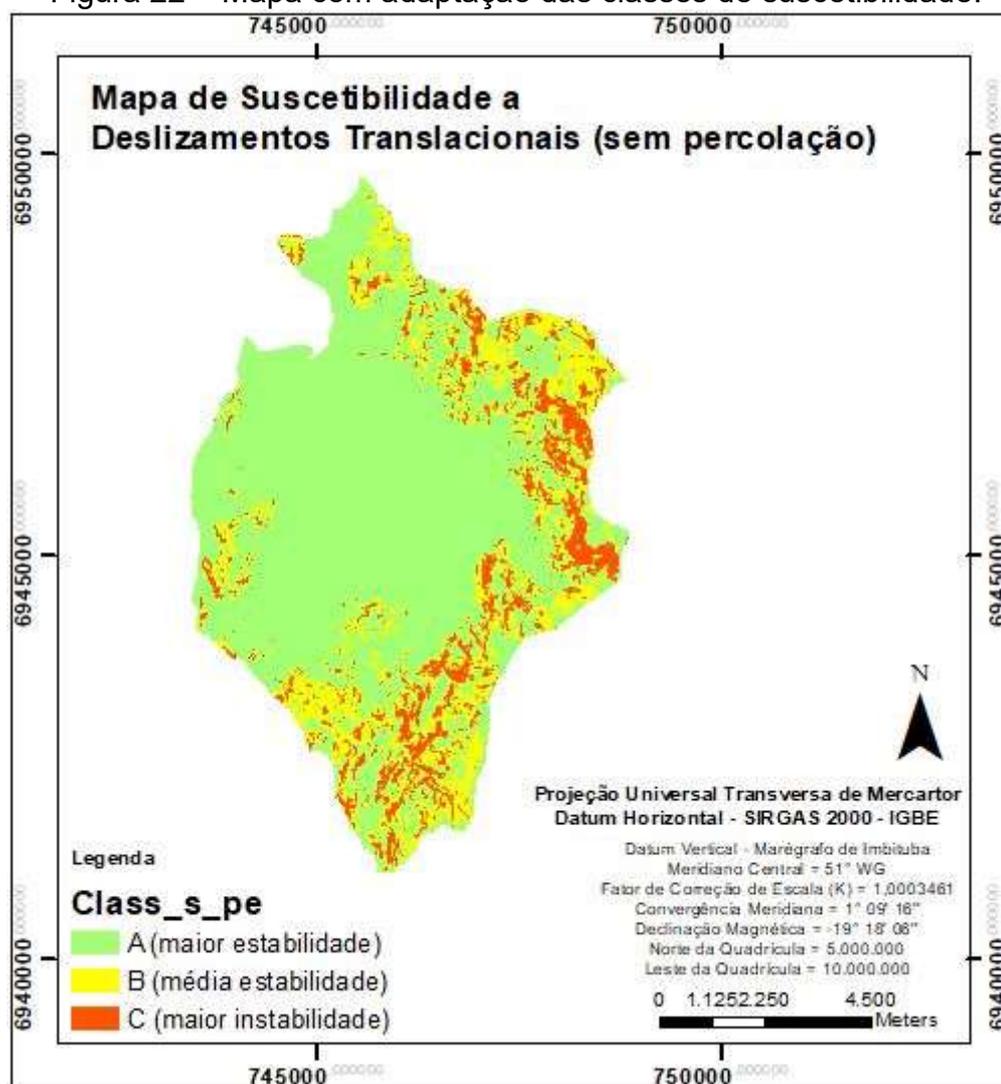
Como já descrito na metodologia do presente estudo, foi necessário adaptar as classes de suscetibilidade, unificando as duas classes intermediárias, para permitir uma comparação com as classes de suscetibilidade do mapa de Christ (2019). Esta adaptação resultou no mapa apresentado na Figura 22, com suas áreas expostas na Tabela 13.

Tabela 13 – Distribuição de área por classes.

Classe de Suscetibilidade	Área [km ²]	Área [%]
A	19,14	72%
B	4,79	18%
C	2,77	10%
Área Total	26,70	100%

Fonte: Autora (2020).

Figura 22 – Mapa com adaptação das classes de suscetibilidade.



Fonte: Autora (2020).

5.2.2 Com percolação

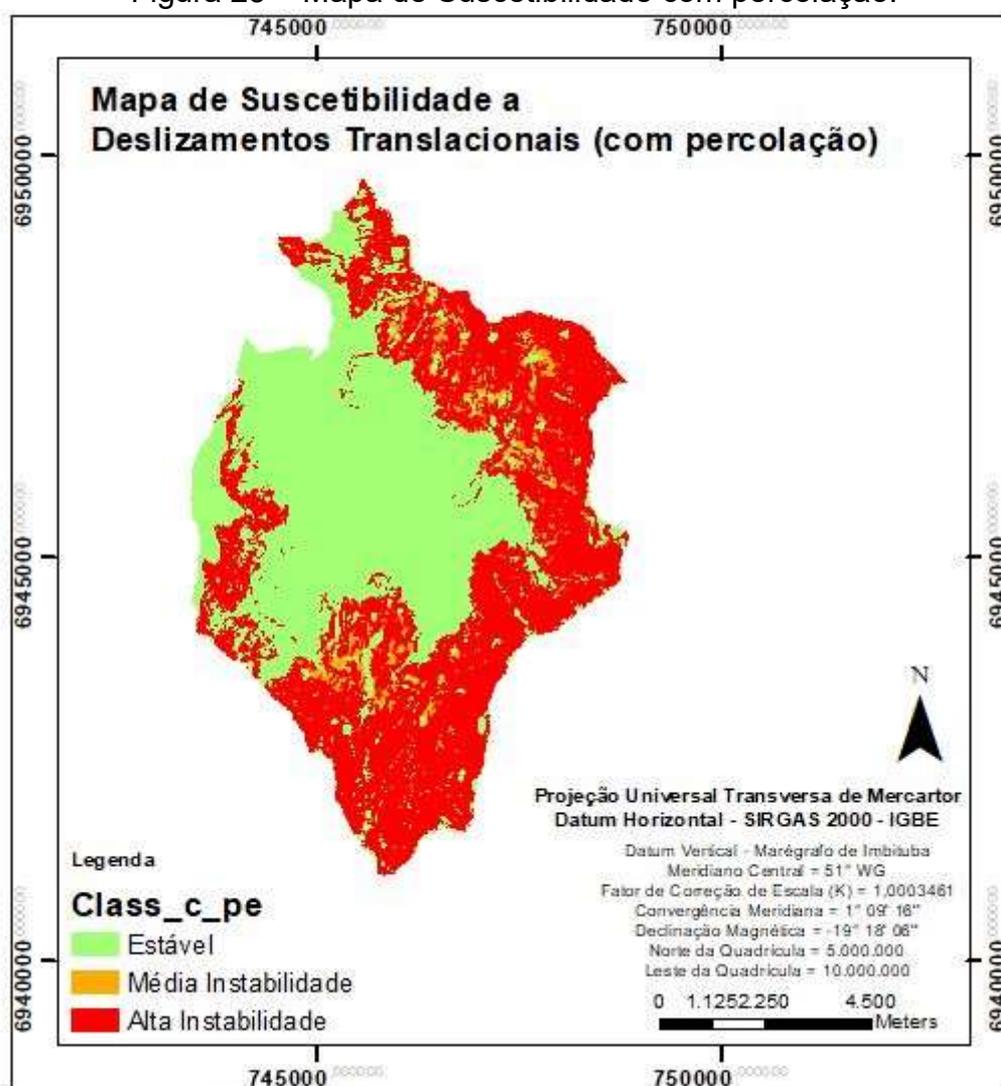
Partindo dos valores da Tabela 11, obteve-se o mapa apresentado na Figura 23, com as 4 classes de suscetibilidade da NBR 11682. As áreas de cada classe estão apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14 – Distribuição de área por classes.

Classe de Suscetibilidade	Área [km²]	Área [%]
Alta Instabilidade	12,92	48%
Média Instabilidade	0,93	3%
Baixa Instabilidade	0,00	0%
Estável	12,86	48%
Área Total	26,70	100%

Fonte: Autora (2020).

Figura 23 – Mapa de Suscetibilidade com percolação.



Fonte: Autora (2020).

Neste caso, como o mapa gerado não apresentou nenhuma área na condição de Baixa Instabilidade, a adaptação das classes de suscetibilidade resultou apenas

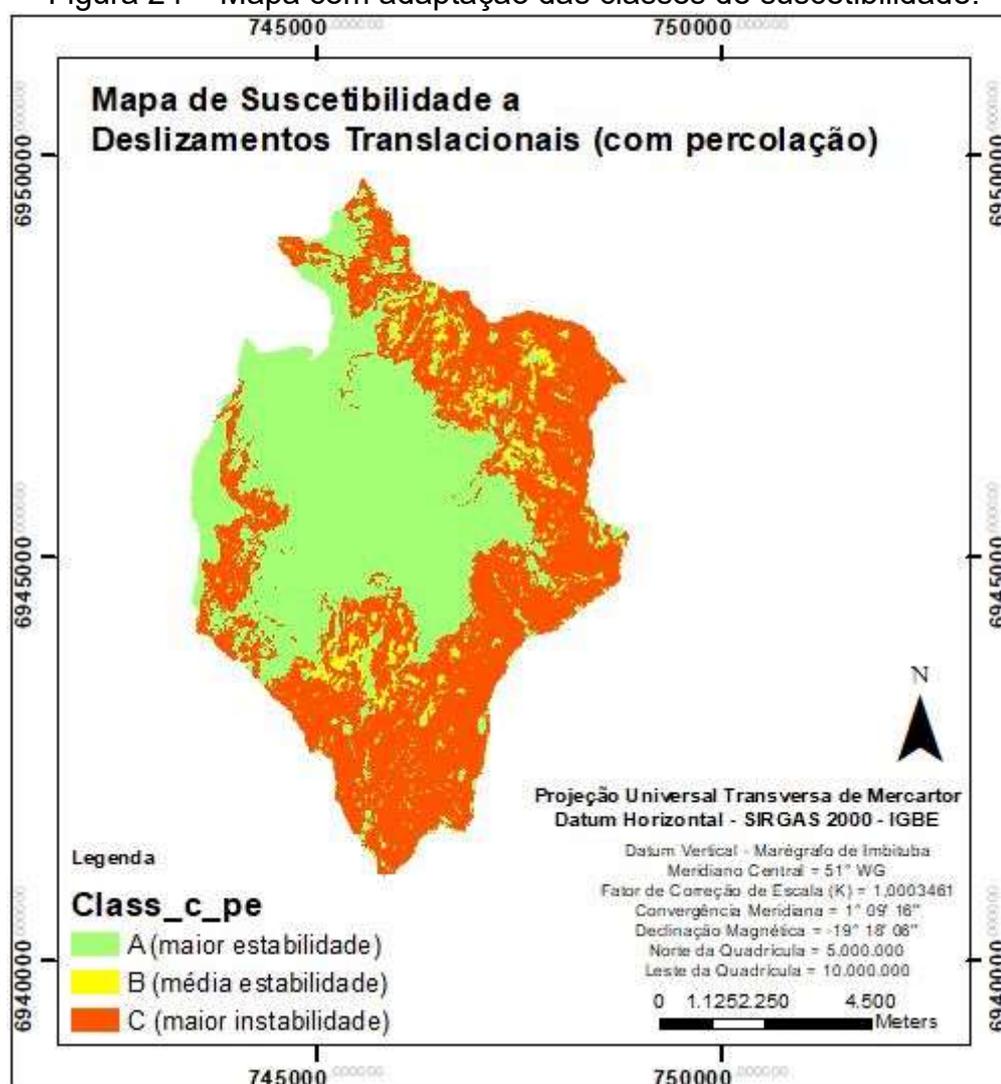
em uma mudança de nomenclatura. Esta adaptação resultou no mapa apresentado na Figura 24, com suas áreas expostas na Tabela 15.

Tabela 15 – Distribuição de área por classes.

Classe de Suscetibilidade	Área [km ²]	Área [%]
A	12,86	48%
B	0,93	3%
C	12,92	48%
Área Total	26,70	100%

Fonte: Autora (2020).

Figura 24 – Mapa com adaptação das classes de suscetibilidade.



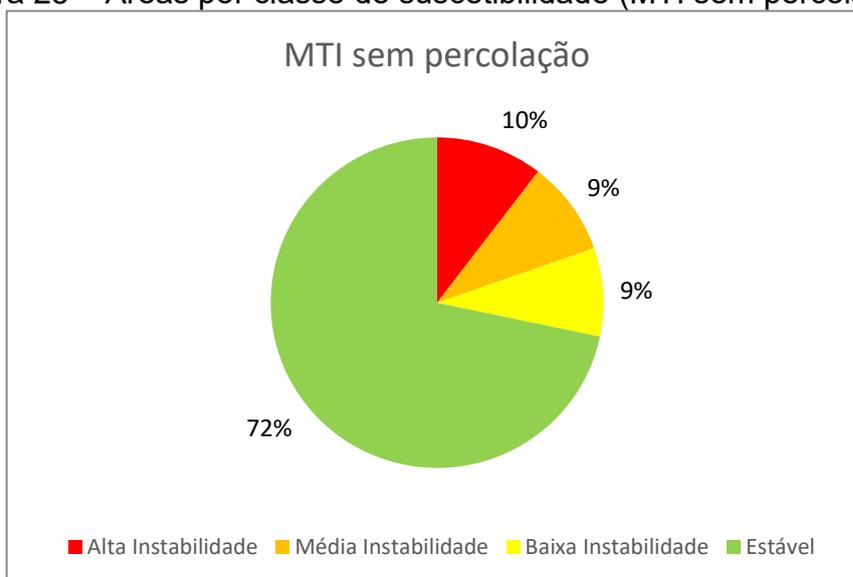
Fonte: Autora (2020).

5.3 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MAPAS

No que se refere ao efeito da consideração da percolação de água no solo, podemos perceber, primeiramente, uma considerável mudança entre os mapas da Figuras 21 e 23 no que se refere a um aumento expressivo da região em vermelho (alta instabilidade), conforme pode ser visualizado nos gráficos das Figuras 25 e 26.

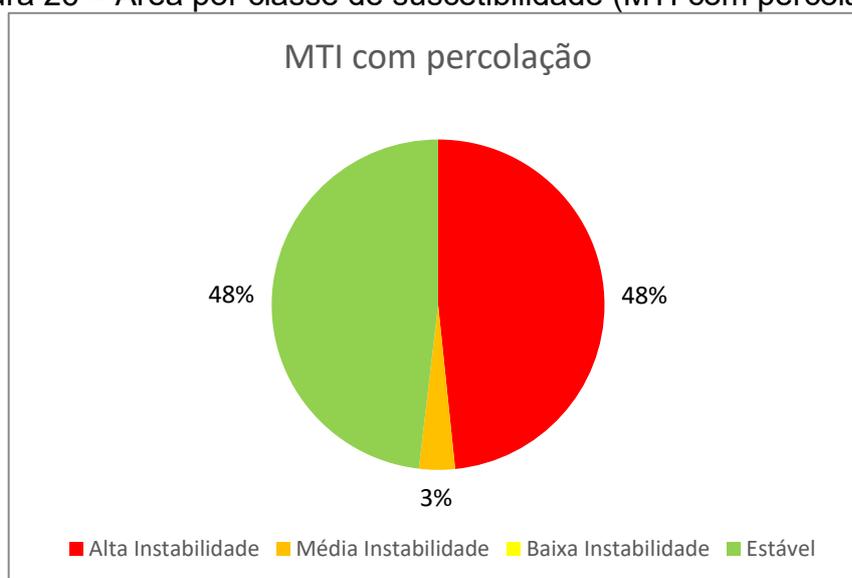
É notável ainda que a classe de baixa instabilidade não está presente no cenário com percolação, sendo que é possível perceber que tanto esta área como uma parcela da área das demais classes sofreu um aumento de instabilidade. Este efeito pode ser explicado pela forte influência de um fluxo de água no solo como fator diminuidor da estabilidade de taludes.

Figura 25 – Áreas por classe de suscetibilidade (MTI sem percolação).



Fonte: Autora (2020).

Figura 26 – Área por classe de suscetibilidade (MTI com percolação).



Fonte: Autora (2020).

A seguir, serão realizadas as análises comparativas relativas aos dois mapas produzidos neste estudo, por meio do Método dos Taludes Infinitos (MTI), e o mapa de Christ (2019), gerado pelo Modelo SHALSTAB, todos com suas classes adaptadas.

5.3.1 Análise geral da Microbacia

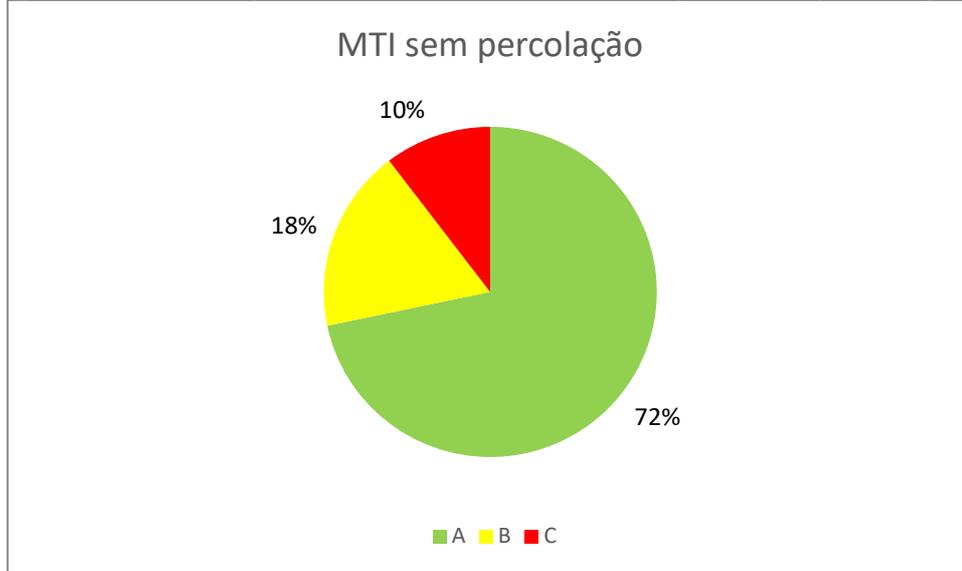
Por meio da Tabela 16 e dos gráficos apresentados nas Figuras de 27 a 32, podemos notar que o mapa gerado pelo Modelo SHALSTAB apresenta uma porcentagem de área menor na classe A (maior estabilidade) em relação aos demais mapas, estando a favor da segurança, com um conseqüente aumento na porcentagem de área da classe B (média estabilidade). Já na classe C, o modelo SHALSTAB resulta em um valor intermediário entre os outros dois mapas, se aproximando mais do mapa que considera a percolação de água no solo.

Tabela 16 – Análise geral da área de estudos.

Classe	Área [%]			Variações [%]		
	MTI sem perc.	MTI com perc.	SHALSTAB	MTI sem perc X com perc	MTI sem perc X Shalstab	MTI com perc X Shalstab
A	72%	48%	42%	24%	30%	7%
B	18%	3%	32%	14%	14%	28%
C	10%	48%	26%	38%	16%	22%

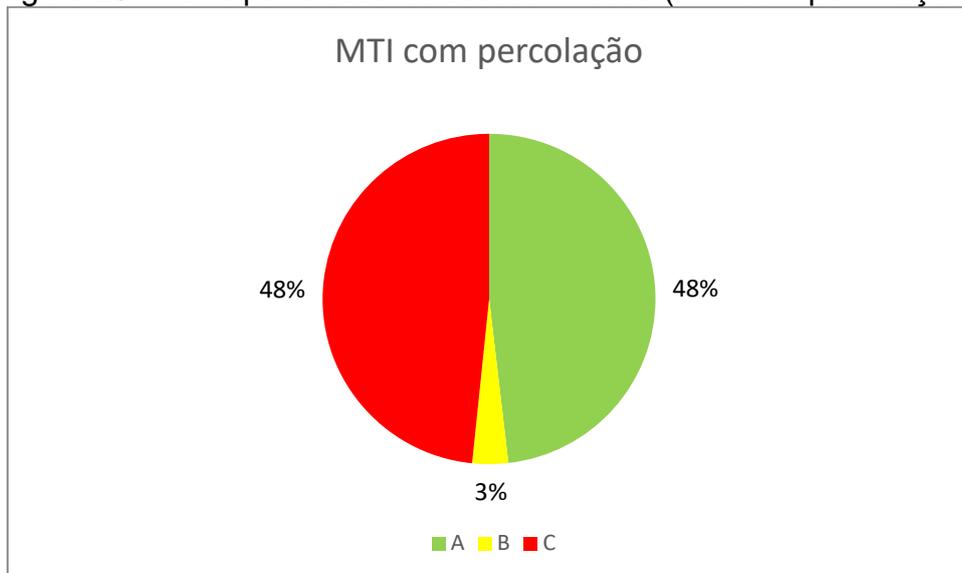
Fonte: Autora (2020).

Figura 27 – Áreas por classe de suscetibilidade (MTI sem percolação).



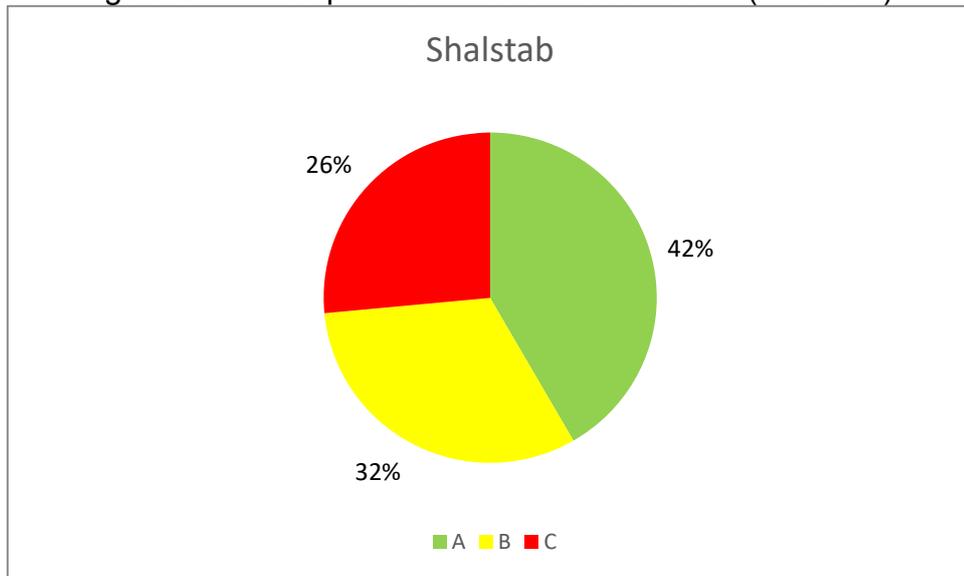
Fonte: Autora (2020).

Figura 28 – Área por classe de suscetibilidade (MTI com percolação).



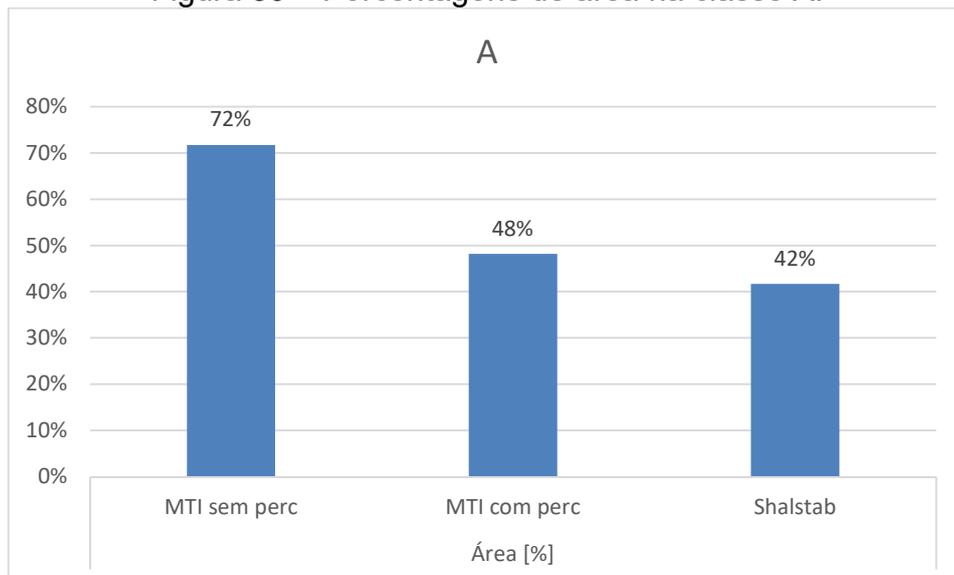
Fonte: Autora (2020).

Figura 29 – Área por classe de suscetibilidade (Shalstab).



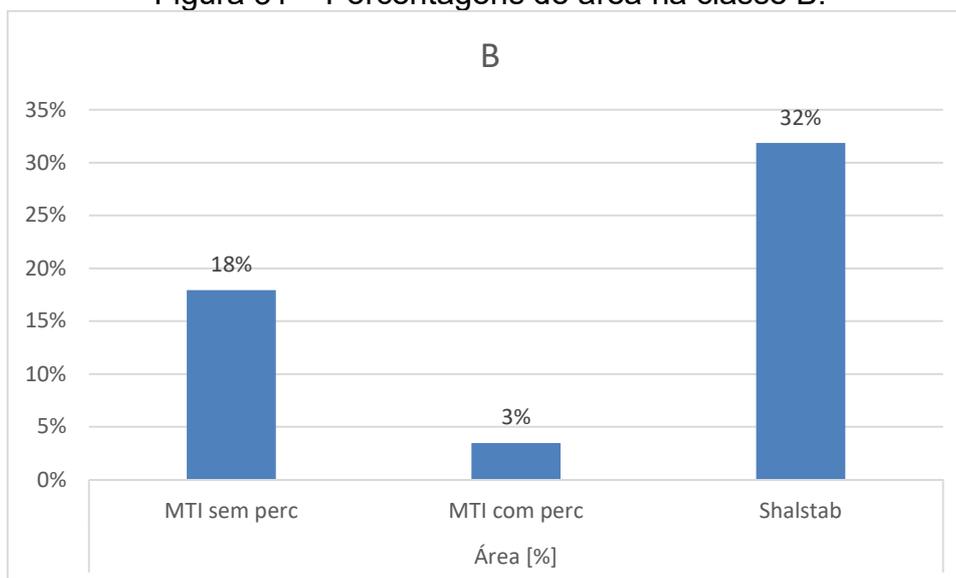
Fonte: Autora (2020).

Figura 30 – Porcentagens de área na classe A.



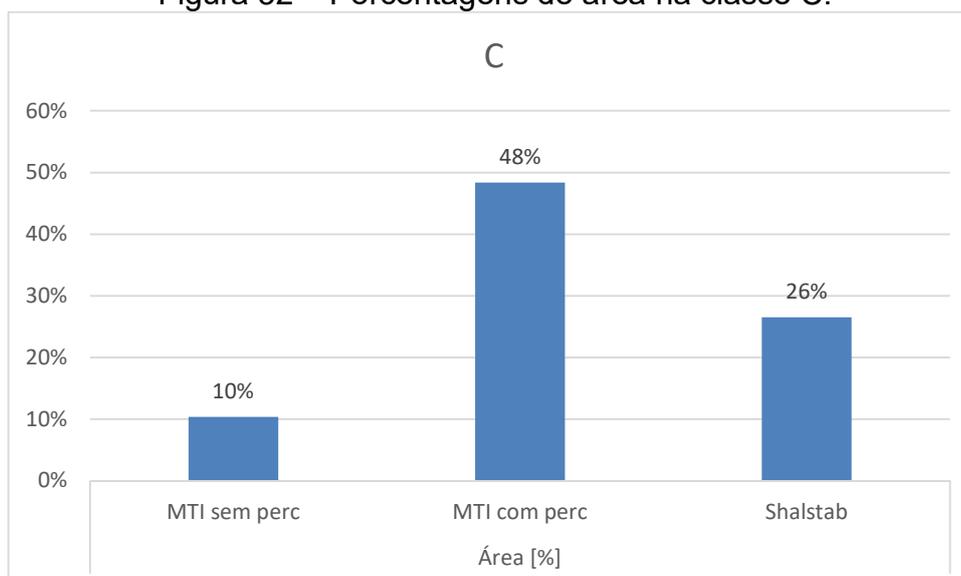
Fonte: Autora (2020).

Figura 31 – Porcentagens de área na classe B.



Fonte: Autora (2020).

Figura 32 – Porcentagens de área na classe C.



Fonte: Autora (2020).

5.3.2 Análise das Unidades Geotécnicas isoladas

Nesta seção, será analisada cada unidade geotécnica presente na área em estudo, de forma isolada, no que se refere as porcentagens de área em cada classe de suscetibilidade a deslizamentos translacionais, de forma análoga ao que foi feito na seção anterior para a Microbacia Hidrográfica do Itacorubi como um todo.

5.3.2.1 Cde

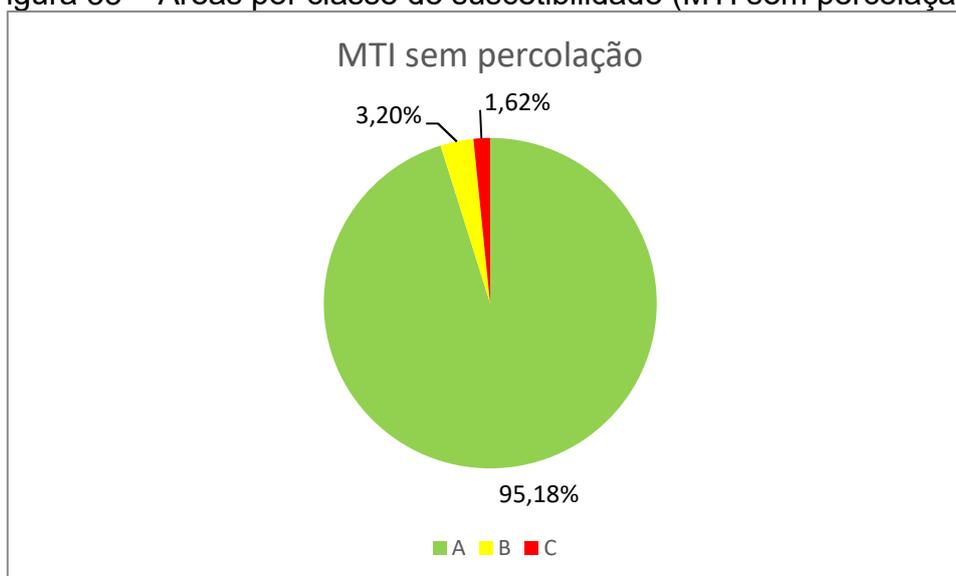
Para o Cambissolo substrato depósito de encostas (Cde), podemos perceber um comportamento semelhante ao apresentado para a bacia como um todo, com o Modelo SHALSTAB resultando em uma porcentagem de área menor na classe menos suscetível. Porém, é notável a grande variação na porcentagem de área alocada na classe B, sendo que o Método dos Taludes Infinitos com percolação se quer apresenta área nesta classe. Ainda, vale realçar a proximidade dos valores apresentados na classe C (maior instabilidade) para o Modelo SHALSTAB e para o MTI com percolação, apresentando variação de apenas 3,85%.

Tabela 17 – Análise da unidade Cde.

Classe	Área [%]			Variações [%]		
	MTI sem perc.	MTI com perc.	SHALSTAB	MTI sem perc X com perc	MTI sem perc X Shalstab	MTI com perc X Shalstab
A	95,18%	67,73%	38,92%	27,45%	56,26%	28,81%
B	3,20%	0,00%	32,66%	3,20%	29,46%	32,66%
C	1,62%	32,27%	28,42%	30,65%	26,80%	3,85%

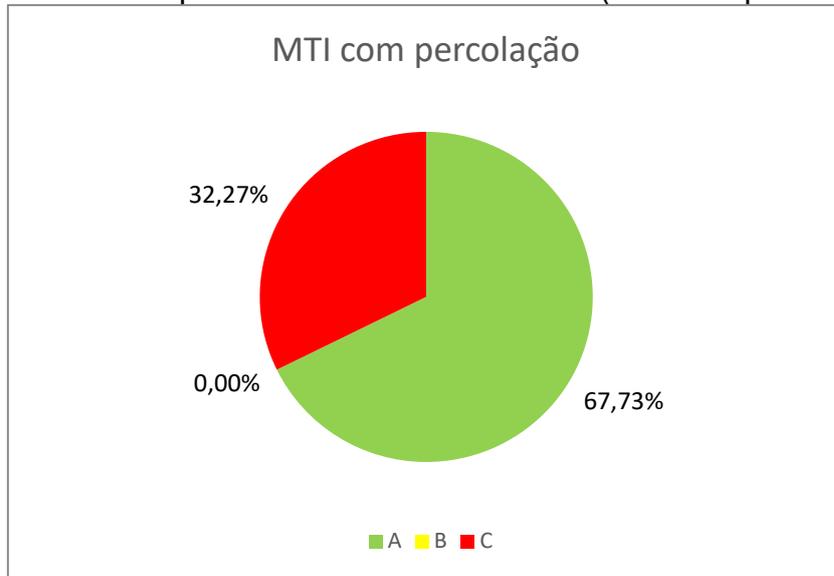
Fonte: Autora (2020).

Figura 33 – Áreas por classe de suscetibilidade (MTI sem percolação).



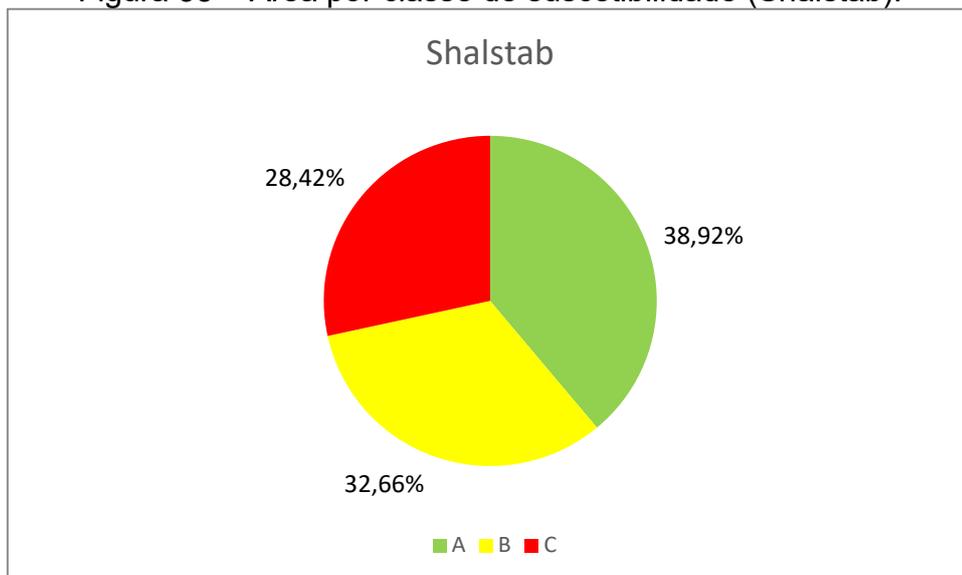
Fonte: Autora (2020).

Figura 34 – Área por classe de suscetibilidade (MTI com percolação).



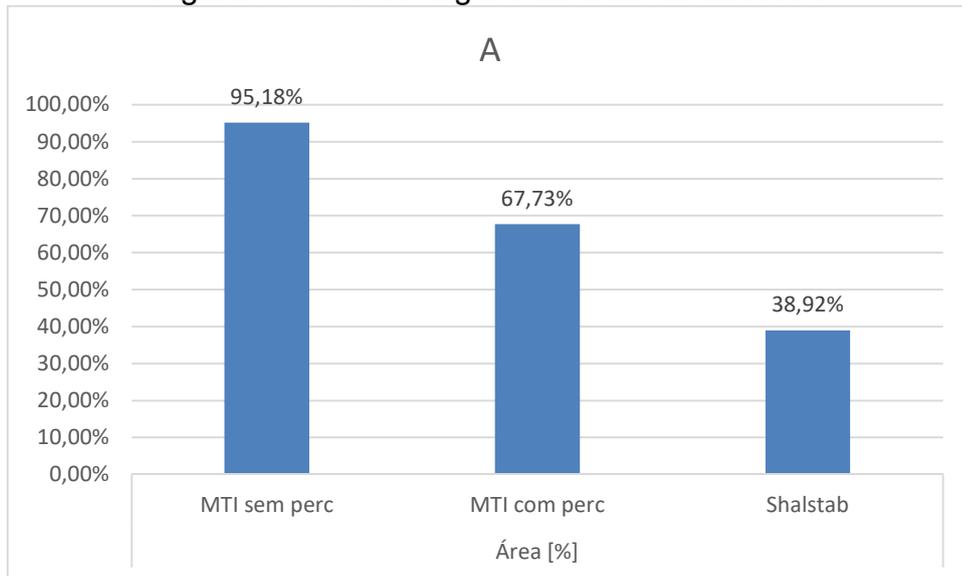
Fonte: Autora (2020).

Figura 35 – Área por classe de suscetibilidade (Shalstab).



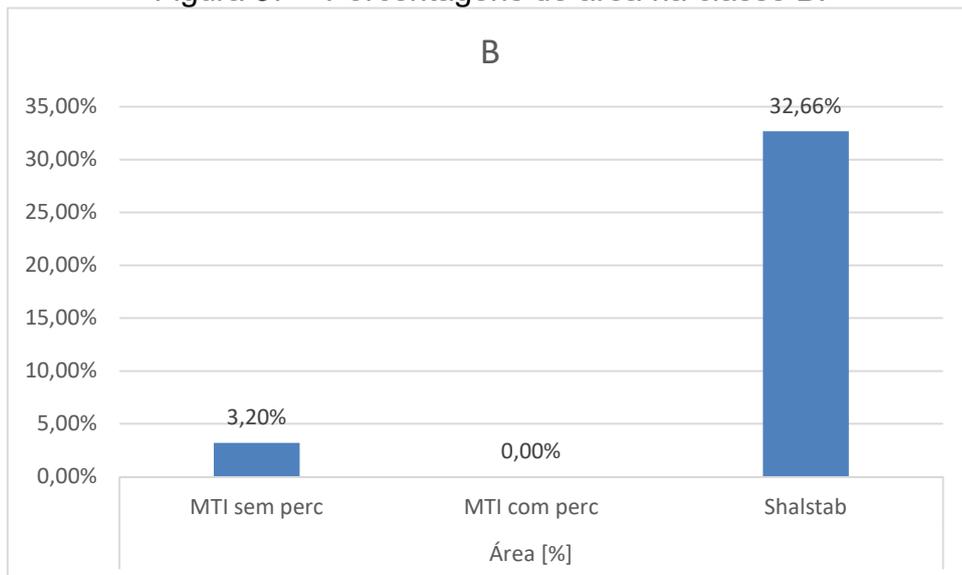
Fonte: Autora (2020).

Figura 36 – Porcentagens de área na classe A.



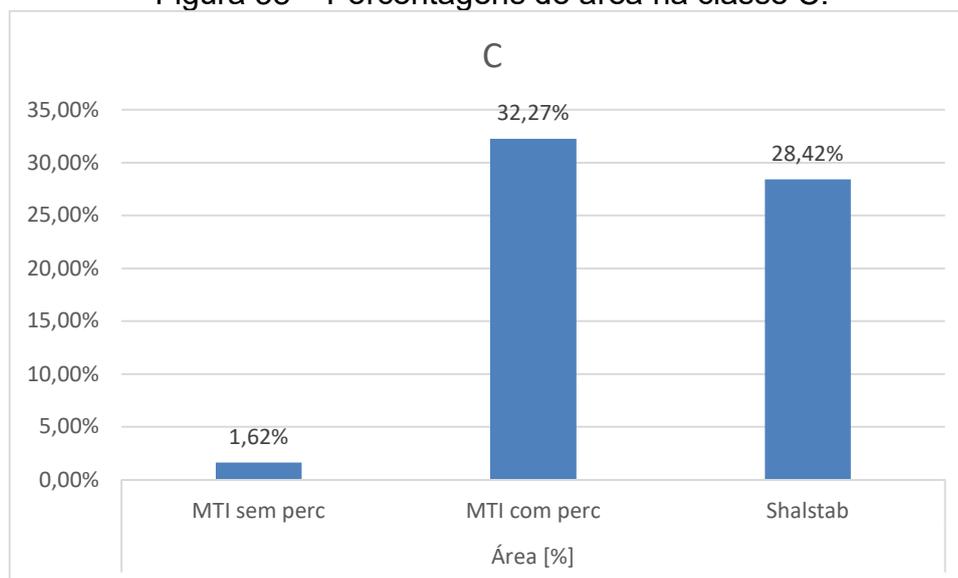
Fonte: Autora (2020).

Figura 37 – Porcentagens de área na classe B.



Fonte: Autora (2020).

Figura 38 – Porcentagens de área na classe C.



Fonte: Autora (2020).

5.3.2.2 Cgi

Para o Cambissolo substrato de granito Ilha (Cgi), vale destacar a proximidade dos valores de porcentagem de área do Modelo SHALSTAB com os valores gerados pelo Método dos Taludes Infinitos, com percolação para a classe A (variação de 1,42%) e sem percolação para a classe B (variação de 2,21%). Já a área alocada na classe C, pelo Modelo SHALSTAB, apresenta um valor intermediário em relação aos outros dois mapas, conforme padrão observado na análise geral da bacia. Por fim, nota-se que esta unidade geotécnica também não apresenta área na classe B pelo MTI com percolação.

Tabela 18 – Análise da unidade Cgi.

Classe	Área [%]			Variações [%]		
	MTI sem perc.	MTI com perc.	SHALSTAB	MTI sem perc X com perc	MTI sem perc X Shalstab	MTI com perc X Shalstab
A	31,47%	12,44%	11,02%	19,03%	20,45%	1,42%
B	51,53%	0,00%	49,32%	51,53%	2,21%	49,32%
C	16,99%	87,56%	39,66%	70,56%	22,67%	47,90%

Fonte: Autora (2020).

Figura 39 – Áreas por classe de suscetibilidade (MTI sem percolação).

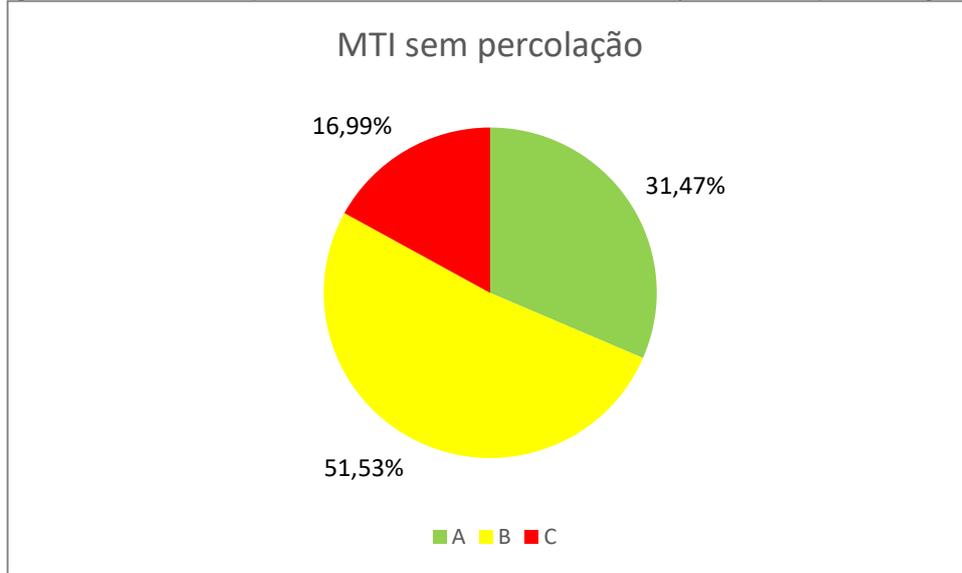


Figura 40 – Área por classe de suscetibilidade (MTI com percolação).

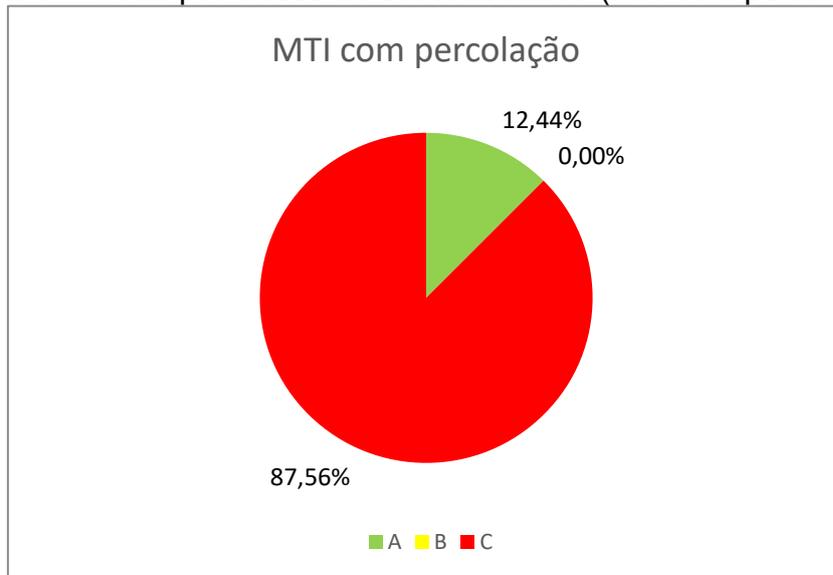
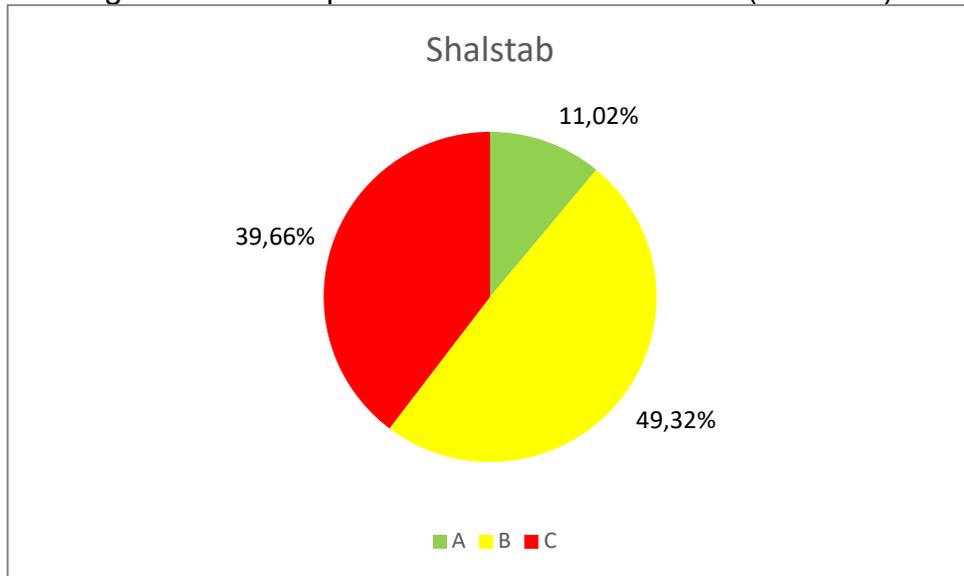
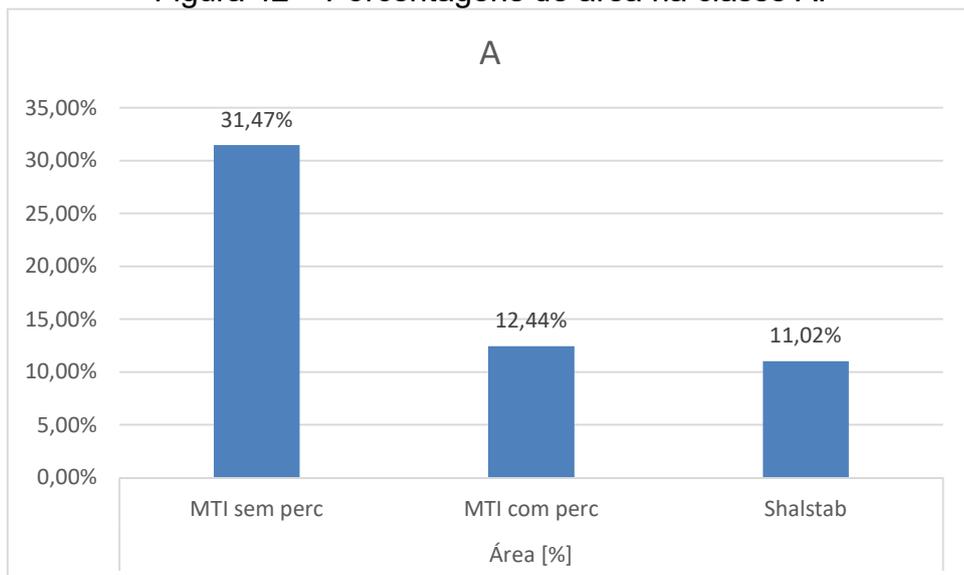


Figura 41 – Área por classe de suscetibilidade (Shalstab).



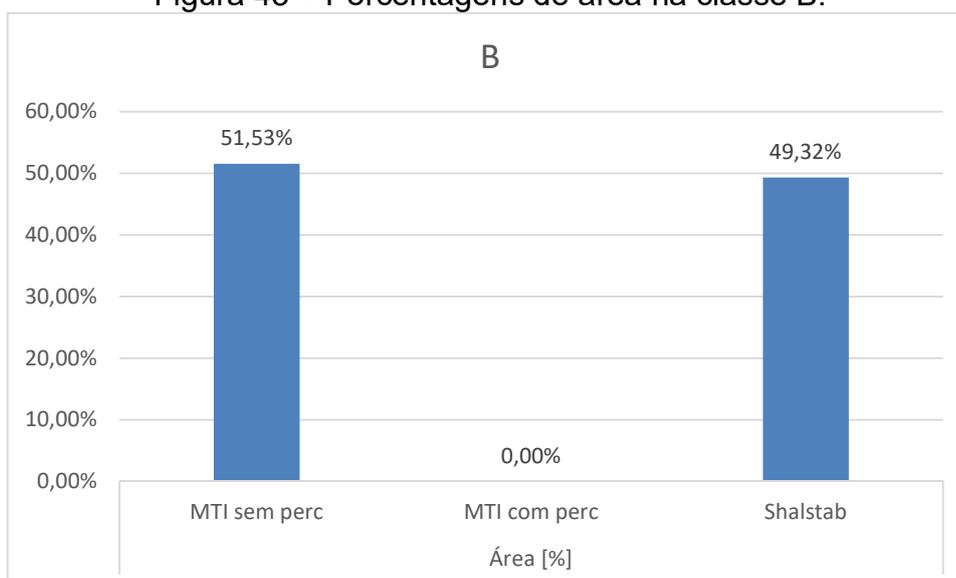
Fonte: Autora (2020).

Figura 42 – Porcentagens de área na classe A.



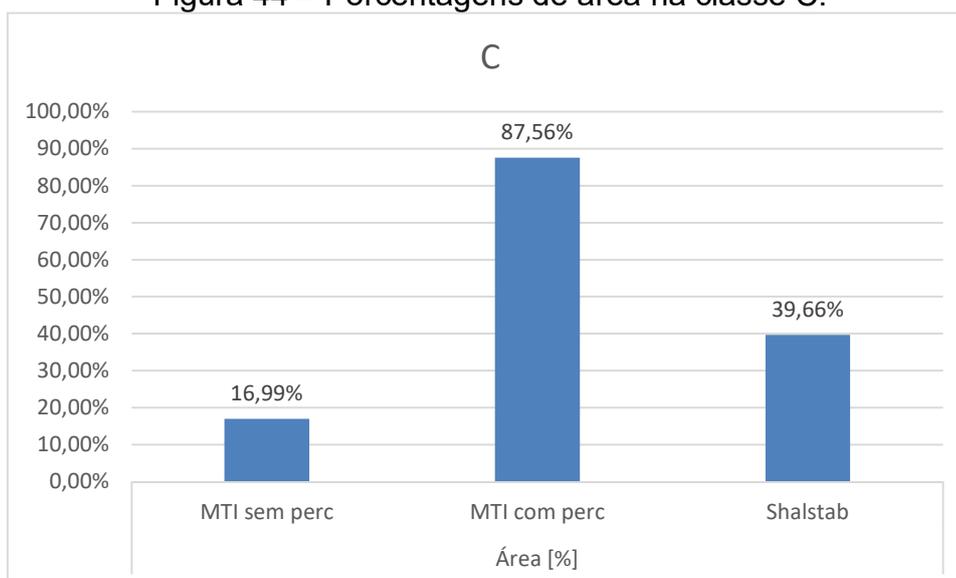
Fonte: Autora (2020).

Figura 43 – Porcentagens de área na classe B.



Fonte: Autora (2020).

Figura 44 – Porcentagens de área na classe C.



Fonte: Autora (2020).

5.3.2.3 Cgt

A unidade cambissolo de substrato granito Itacorubi (Cgt) apresenta uma distribuição de áreas pelas classes de suscetibilidade que foge do padrão apresentado pela bacia. Nesta unidade, percebe-se que o Modelo SHALSTAB resulta em uma área A maior em 9,72% do que o Método dos Taludes Infinitos com percolação. Ainda, enquanto o Modelo SHALSTAB apresenta uma grande área na classe B (76,33%), o

MTI com percolação, novamente, não apresenta nenhuma área alocada nesta categoria.

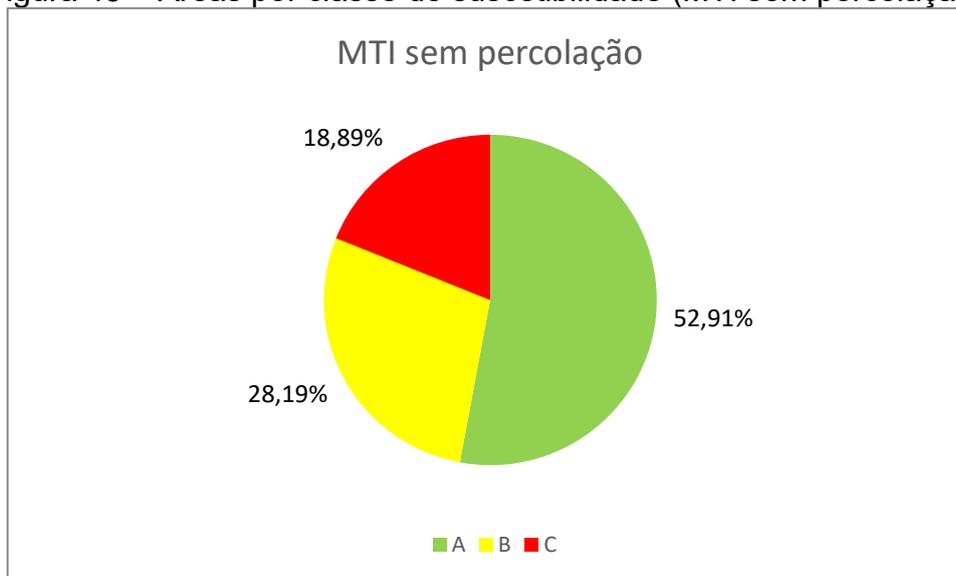
Por fim, vale destacar que a classe de suscetibilidade C, pelo MTI com percolação, aloca quase toda a área da unidade Cgt (91,86%), apresentando grandes variações em relação ao SHALSTAB (86,05%) e ao MTI sem percolação (72,96%).

Tabela 19 – Análise da unidade Cgt.

Classe	Área [%]			Variações [%]		
	MTI sem perc.	MTI com perc.	SHALSTAB	MTI sem perc X com perc	MTI sem perc X Shalstab	MTI com perc X Shalstab
A	52,91%	8,14%	17,86%	44,77%	35,05%	9,72%
B	28,19%	0,00%	76,33%	28,19%	48,14%	76,33%
C	18,89%	91,86%	5,81%	72,96%	13,09%	86,05%

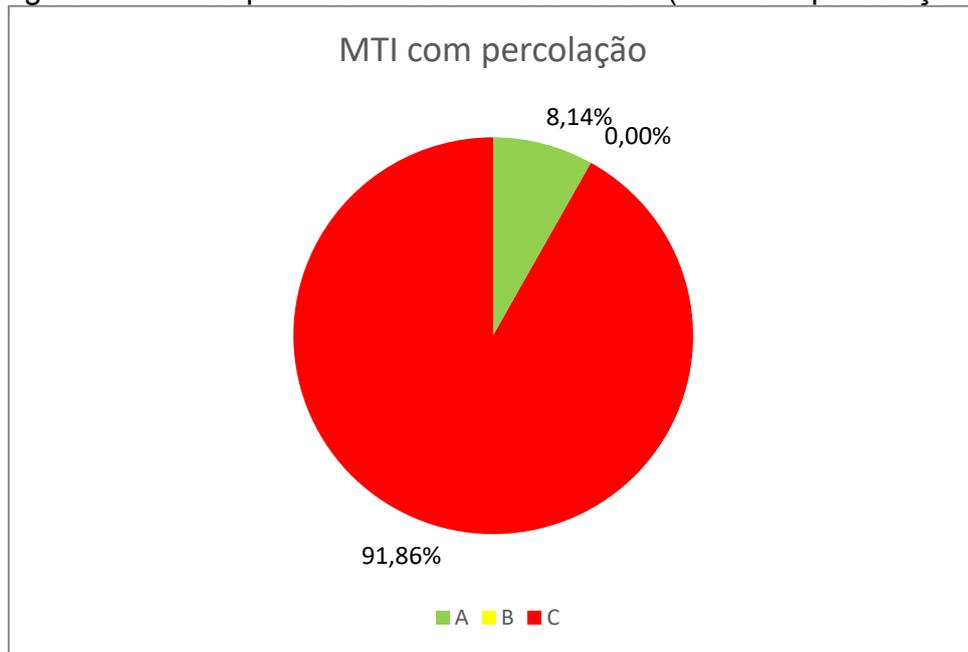
Fonte: Autora (2020).

Figura 45 – Áreas por classe de suscetibilidade (MTI sem percolação).



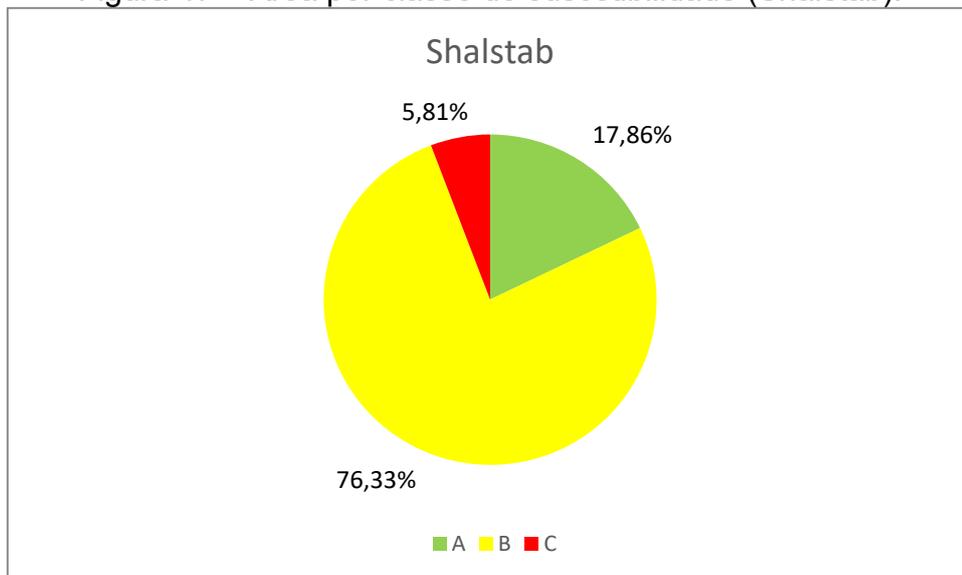
Fonte: Autora (2020).

Figura 46 – Área por classe de suscetibilidade (MTI com percolação).



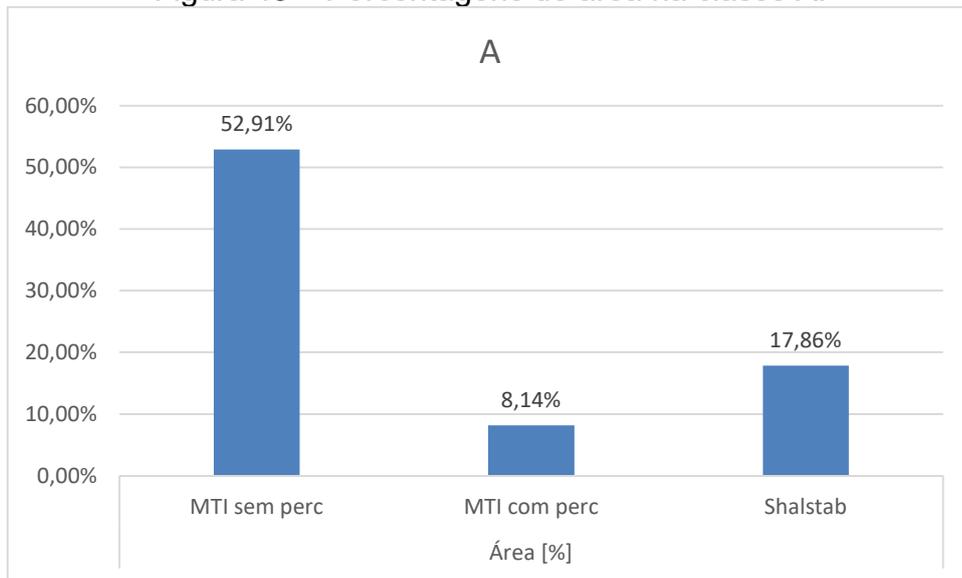
Fonte: Autora (2020).

Figura 47 – Área por classe de suscetibilidade (Shalstab).



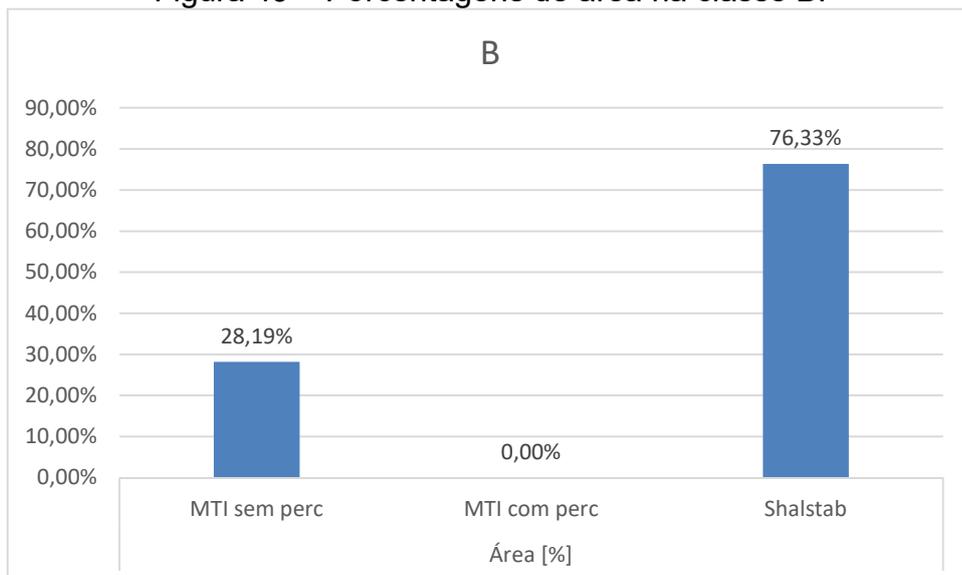
Fonte: Autora (2020).

Figura 48 – Porcentagens de área na classe A.



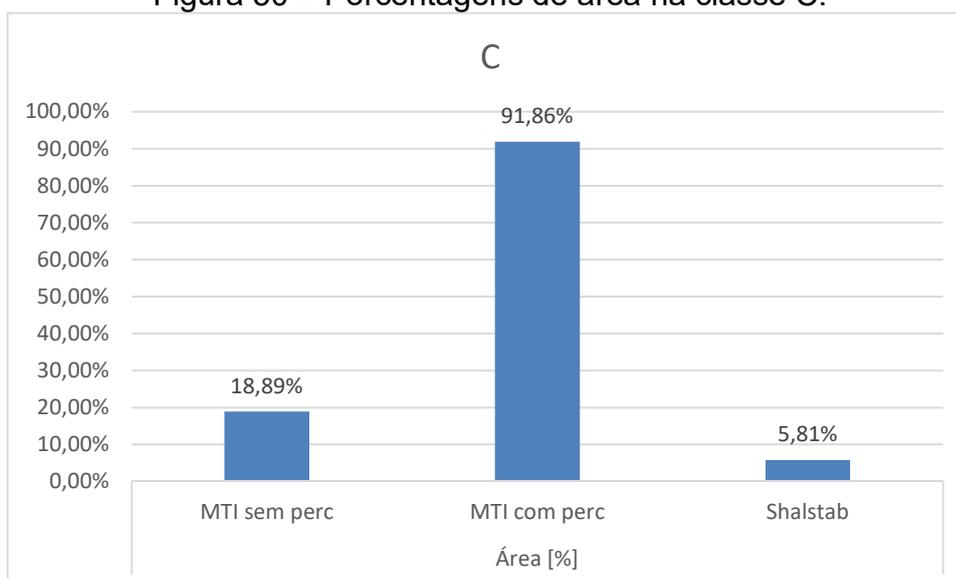
Fonte: Autora (2020).

Figura 49 – Porcentagens de área na classe B.



Fonte: Autora (2020).

Figura 50 – Porcentagens de área na classe C.



Fonte: Autora (2020).

5.3.2.4 Ddia, Dda, Dr

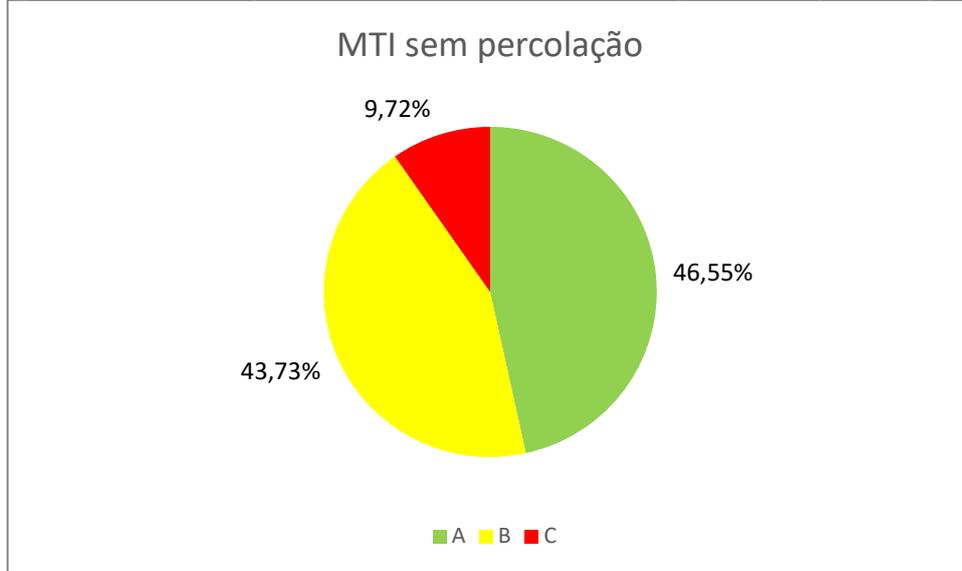
As unidades Ddia (Dique de diabásico), Dda (Dique de dacito) e Dr (Dique de riolito) apresentam o mesmo padrão observado na bacia como um todo: modelo Shalstab com a menor área A (com valor mais próximo ao MTI com percolação), a maior área B (com valor mais próximo ao MTI sem percolação) e área C com valor intermediário. Mais uma vez, as unidades, no mapa produzido por meio do MTI com percolação, não apresentam área na classe B (média estabilidade).

Tabela 20 – Análise das unidades Ddia, Dda e Dr.

Classe	Área [%]			Variações [%]		
	MTI sem perc.	MTI com perc.	SHALSTAB	MTI sem perc X com perc	MTI sem perc X Shalstab	MTI com perc X Shalstab
A	46,55%	24,35%	18,40%	22,20%	28,15%	5,95%
B	43,73%	0,00%	49,26%	43,73%	5,54%	49,26%
C	9,72%	75,65%	32,34%	65,93%	22,62%	43,31%

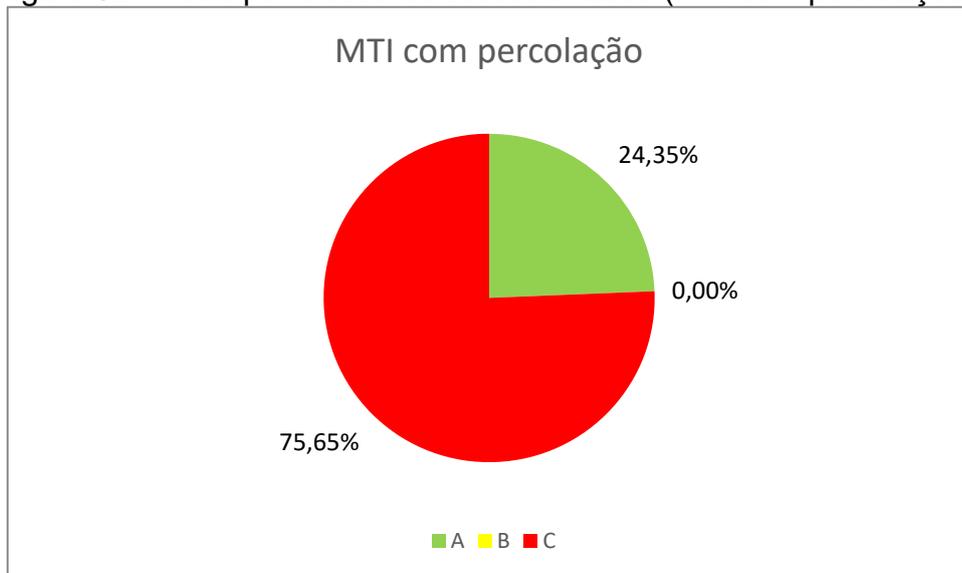
Fonte: Autora (2020).

Figura 51 – Áreas por classe de suscetibilidade (MTI sem percolação).



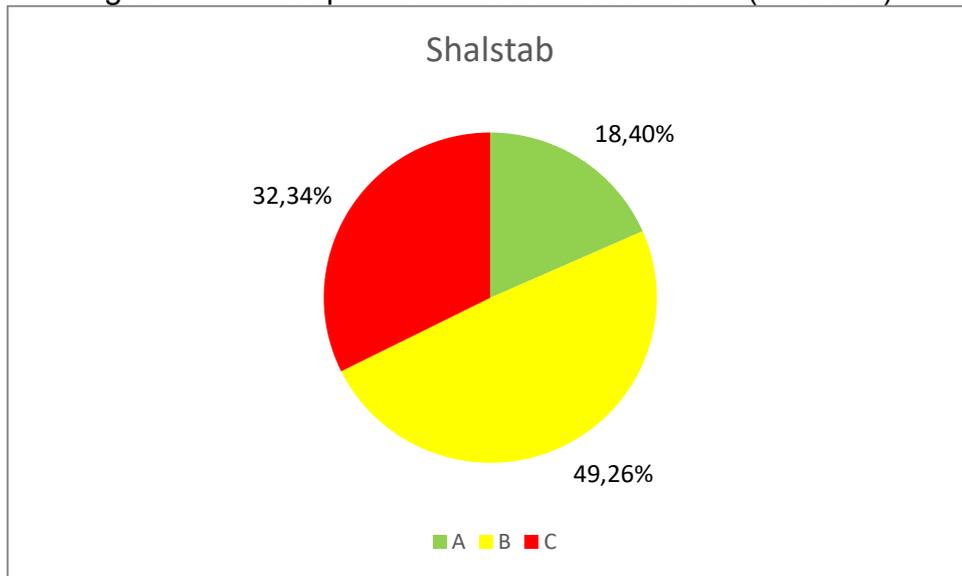
Fonte: Autora (2020).

Figura 52 – Área por classe de suscetibilidade (MTI com percolação).



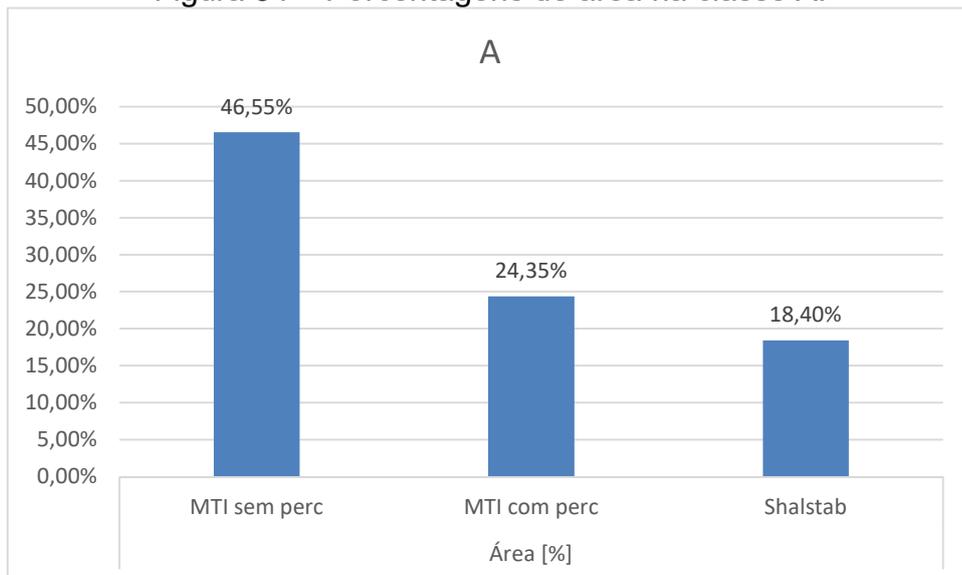
Fonte: Autora (2020).

Figura 53 – Área por classe de suscetibilidade (Shalstab).



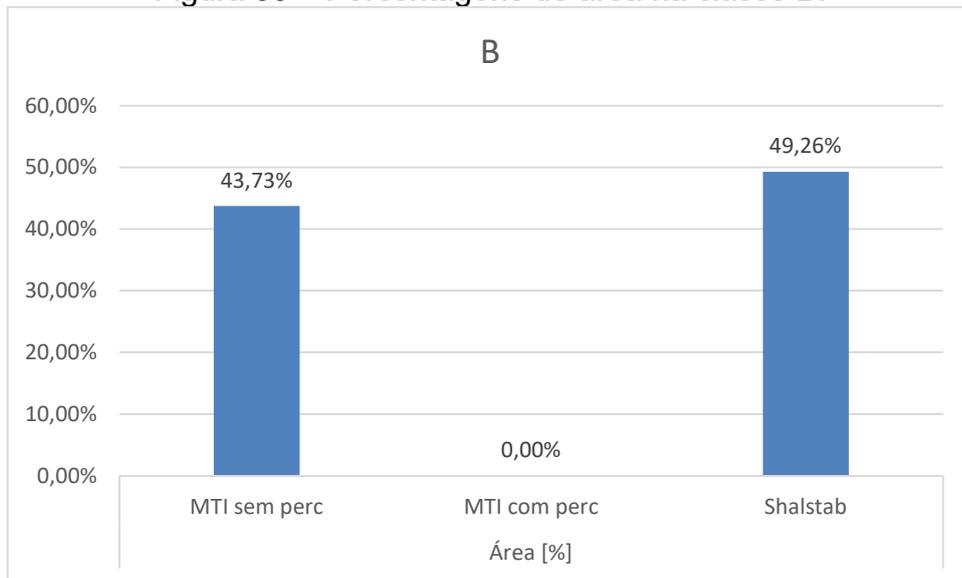
Fonte: Autora (2020).

Figura 54 – Porcentagens de área na classe A.



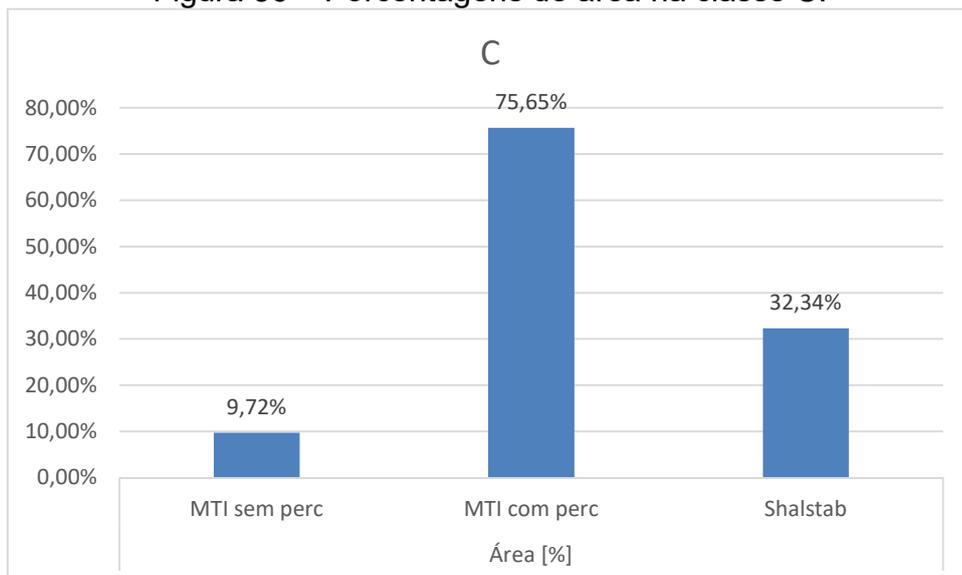
Fonte: Autora (2020).

Figura 55 – Porcentagens de área na classe B.



Fonte: Autora (2020).

Figura 56 – Porcentagens de área na classe C.



Fonte: Autora (2020).

5.3.2.5 PVgi

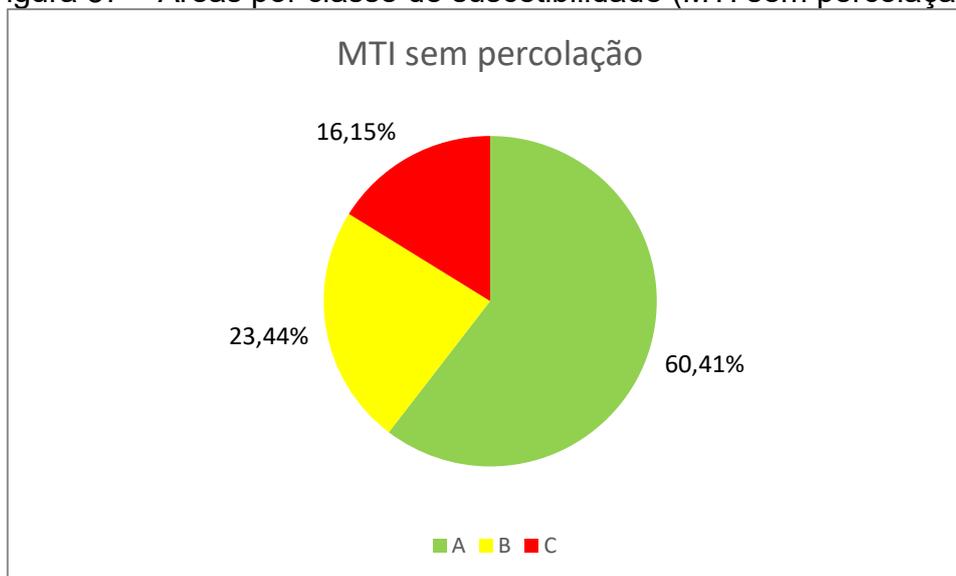
No Podzólico Vermelho-amarelo de substrato granito Ilha, o mapa gerado pelo Modelo SHALSTAB apresenta a menor porcentagem de área A, em relação aos demais mapas. Já no que se refere à área da classe B, os três mapas apresentam valores bastante próximos, com variação máxima de 4,71%. Na classe C, vale ressaltar a proximidade entre os valores observados para o MTI com percolação e o Modelo SHALSTAB, com variação de apenas 0,29%.

Tabela 21 – Análise da unidade PVgi.

Classe	Área [%]			Variações [%]		
	MTI sem perc.	MTI com perc.	SHALSTAB	MTI sem perc X com perc	MTI sem perc X Shalstab	MTI com perc X Shalstab
A	60,41%	10,13%	5,71%	50,28%	54,70%	4,42%
B	23,44%	19,88%	24,59%	3,56%	1,15%	4,71%
C	16,15%	69,99%	69,70%	53,84%	53,55%	0,29%

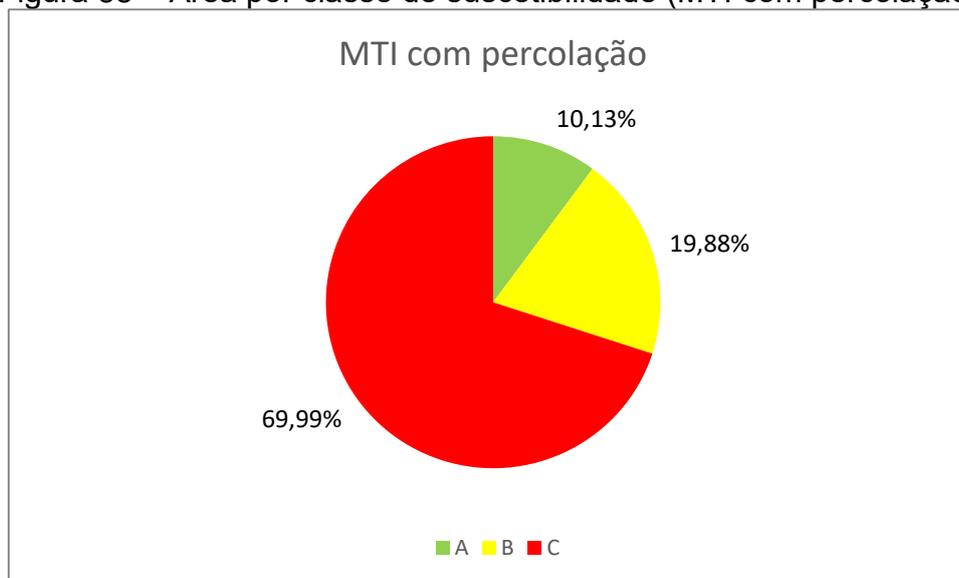
Fonte: Autora (2020).

Figura 57 – Áreas por classe de suscetibilidade (MTI sem percolação).



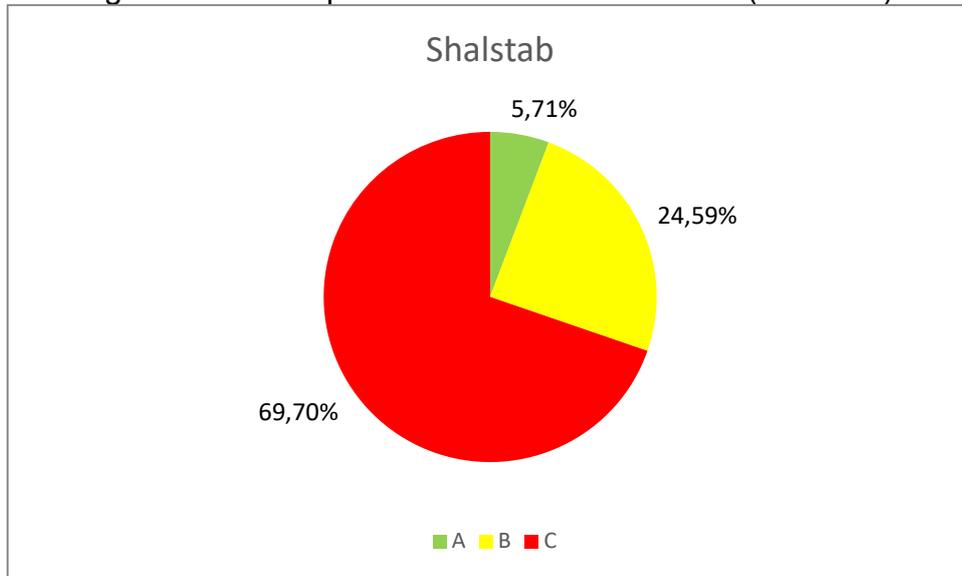
Fonte: Autora (2020).

Figura 58 – Área por classe de suscetibilidade (MTI com percolação).



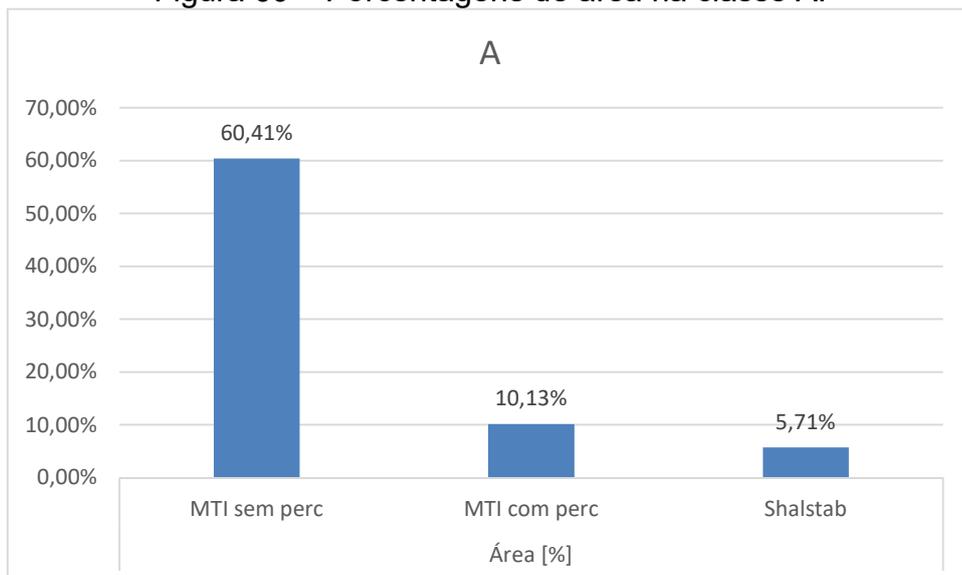
Fonte: Autora (2020).

Figura 59 – Área por classe de suscetibilidade (Shalstab).



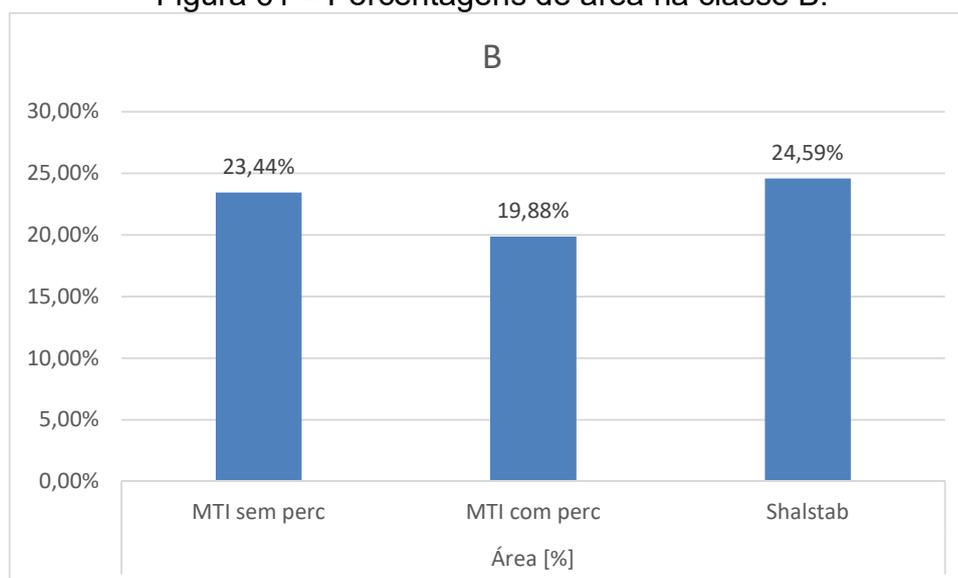
Fonte: Autora (2020).

Figura 60 – Porcentagens de área na classe A.



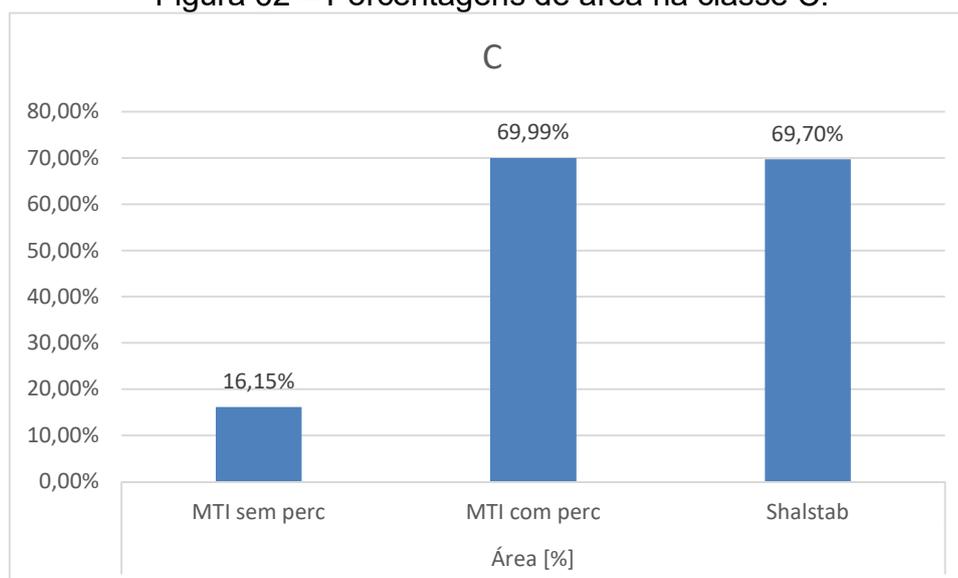
Fonte: Autora (2020).

Figura 61 – Porcentagens de área na classe B.



Fonte: Autora (2020).

Figura 62 – Porcentagens de área na classe C.



Fonte: Autora (2020).

5.3.2.6 PVgt

O Podzólico Vermelho-amarelo de substrato granito Itacorubi, fugindo do padrão da bacia, apresenta um valor de porcentagem de área intermediário na classe A, em relação aos outros dois mapas, estando mais próximo dos resultados do MTI com percolação do que do MTI sem percolação. Já na classe B, o SHALSTAB manteve sua área maior do que as geradas pelo MTI, porém mais próxima da hipótese

sem percolação do que da com percolação, o que difere do padrão geral observado nas demais unidades e na bacia como um todo.

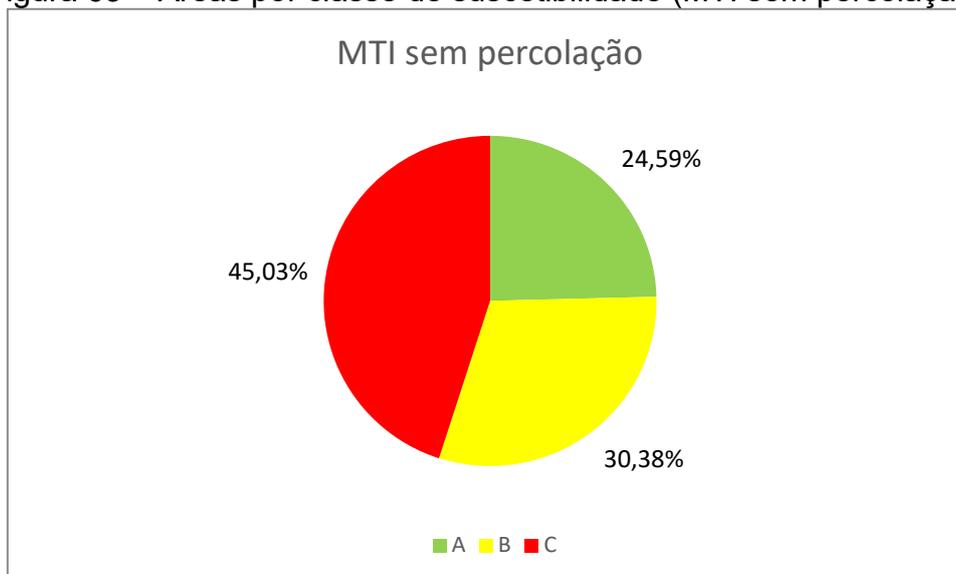
Na classe C, o modelo SHALSTAB resulta na menor área entre os três mapas, enquanto o MTI com percolação apresenta quase toda a sua área (92,20%).

Tabela 22 – Análise da unidade PVgt.

Classe	Área [%]			Variações [%]		
	MTI sem perc.	MTI com perc.	SHALSTAB	MTI sem perc X com perc	MTI sem perc X Shalstab	MTI com perc X Shalstab
A	24,59%	3,09%	9,31%	21,50%	15,28%	6,22%
B	30,38%	4,71%	66,48%	25,67%	36,09%	61,76%
C	45,03%	92,20%	24,21%	47,16%	20,82%	67,98%

Fonte: Autora (2020).

Figura 63 – Áreas por classe de suscetibilidade (MTI sem percolação).



Fonte: Autora (2020).

Figura 64 – Área por classe de suscetibilidade (MTI com percolação).

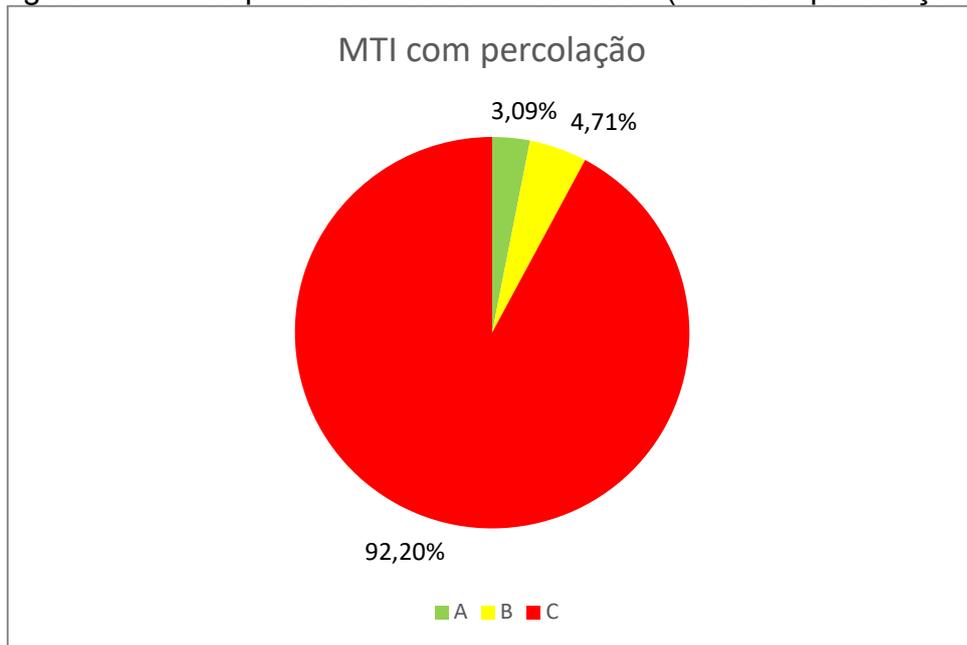


Figura 65 – Área por classe de suscetibilidade (Shalstab).

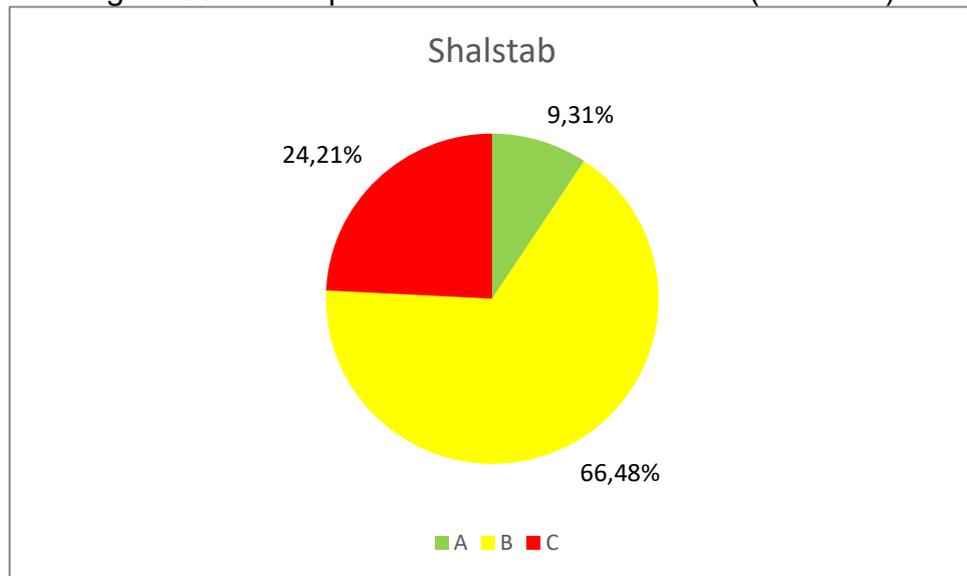
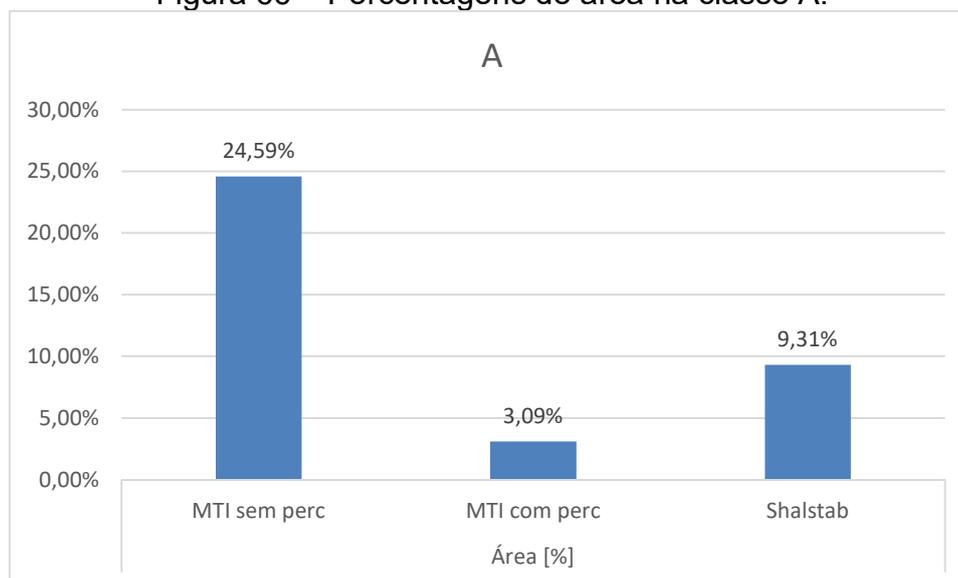
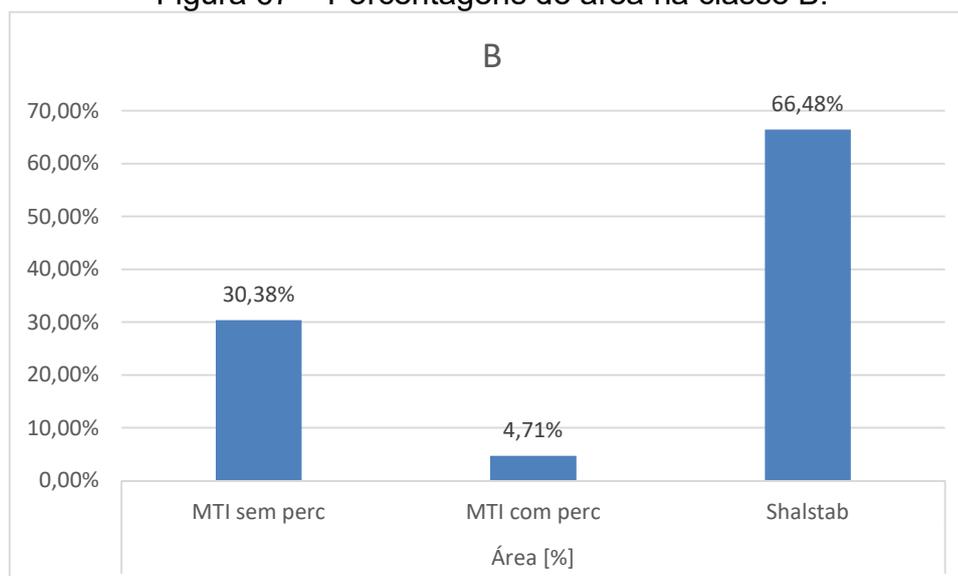


Figura 66 – Porcentagens de área na classe A.



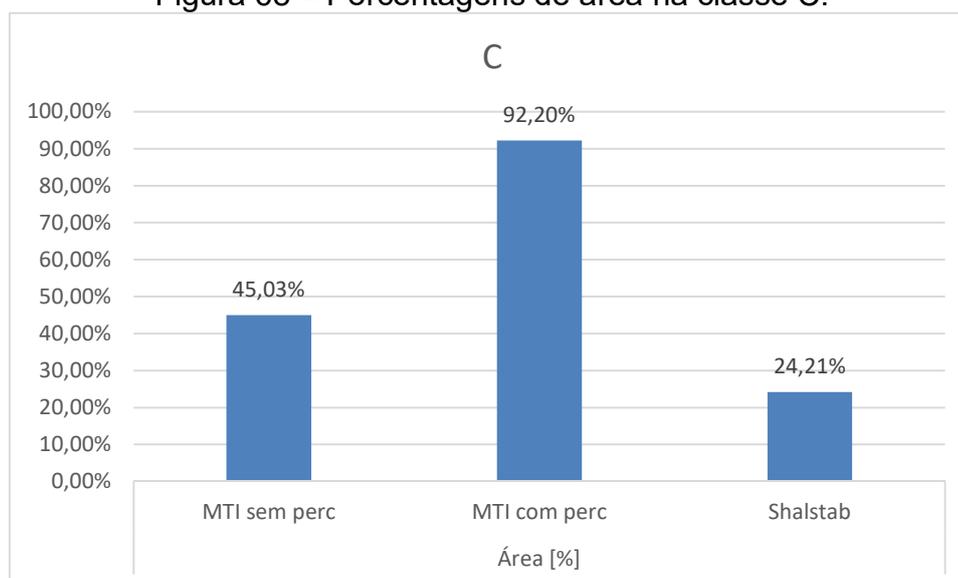
Fonte: Autora (2020).

Figura 67 – Porcentagens de área na classe B.



Fonte: Autora (2020).

Figura 68 – Porcentagens de área na classe C.



Fonte: Autora (2020).

5.3.2.7 Rgi, Rgt

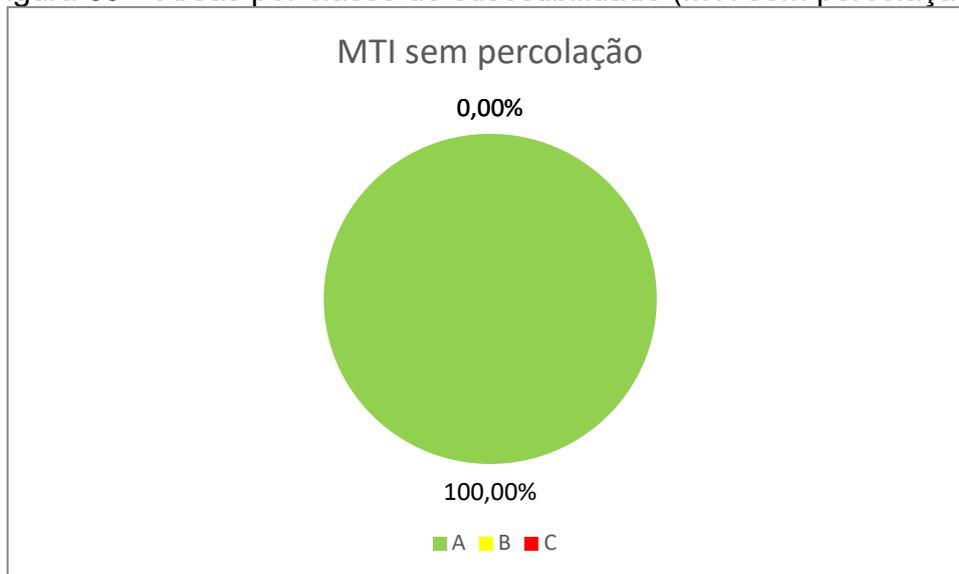
As unidades geotécnicas Litossolo de substrato granito Ilha (Rgi) e Litossolo de substrato granito Itacorubi (Rgt) apresentam toda a sua área como A pelo Método dos Taludes Infinitos (MTI), independentemente de considerar-se a percolação de água no solo. Pelo Modelo SHALSTAB, apenas uma pequena porcentagem (9,78%) da área se distribui entre as classes B e C.

Tabela 23 – Análise das unidades Rgi e Rgt.

Classe	Área [%]			Variações [%]		
	MTI sem perc.	MTI com perc.	SHALSTAB	MTI sem perc X com perc	MTI sem perc X Shalstab	MTI com perc X Shalstab
A	100,00%	100,00%	90,23%	0,00%	9,77%	9,77%
B	0,00%	0,00%	7,82%	0,00%	7,82%	7,82%
C	0,00%	0,00%	1,96%	0,00%	1,96%	1,96%

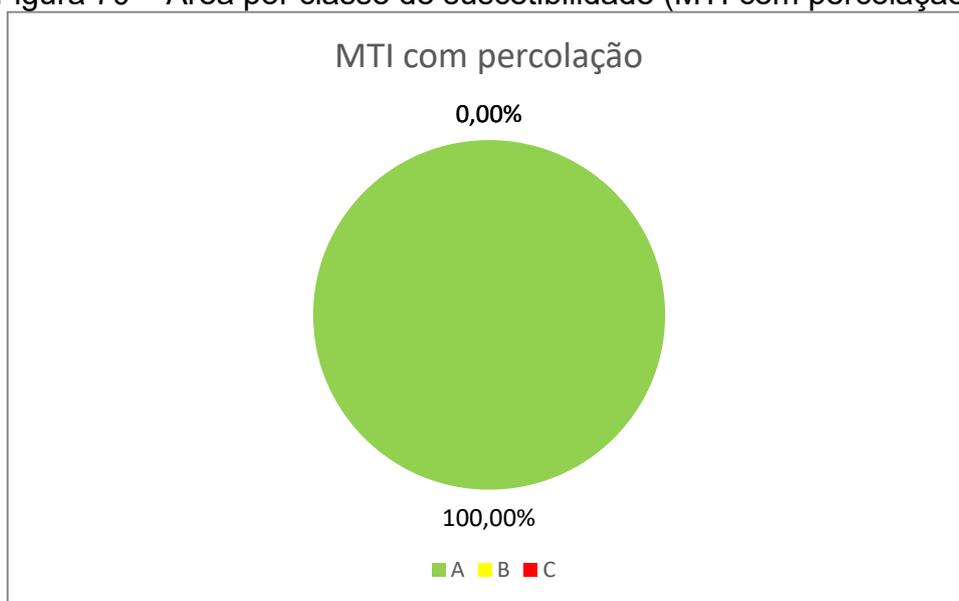
Fonte: Autora (2020).

Figura 69 – Áreas por classe de suscetibilidade (MTI sem percolação).



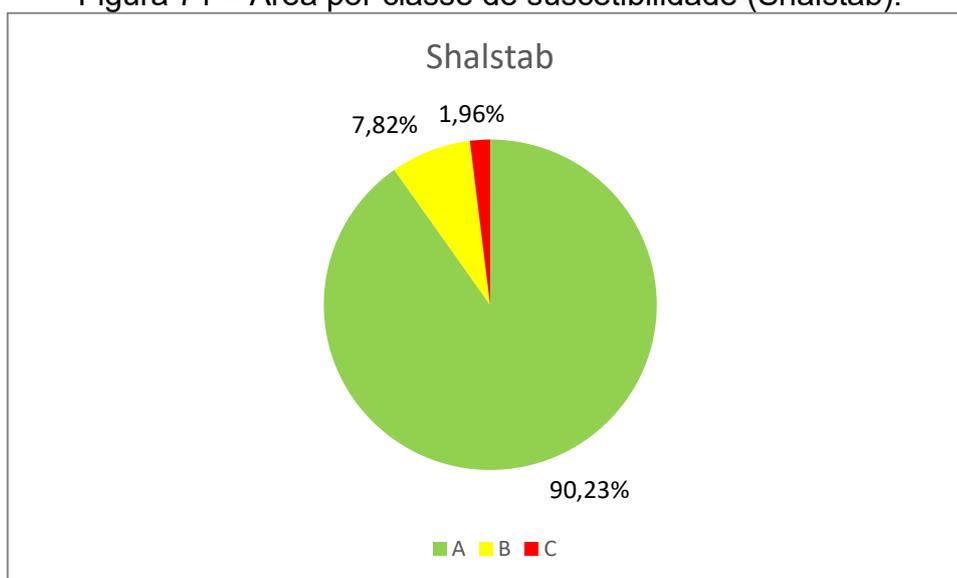
Fonte: Autora (2020).

Figura 70 – Área por classe de suscetibilidade (MTI com percolação).



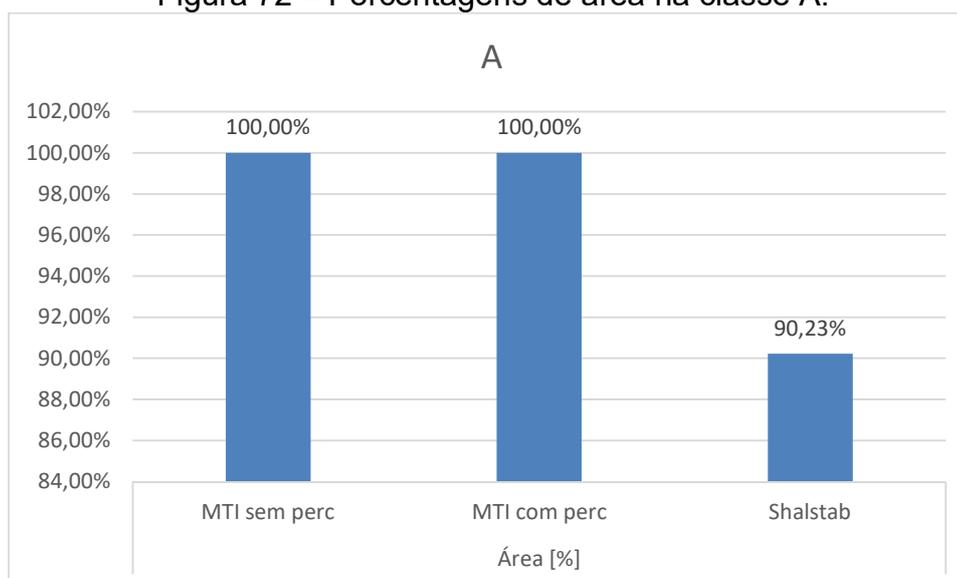
Fonte: Autora (2020).

Figura 71 – Área por classe de suscetibilidade (Shalstab).



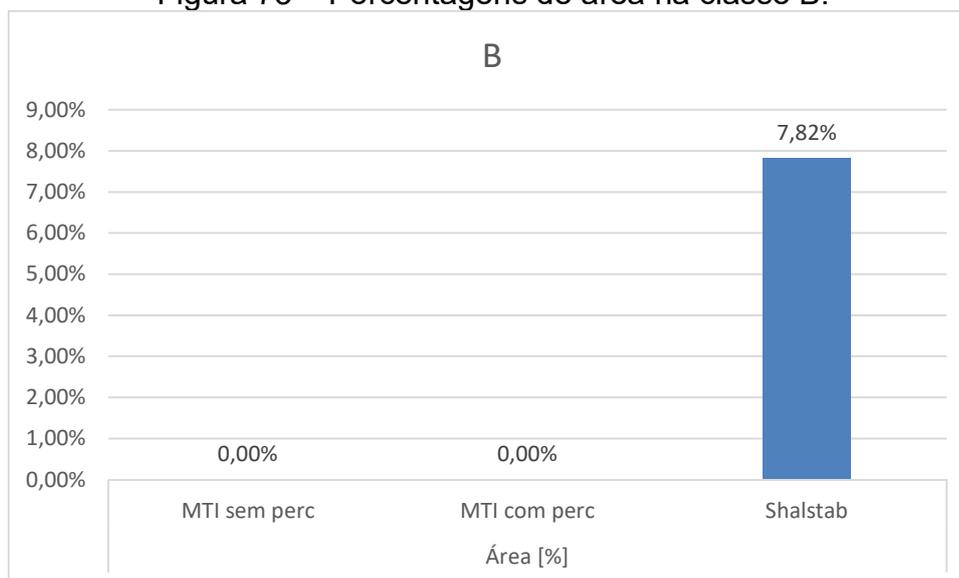
Fonte: Autora (2020).

Figura 72 – Porcentagens de área na classe A.



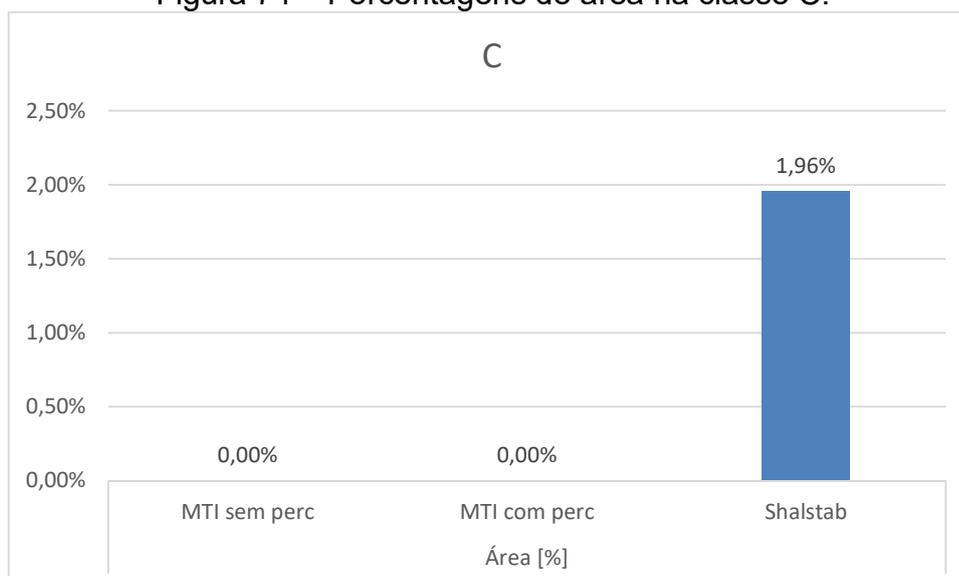
Fonte: Autora (2020).

Figura 73 – Porcentagens de área na classe B.



Fonte: Autora (2020).

Figura 74 – Porcentagens de área na classe C.



Fonte: Autora (2020).

5.3.2.8 Gsq e SMSq

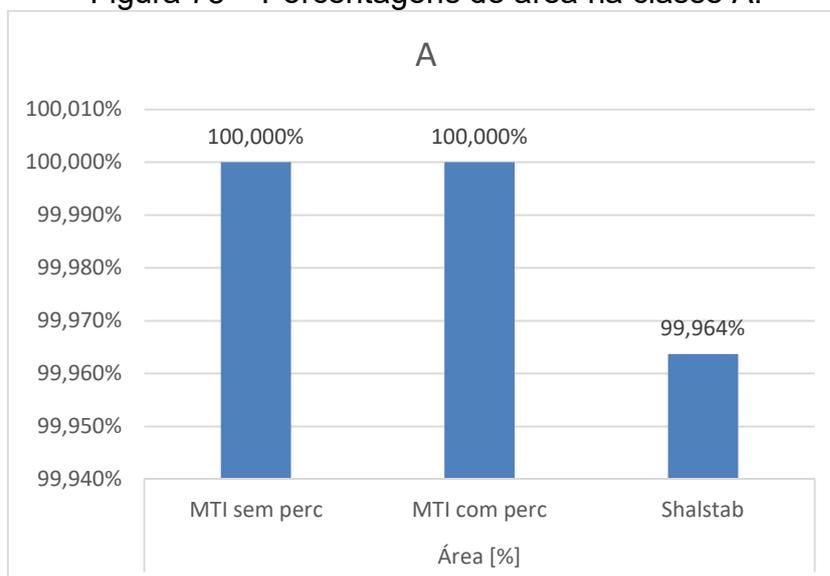
As unidades geotécnicas Gleissolo substrato sedimentos quaternários (Gsq) e Solos Moles substrato sedimentos quaternários (SMSq), parcela de solo sedimentar presente na área de estudos, apresenta-se praticamente toda na classe A, como pode ser observado na Tabela 24 e no gráfico da Figura 75.

Tabela 24 – Análise das unidades Gsq e SMSq.

Classe	Área [%]			Variações [%]		
	MTI sem perc.	MTI com perc.	SHALSTAB	MTI sem perc X com perc	MTI sem perc X Shalstab	MTI com perc X Shalstab
A	100,000%	100,000%	99,964%	0,0000%	0,0363%	0,0363%
B	0,000%	0,000%	0,035%	0,0000%	0,0352%	0,0352%
C	0,000%	0,000%	0,001%	0,0000%	0,0011%	0,0011%

Fonte: Autora (2020).

Figura 75 – Porcentagens de área na classe A.

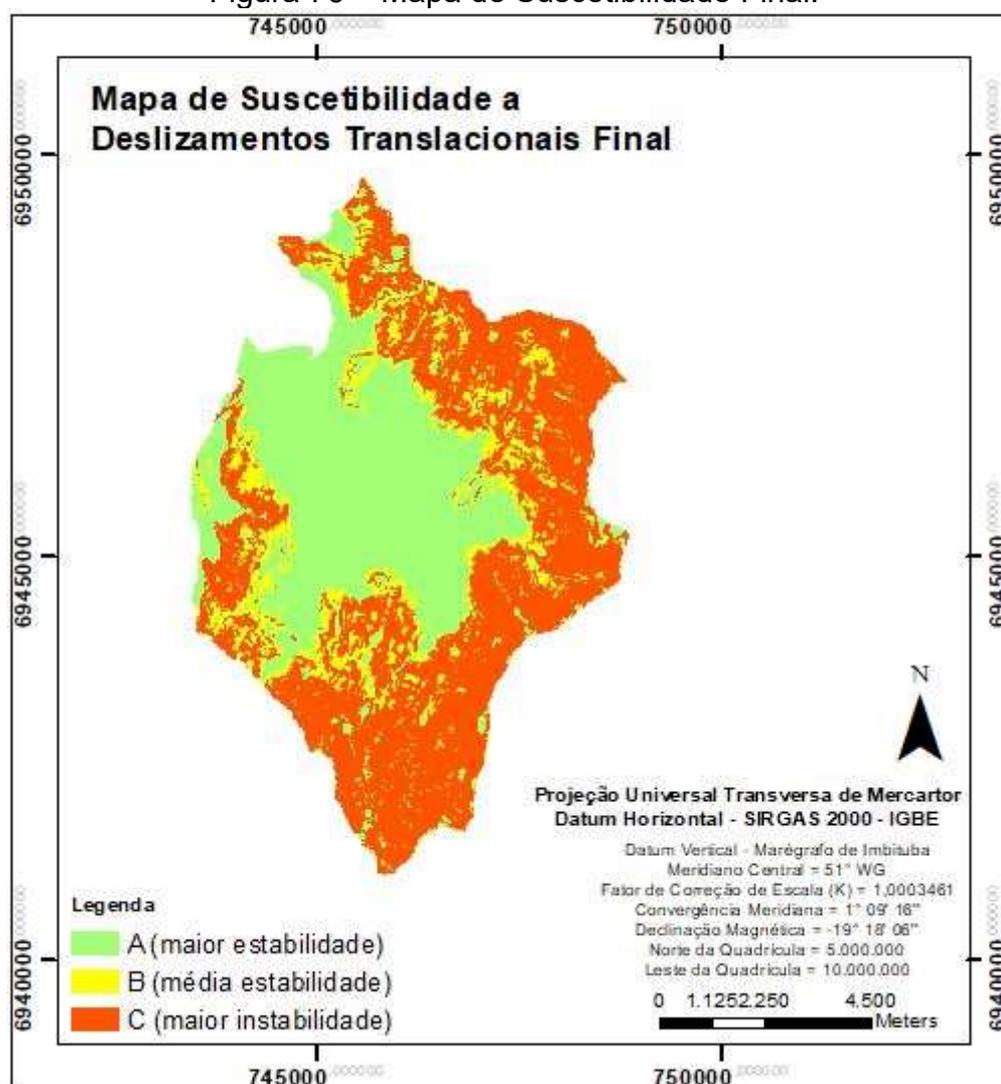


Fonte: Autora (2020).

5.4 MAPA DE SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS TRANSLACIONAIS FINAL

O cruzamento dos três mapas analisados, considerando-se sempre a permanência da classe de maior suscetibilidade para cada área, sendo a classe A de menor suscetibilidade e a classe C de maior, resultou no mapa apresentado na Figura 76 e na distribuição de área exposta na Tabela 25.

Figura 76 – Mapa de Suscetibilidade Final.



Fonte: Autora (2020).

Tabela 25 – Distribuição de área por classes.

Classe de Suscetibilidade	Área [km ²]	Área [%]
A	10,7	40%
B	3,0	11%
C	13,0	49%
Área Total	26,7	100%

Fonte: Autora (2020).

Analisando as classes de suscetibilidade para cada área segundo cada uma das três metodologias, foi possível observar que em 48% da área do mapa as classes coincidem, como apresentado na Tabela 26.

Tabela 26 – Área comum aos 3 mapas.

Classe de Suscetibilidade	Área [km²]	Área [%]
A	10,6	40%
B	0,0	0%
C	2,1	8%
Área Total	12,7	48%

Fonte: Autora (2020).

Ainda, quando reduzimos esta análise apenas para os mapas gerados por meio do Modelo SHALSTAB e pelo MTI com percolação, por apresentarem a maior proximidade geral, esta porcentagem sobe para aproximadamente 69% de área que se apresenta na mesma classe de suscetibilidade nos dois mapas, conforme apresentado na Tabela 27.

Tabela 27 – Área comum aos mapas MTI (perc.) e SHALSTAB.

Classe de Suscetibilidade	Área [km²]	Área [%]
A	10,6	40%
B	0,8	3%
C	7,0	26%
Área Total	18,4	69%

Fonte: Autora (2020).

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 CONCLUSÕES

A crescente urbanização das cidades faz crescer a necessidade de mapeamentos que orientem o uso e ocupação do solo de forma segura. Diferentes técnicas e metodologias podem ser utilizadas para elaboração destes mapas, sendo necessários estudos que comparem e validem estas possibilidades, auxiliando na evolução desta linha de pesquisa.

O presente estudo possibilitou a elaboração de mapas de suscetibilidade a deslizamentos translacionais para a Microbacia do Itacorubi, região central de Florianópolis, utilizando duas equações do Método dos Taludes Infinitos em ambiente SIG, tendo como suporte o mapa geotécnico de Christ (2019).

Ainda, foram realizadas adaptações no mapa de suscetibilidade a deslizamentos translacionais de Christ (2019), elaborado por meio do Modelo SHALSTAB, e nos mapas gerados neste estudo para que apresentassem o mesmo número de classes de suscetibilidade.

Assim, foi possível perceber as similaridades entre os mapeamentos e, também, a importância da consideração da presença de água no solo para que se atue em favor da segurança e presando pela similaridade com a situação real de campo.

Isto pode ser observado através da maior presença de áreas de instabilidade tanto no mapa de suscetibilidade gerado pela equação do Método dos Taludes Infinitos com percolação, quanto no mapa gerado através do Modelo SHALSTAB, ambos considerando a presença de água. Com isto, conclui-se que utilizar-se apenas do Método dos Taludes Infinitos sem percolação não seria recomendado em uma situação prática.

Com relação à comparação entre os três mapas, é notável que o Modelo Shalstab resulta em valores de área da microbacia mais distribuídos entre as classes de suscetibilidade. Já o MTI com percolação apresenta pouquíssima porcentagem de área na classe intermediária (B), se concentrando nas classes de maior e menor suscetibilidade.

Esta maior porcentagem de área na classe B no Modelo SHALSTAB também pode ser causada pela forma como foi feita a adaptação das classes de suscetibilidade: de 7 classes para 3, onde as classes mais e menos suscetíveis foram mantidas e todas as outras 5 foram classificadas como instáveis.

Vale ressaltar que o Modelo SHALSTAB manteve-se mais próximo ao MTI com percolação na maioria das análises realizadas. Porém, apresenta uma porcentagem de área na classe A menor, na classe B maior e na classe C com valor intermediário entre os outros dois mapas. Estas constatações indicam que a utilização do Modelo SHALSTAB estaria a favor da segurança.

Por fim, vale realçar que as menores variações totais entre o Modelo SHALSTAB e o Método dos Taludes Infinitos com percolação foram observadas nas unidades PVgi, Rgi e Rgt, além das unidades de solo sedimentar (Gsq e SMSq). Com relação a estas últimas, o fato de não possuírem inclinações relevantes leva praticamente todos os resultados para a classe A, em ambos os métodos. Para os demais casos, observou-se que se tratam das unidades com maiores Fatores de Segurança.

Ainda, as maiores variações totais entre os mapas ocorreram nas unidades Cgt, PVgt, Ddia, Dda, Dr e Cgi, que apresentam os menores Fatores de Segurança. Já a unidade Cde apresenta Fator de Segurança intermediário em relação às outras unidades e apresentou variação também intermediária.

Sendo assim, conclui-se que os fatores de segurança menores tendem a apresentar maiores variações entre os resultados do Método dos Taludes Infinitos e do Modelo SHALSTAB, sendo necessária a realização de um maior número de estudos referentes ao tópico e o emprego de maior atenção em situações reais que retratem esta hipótese.

6.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se como recomendação para futuros trabalhos na área:

- Realização de análises comparativas entre o Método dos Taludes Infinitos e o Modelo SHALSTAB em outras áreas de estudo, notando se os padrões de variações se repetem;
- Analisar a relação entre o Fator de Segurança e a variação de valores encontrados pelos dois métodos, através de uma maior amostra de resultados;
- Analisar as possibilidades de adaptação das classes de suscetibilidade para permitir uma análise comparativa mais fidedigna.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11682**: Estabilidade de Taludes. Brasil, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Rochas e solos. Brasil, 1995.

AUGUSTO FILHO, O. **Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica**. In: Conferência Brasileira Sobre Estabilidade de Encostas, 1., 1992, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: ABMS/ABGE. 1992.

AUGUSTO FILHO, O. **Cartas de Risco de Escorregamentos: uma proposta metodológica e sua aplicação no município de Ilhabela, SP**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1994.

BRITO, J.S.B.; ROSA, R. **Introdução ao Geoprocessamento: Sistema de Informação Geográfica**. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 1996.

CAMPANÁRIO, P. **Florianópolis: dinâmica demográfica e projeção da população por sexo, grupos etários, distritos e bairros (1950-2050)**. Prefeitura de Florianópolis, Instituto de Planejamento de Florianópolis (IPUF), 2007.

CARAMEZ, M. L. **Mapeamento geotécnico da microbacia do Itacorubi - Florianópolis/SC - aplicação do modelo SHALSTAB para a confecção de mapa de suscetibilidade a deslizamentos rasos de encostas**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

CARUSO JUNIOR, F. **Mapa geológico da Ilha de Santa Catarina**. Centro de Geologia Costeira e Oceânica da Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1993 (Notas Técnicas, 6).

CASTRO, A. L. C. **Manual de planejamento em defesa civil**. Vol.1. Brasília: Ministério da Integração Nacional/ Departamento de Defesa Civil, 1999.

CHRIST, C.E. **Caracterização dos Solos de Encostas e Análise da Suscetibilidade a Deslizamentos na Ilha de Santa Catarina**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2019.

CHRIST, C.E.; HULLER, J.; HIGASHI, R.A.R.; DOMINGUES, R.T. **Análise do Coeficiente de Segurança para a Geração de Mapa de Suscetibilidade a Deslizamentos Rotacionais**. XII Simpósio de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Sul, Joinville, Santa Catarina, 2019.

CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. **Landslides: Investigation and Mitigation**, Chapter 3: Landslide Types and Processes. U.S.A.: Transportation Reserch Board, 1996.

DAS, B. M. **Principles of Geotechnical Engeneering**. 7. ed. EUA: Cengage Learning, 2011. Tradução: MIRANDA, L. R. Fundamentos de Engenharia Geotécnica. São Paulo, SP, 2014.

DAVISON DIAS, R. **Proposta de Metodologia de Definição de Carta Geotécnica Básica em Regiões Tropicais e Subtropicais**. Revista do Instituto Geológico. São Paulo, SP, 1995.

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, 1998.

DOMINGUES, R.T., SBROGLIA, R. M., RIGOTTI, J.A.N., HULLER, J., CHRIST, C. E., HIGASHI, R.A.R. **Comparativo Entre o Ensaio de Cisalhamento Direto e o Borehole Shear Test na Obtenção dos Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento dos Solos**. XII Geosul, Joinville, SC, 2019.

FERNANDES, N. F. & AMARAL, C. P. **Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica**. In: GUERRA, A. J. T. e CUNHA, S. B. (org) Geomorfologia e Meio Ambiente. Bertrand, Rio de Janeiro, 1996.

GGE - Grupo de Gestão do Espaço - UFSC. **Atlas Ambiental Municipal - Florianópolis, SC - Brasil**. (P. FUNCITEC, Ed.) Florianópolis, 2006.

GOMES, R. A. T. **Modelagem de previsão de movimentos de massa a partir da combinação de modelos de escorregamentos e corridas de massa**. Tese de Doutorado em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2006.

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

GUZZETTI, F.; CARRARA, A.; CARDINALI, M.; REICHENBACH, P. **Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multiscale study**. Central/Italy, Geomorphology, v. 31, n. 1-4, 1999.

HIGASHI, R. A. R. **Metodologia de uso e ocupação dos solos de cidades costeiras brasileiras através de SIG com base no comportamento geotécnico e ambiental**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2006.

INFANTI JR., N.; FORNASARI FILHO, N. **Processos da Dinâmica Superficial**. In: OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S.N.A. (eds) Geologia de Engenharia. São Paulo: ABGE, 1998.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Panorama do Município de Florianópolis/SC**. Acesso em 15/06/2020, disponível em <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sc/florianopolis/panorama>>.

KOBIYAMA, M; CHECCHIA, T; SILVA, R. V; SCHRÖDER, P. H; GRANDO, A. REGINATTO, G. M. P. **Papel da comunidade e da universidade no gerenciamento de desastres naturais**. In: Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais, 1., 2004, Florianópolis. Anais.

KOBIYAMA, M.; MENDONÇA, M.; MORENO, D. A.; MARCELINO, I. P. V. O.; MARCELINO, E. V.; GONÇALVES, E. F.; BRAZETTI, L. L. P.; GOERL, R. F.; MOLLERI, G. S. F.; RUDORFF, F. M. **Prevenção de Desastres Naturais: Conceitos Básicos**. 1ª Edição, Editora Organic Trading. Florianópolis, SC, 2006.

KOBIYAMA, M., MELO, C. M. **Aplicação do Modelo Shalstab no Estudo de Escorregamentos no Brasil: Revisão**. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 19, no 4, 2018.

LOCH, R.E.N. **Cartografia: representação, comunicação e visualização de dados espaciais**. Ed. da UFSC, Florianópolis, 2006.

LUTENEGGER, A. J.; HALLBERG, G. R. **Borehole Shear Test in Geotechnical Investigations**. U.S.A.: Laboratory Shear Strength of Soil. ASTM STP 740. R. N. Yong and F. C. Townsend, Eds., American Society for Testing and Materials, 1981.

LUTENEGGER, A.J., TIMIAN, D.A. **Reproducibility of Borehole Shear Test Results in Marine Clay**. Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol.10, No. 1, 1987.

MARCELINO, E. V. **Mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamento no município de Caraguatatuba (SP) usando técnicas de sensoriamento remoto e SIG**. São José dos Campos. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2003.

MEISINA, C.; SCARABELLI, S. **A Comparative Analysis of Terrain Stability Models for Predicting Shallow Landslides in Colluvial Soils**. Geomorphology, v.87, 2007.

MULUNGO, H. E. **Estudo de inundação na bacia do Campus da UFSC, Florianópolis - SC**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

OGURA, A.; MACEDO, E. S. **Procesos y riesgos geológicos**. In: II Curso internacional de aspectos geológicos de protección ambiental: notas de clases. Montevideo: UNESCO, 2002.

REGINATTO, G. M. P. **Caracterização de Movimentos de Massa na Bacia Hidrográfica do Rio Cunha, Rio dos Cedros – SC, com Ênfase em Escorregamentos Translacionais**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

SANTOS, G.T. **Integração de informações pedológicas, geológicas e geotécnicas aplicadas ao uso do solo urbano em obras de engenharia**. Tese de Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 1997.

SANTOS, G.T. **Mapas Digitais: Mapeamento Geotécnico**. Tese de Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 1997.

SBROGLIA, R. M. **Mapeamento Geotécnico e de Área Suscetíveis a Deslizamentos na Microbacia do Ribeirão Baú, Ilhota/SC**. Dissertação de Mestrado em Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

SILVA, R. C. **Vulnerabilidade socioambiental a desastres na bacia hidrográfica do Rio Itacorubi, Florianópolis, SC**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

TOMINAGA, L.K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. **Desastres Naturais: conhecer para prevenir**. Instituto Geológico, Secretaria do Meio Ambiente, Governo do Estado de São Paulo, 2009.

ZUQUETTE, L.. **Cartografia Geotécnica**. São Paulo, SP, Oficina de Textos, 2004.